

SCHRIFTENREIHE ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT

Analyse

August 2016

Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft

Geologie – Märkte – Umwelteinflüsse

Gerhard Angerer | Peter Buchholz | Jens Gutzmer | Christian Hagelüken

Peter Herzig | Ralf Littke | Rudolf K. Thauer | Friedrich-Wilhelm Wellmer

„Energiesysteme der Zukunft“ ist ein Projekt von:

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Impressum

Autoren

Dr. Gerhard Angerer
Ehemals Fraunhofer-Institut
für System- und Innovations-
forschung ISI

Dr.-Ing. Christian Hagelüken
Umicore

Prof. Dr. Rudolf K. Thauer
Max-Planck-Institut für terrestrische
Mikrobiologie

Dr. Peter Buchholz
Deutsche Rohstoffagentur, Bundesanstalt
für Geowissenschaften und Rohstoffe

Prof. Dr. Peter Herzig
GEOMAR Helmholtz-Zentrum
für Ozeanforschung Kiel

Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Wellmer
Ehemaliger Präsident, Bundesanstalt
für Geowissenschaften und Rohstoffe

Prof. Dr. Jens Gutzmer
TU Bergakademie Freiberg, Helmholtz-
Institut Freiberg für Ressourcentechnologie

Prof. Dr. rer. nat. Ralf Littke
RWTH Aachen

Reihenherausgeber

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (Federführung)
Geschäftsstelle München, Karolinenplatz 4, 80333 München | www.acatech.de

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale) | www.leopoldina.org

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.
Geschwister-Scholl-Straße 2, 55131 Mainz | www.akademienunion.de

Empfohlene Zitierweise

Angerer et al.: *Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft: Geologie – Märkte – Umwelteinflüsse*
(Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2016.

Unter Mitwirkung von

Tobias Kracke, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Koordination

Dr. Berit Erlach, acatech

Redaktion

Tim Schröder

Gestaltung und Satz

Schauschau, Berlin

Stand: November 2015

ISBN: 978-3-9817048-6-0

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Gedruckt auf säurefreiem Papier
Printed in EC

Das Akademienprojekt

Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ erarbeitet Stellungnahmen und Analysen zur Gestaltung der Energiewende. Stellungnahmen enthalten Handlungsoptionen für die Transformation des Energiesystems und werden nach externer Begutachtung vom Kuratorium des Akademienprojekts verabschiedet. Analysen sind Ergebnisberichte von Arbeitsgruppen. Die inhaltliche Verantwortung für Analysen liegt bei den Autoren. Sofern eine Analyse Bewertungen enthält, geben diese die persönliche Meinung der Autoren wieder.



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft

Geologie – Märkte – Umwelteinflüsse

Gerhard Angerer | Peter Buchholz | Jens Gutzmer | Christian Hagelüken
Peter Herzig | Ralf Littke | Rudolf K. Thauer | Friedrich-Wilhelm Wellmer

Vorwort

Die Energiewende wird unseren Rohstoffverbrauch nachhaltig verändern. Wenn der Energiebedarf in Deutschland zunehmend aus Wind- und Solarenergie gedeckt wird, dann verringert sich langfristig der Bedarf an Kohle, Öl und Gas. Im Gegenzug wird der Verbrauch an metallischen Rohstoffen ansteigen, um etwa energieeffiziente Wind- und Solaranlagen, Batterie- und Wasserstoffspeicher oder andere Systeme herzustellen. Neben Kupfer, Kobalt und Nickel kommen etwa Seltene Erden und andere High-Tech-Metalle zum Einsatz, die größtenteils importiert werden müssen. Die Risiken dieser neuen Abhängigkeiten der deutschen Industrie verdeutlichte im Jahr 2009 der rasante Preisanstieg der Seltenen Erden.

Ist die Umsetzung der Energiewende also durch Rohstoffmangel gefährdet? Die Autoren dieser Analyse kommen zu dem Schluss, dass eine ausreichende Versorgung mit Metallen, fossilen Energieträgern und Bioenergie sichergestellt werden kann. Vielversprechende technologische Ansätze – vom Ausbau des Recyclings bis hin zur Erschließung völlig neuer Rohstoffquellen in der Tiefsee – werden hier beschrieben.

Auch die Zusammenhänge auf den globalen Rohstoffmärkten werden erläutert. Was sind kritische Rohstoffe? Wie schnell kann der Markt auf einen plötzlichen Nachfrageschub reagieren? Und wie wird sich die weltweite Nachfrage in den nächsten Jahrzehnten entwickeln? Die Antworten auf diese Fragen helfen, Warnsignale für Versorgungsrisiken rechtzeitig zu erkennen und Ausweichstrategien zu erarbeiten.

Nicht zuletzt geht die Analyse auch auf die ökologischen und sozialen Folgen des Bergbaus ein. Denn wenn die Umstellung auf „grüne“ Energie tatsächlich zu mehr Nachhaltigkeit führen soll, muss dies konsequenterweise bei der Gewinnung der dafür benötigten Rohstoffe berücksichtigt werden. Somit ist eine sichere, bezahlbare sowie umwelt- und sozialverträgliche Rohstoffversorgung ein wichtiger Baustein für eine erfolgreiche Energiewende.



Prof. Dr. Peter Herzig
Leiter der AG „Ressourcen“

Inhalt

Abkürzungen und Einheiten	6
Zusammenfassung.....	11
1. Einleitung.....	24
2. Grundlagen.....	26
2.1 Klassische Gliederung der Rohstoffe und Definitionen	26
2.2 Reserven, Ressourcen und Geopotenziale	28
2.3 Kritische und wirtschaftsstrategische Rohstoffe	30
2.4 Verfügbarkeiten von Rohstoffen: der Regelkreis der Rohstoffversorgung und Rohstoffstudien	34
2.4.1 Der Regelkreis der Rohstoffversorgung	35
2.4.2 Studien zur Rohstoffkritikalität	36
3. Rohstoffversorgung und Einflüsse der Weltwirtschaft	40
3.1 Primärgewinnung von Rohstoffen und Reichweitenprognose	40
3.1.1 Produktionspeak statt „Reichweite“?	44
3.1.2 Energie und Wasserbedarf	47
3.2 Preisbildungs- und Marktmechanismen	50
3.3 Die Nachfrageseite	54
3.3.1 Allgemeine Entwicklungen	55
3.3.2 Technologieentwicklung auf der Nachfrageseite.....	58
3.4 Die Angebotsseite	64
3.4.1 Geologische und bergwirtschaftliche Einflüsse auf das Angebot von Primärrohstoffen.....	64
3.4.2 Politische und soziale Einflüsse auf das Angebot von Primärrohstoffen.....	70
3.4.3 Technologien für die Rohstoffexploration und -gewinnung.....	83
3.4.4 Das Angebot von Sekundärrohstoffen	91
3.4.5 Entwicklung von Technologien für das Recycling von sekundären Rohstoffen.....	100
3.4.6 Der Einfluss von Substitution und steigender Materialeffizienz auf das Rohstoffangebot	102

4.	Aktuelle Rohstoffsituation – ein Überblick	109
4.1	Versorgungssituation bei mineralischen Rohstoffen	112
4.1.1	Gründung einer deutschen Rohstoffgesellschaft?	114
4.1.2	Ausweichstrategien für eine sichere Versorgung	117
4.1.3	Sekundärrohstoffe erhöhen die Versorgungssicherheit	117
4.2	Versorgungssituation bei fossilen Energierohstoffen	119
4.3	Versorgungssituation bei Biomasse	123
4.3.1	Anteile der Bioenergie am Primärenergieverbrauch	125
4.3.2	Bilanzierung der pflanzlichen Biomasseproduktion auf dem Land	127
4.3.3	Biomasse aus Wäldern	128
4.3.4	Biomasse aus der Landwirtschaft	130
4.3.5	Lignocellulose	132
4.3.6	Land, Böden, Wasser, Stickstoff, Phosphor und Kalium	132
4.3.7	Ökonomische Aspekte der Biomassenutzung	136
5.	Entwicklung des Rohstoffbedarfs des Energiesystems	139
5.1	Nachfragekonkurrenzen bei kritischen Rohstoffen für Energietechnologien	141
5.2	Reaktionsfähigkeit des globalen Rohstoffsystems	143
5.3	Kritische Ressourcen für die Energiewende	145
5.3.1	Rohstoff-Kritikalitätsstudien: Metastudien im Vergleich	145
5.3.2	Analysen zu kritischen Rohstoffen für die Energiewende im Vergleich	148
5.4	Eigene Kritikalitätseinschätzungen	150
5.4.1	Rohstoffe aus eigenständigen Lagerstätten, insbesondere die Seltene-Erden-Elemente, und beibrechende Elemente	150
5.4.2	Phosphor und das Edelgas Helium	155
5.4.3	Die Elemente Lithium und Kupfer	156
6.	Fazit	159
7.	Anhang	167
	Glossar	179
	Literatur	182
	Über das Akademieprojekt	196

Abkürzungen und Einheiten

Abkürzungen

AFMAG	Audiofrequenzmagnetik
ATP	Adenosintriphosphat
BEV	Battery Electric Vehicle, batterieelektrisches Kraftfahrzeug
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BGS	British Geological Survey
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMW	Bayerische Motorenwerke AG
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BÖR	BioÖkonomieRat
BRIC-Staaten	Die BRIC-Staaten umfassen die sich industriell stark entwickelnden Länder Brasilien, Russland, Indien und China.
CCS	Carbon Capture and Storage, Fachbegriff für Technologien, die die Abtrennung und Speicherung von Kohlendioxid zum Ziel haben
CONNEX	Initiative der G7 zur stärkeren Unterstützung von Entwicklungs- und Schwellenländern bei komplexen Vertragsverhandlungen
CPI	Corruption Perceptions Index
CRB	Commodity Research Bureau
CSR	Corporate Social Responsibility
CTC	Certified Trading Chains
DERA	Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
dmp	Depletion Mid Point, Punkt bei der Förderung aus einer Lagerstätte, an dem fünfzig Prozent der Vorräte erschöpft sind
DOE	US Department of Energy
EASAC	European Academies Science Advisory Council
EGS	Enhanced Geothermal System, Fachbegriff für eine tiefengeothermische Anlage zur Energiegewinnung, bei der durch technische Maßnahmen, wie die hydraulische Stimulation (Fracking), die Durchlässigkeit der Gesteine für das Wärmeträgermedium (in der Regel Wasser) im Untergrund verbessert wurde

EITI	Extractive Industries Transparency Initiative
EPA	US Environmental Protection Agency, US Behörde für den Umweltschutz
EROI	Energy Return of Investment, Erntefaktor, der die eingesetzte Energie und die gewonnene Energie in Beziehung setzt
EU-25	25 Mitgliedstaaten der Europäischen Union vor der Erweiterung im Jahr 2007
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations, Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen
FCV	Fuel Cell Vehicle, Brennstoffzellenfahrzeug
FONA	Rahmenprogramm zur „Forschung für nachhaltige Entwicklungen“ des BMBF
GLR	Gewichtetes Länderrisiko
GRI	Global Reporting Initiative
GtL	Gas-to-Liquids, Technologien, die den Umwandlungsprozess von Gas zu Flüssigkeiten umfassen, zum Beispiel Erdgas in Flüssiggas
HEV	Hybrid Electric Vehicle, Hybridelektrofahrzeug
HHI	Herfindahl-Hirschmann-Index, Index zur Angabe von Konzentrationen
HIF	Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie
HWWI	Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut
IAI	International Aluminium Institute
ICMM	International Council of Mining & Metals
IEA	International Energy Agency, Internationale Energieagentur
IFC	International Finance Corporation
IGF	Intergovernmental Forum of Mining, Minerals, Metals and sustainable Development
ILO	International Labor Organization, Internationale Arbeitsorganisation
IMF	Institut für Methodik der Fernerkundung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	International Renewable Energy Agency
ISMI	International Strategic Minerals Inventory
ITO	Indium Tin Oxide, Indiumzinnoxid; Zinn-dotierte Indiumoxide sind zum Beispiel bei der Herstellung von Dünnschicht-Solarzellen oder LCD-Displays relevant.
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
IZT	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
JRC-IET	Joint Research Institute der Europäischen Kommission – Institut für Energie und Transport
LCD	Liquid Crystal Display, Bildschirme auf Flüssigkristall-Basis
LED	Light Emitting Diode, Leuchtdiode
LNG	Liquefied Natural Gas, Flüssigerdgas
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
MB	Metal Bulletin
MEG	Metals Economics Group
MMSD	Mining, Minerals and Sustainable Development Projekt

NMMT	Nationaler Masterplan Maritime Technologien
NPP	Nettoprimärproduktion; jährlich nachwachsende pflanzliche Biomasse
NRC	National Research Council of the National Academies of the USA
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OPEC	Organization of the Petroleum Exporting Countries
PGE	Platingruppenelemente (vergleiche PGM unter Chemische Elementsymbole)
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle, Plug-in-Hybridelektrofahrzeug
ProgRess	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
SEO	Seltene-Erden-Oxide
SI	Social Investment, soziales Investment
SQUID	Supraleitende Quanteninferenzdetektoren
SX/EW	Solvent Extraction/Electrowinning, Verfahren zur Rohstoffgewinnung basierend auf chemischen Lösungsverfahren und elektrolytischer Trennung aus der Lösung
TEM	Transienten-Elektromagnetik
UKERC	United Kingdom Energy Research Centre
UNEP	United Nations Environment Programme
URR	Ultimate Recoverable Resource, theoretischer Begriff, der alle für einen Rohstoff gewinnbaren Vorkommen auf der Erde umfasst
US-CBO	US Congressional Budget Office
USGS	US Geological Survey
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VEBA	Vereinigte Elektrizitäts- und Bergwerks AG
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment (Elektronikschrott)
WGI	World Governance Index
WING	Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft
WTO	World Trade Organization, Welthandelsorganisation

Einheiten

bbf	Barrel, englisch für Fass, das in der Kohlenwasserstoffindustrie typischerweise verwendete Raummaß für Erdölprodukte; bei Erdöl entspricht ein Barrel etwa 158,984 Liter
Cu-eq	Kupfer-Äquivalent
€	Euro
EJ	Exajoule, entspricht einer Trillion oder 10^{18} Joule
gC/m²yr	Gramm Kohlenstoff pro Quadratmeter und Jahr
g/t	Gramm pro Tonne
Gtoe	Gigatonne Öl-Äquivalent (1 oe = 41,868 Megajoule)
lb	Pound, Pfund (Gewichtseinheit), plural lbs (ein lb = 0,45359237 Kilogramm)
IGK-$\text{\\$}$	International Geary-Khamis Dollar, ein IGK- $\text{\$}$ entspricht der Kaufkraft eines USD normiert auf einen gewissen Zeitpunkt
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule, entspricht tausend oder 10^3 Joule
m³	Kubikmeter
MMcf/d	eine Million Kubikfuß pro Tag, eine in der Erdgasförderung gebräuchliche Maßeinheit; 1cf entspricht 0,02832 Kubikmeter
Mt	Megatonne, entspricht einer Million oder 10^6 Tonnen
MW	Megawatt, entspricht einer Million oder 10^6 Watt
MW_{el}	Megawatt elektrisch, Leistungsspezifikation bei Geothermiekraftwerken gegenüber einer thermischen Nutzung
MWP	Megawatt Peak, Einheit der maximalen Leistung einer Photovoltaikanlage
t	Tonne
USD	US-Dollar

Chemische Elementsymbole und empirische Formeln

CH₄	Methan
CO₂	Kohlendioxid
CO(NH₂)₂	Harnstoff
D₂	molekulares Deuterium (Deuterium ist das schwere Isotop von Wasserstoff)
D₂O	schweres Wasser
H₂	molekularer Wasserstoff
H₂O	Wasser
K₂O	Kaliumoxid
N₂	molekularer Stickstoff
NH₄⁺	Ammonium
NO_x	Synonym für Stickstoffoxide

NO_3^-	Nitrat
N_2O	Distickstoffmonoxid, Lachgas
O_2	molekularer Sauerstoff
PGM	Platingruppenmetalle; diese umfassen Ruthenium, Rhodium, Palladium, Osmium, Iridium und Platin
SEE	Seltene-Erden-Elemente
U_3O_8	Triuranooxid, ein Uran(VI)-oxid, das bei der Aufbereitung von Uran zum Handelsprodukt „Yellow Cake“ vornehmlich entsteht und als Berechnungseinheit für den Uraninhalt dient. Uran kann in Verbindungen in Oxidationsstufen von +2 bis +6 auftreten, in der Natur tritt es vornehmlich aber mit den Oxidationsstufen +4 oder +6 auf.

Gruppe nach IUPAC beziehungsweise CAS

	1/IA	2/IIA	3/IIIB	4/IVB	5/VB	6/VIB	7/VIIB	8/VIII	9/IX	10/VIII	11/IB	12/IIIB	13/IIIA	14/IVA	15/VA	16/VIA	17/VIIA	18/VIIIA
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104*	105*	106*	107*	108*	109*	110*	111*	112*	113*	114*	115*	116*	117*	118*
				57 La	58 Ca	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
				89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

1 ← Ordnungszahl
H ← Elementsymbol: Aggregatzustand unter Normalbedingungen (0° C; 101,325 kPa):
 fest, **gasförmig**, **flüssig**, **unbekannt**

— Natürliches Element ■ Nichtmetalle ■ Alkalimetalle ■ Edelgase ■ Lanthanoide** (Seltene-Erden-Elemente, SEE)
 - - Künstliches Element ■ Halbmetalle ■ Erdalkalimetalle ■ Halogene ■ Actinide
 - Radioaktives Element ■ Metalle ■ Übergangsmetalle □ Unbekannt

*Die Elemente mit den Ordnungszahlen 104 bis 118 werden auch als „Transactinoide“ bezeichnet. **Die Lanthanoiden und Actinoiden sind Metalle und zählen ebenfalls zu den Übergangsmetallen.

Zusammenfassung

Für die Energiesysteme der Zukunft werden im Wesentlichen drei Rohstoffgruppen benötigt: fossile Energierohstoffe (Erdgas, Erdöl, Kohle), Biomasse und mineralische Rohstoffe (vor allem Metalle). Während der Bedarf an fossilen Rohstoffen langfristig zurückgehen wird und Biomasse nur einen kleinen Teil des Energiebedarfs decken kann, wird der Bedarf an Metallen, die für den Ausbau Erneuerbarer-Energien-Anlagen benötigt werden, steigen. Mit der Transformation des Energiesystems geht also ein Wandel des Rohstoffbedarfs einher. Eine zuverlässige Versorgung mit den dafür benötigten Rohstoffen ist somit eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende.

Importland Deutschland

Für die neuen Energietechnologien werden großteils die gleichen Rohstoffe benötigt wie für andere Hightech-Produkte. Im Hinblick etwa auf Technologiemetalle wie Kupfer, Kobalt, Platingruppenmetalle, die Sondermetalle wie Indium, Tellur, Gallium und Germanium oder die Seltene-Erden-Elemente konkurriert der Energiesektor etwa mit der Automobilindustrie und der Elektronik-, Informations- und Kommunikationsbranche. Da Deutschland keine eigene Bergbauproduktion an Metallen hat und zudem die Recyclingraten bei Rohstoffen wie den Seltene-Erden-Elementen oder Indium, Tellur, Gallium und Germanium sehr gering sind, ist Deutschland in hohem Maße auf die Einfuhr von Metallen angewiesen. Diese Rohstoffe werden auf internationalen Märkten gehandelt, daher spielt die

weltweite Nachfrage eine zentrale Rolle für deren Verfügbarkeit in Deutschland.

Der Bedarf an Baurohstoffen wie Sand oder Kies und einigen Industriemineralen, beispielsweise Kaolin und Gips, wird in Deutschland hingegen aus der einheimischen Produktion gedeckt. Die Baurohstoffe sind im Grunde unbegrenzt verfügbar, Einschränkungen gibt es lediglich durch konkurrierende Nutzungsansprüche wie Naturschutz oder Trinkwasserschutz.

Die fossilen Energieträger Erdgas, Erdöl und Steinkohle werden ebenfalls größtenteils importiert. Lediglich bei der Braunkohle ist Deutschland als weltweit größter Braunkohleförderer Selbstversorger. Der Anteil der fossilen Energieträger an der Importbilanz für Rohstoffe beträgt mehr als zwei Drittel. Der Import von Energierohstoffen hat daher eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung. Der Bioenergiebedarf wird zu achtzig Prozent aus heimischem Anbau gedeckt, allerdings wird Biomasse als Futtermittel importiert.

Global wachsende Nachfrage

Der Rohstoffbedarf von Volkswirtschaften verändert sich, je weiter Industrialisierung und wirtschaftliche Entwicklung voranschreiten: Zunächst müssen Infrastruktur und Produktionsstrukturen für die verarbeitende Industrie aufgebaut werden. Die Materialintensität, das Verhältnis aus Rohstoffeinsatz zum Bruttoinlandsprodukt, steigt während dieser Phase stark an. Ab einem bestimmten Entwicklungsstand gelingt es der Wirtschaft immer

besser, mit derselben Rohstoffmenge immer wertvollere Produkte herzustellen, und der Dienstleistungssektor gewinnt an Bedeutung. In dieser Phase nimmt die Materialintensität wieder ab, obwohl der absolute Rohstoffbedarf trotzdem weiter steigen kann. Daraus lassen sich generelle Trendaussagen für die künftige Nachfrage nach Rohstoffen ableiten: Während bis Ende des vergangenen Jahrtausends 70 bis 80 Prozent des Rohstoffeinsatzes auf die alten Industrieländer entfielen, ist heute bei fast allen wesentlichen Rohstoffen China der größte Konsument. Für einzelne Rohstoffe, unter anderem Stahl, ist in China das Maximum der Materialintensität bereits durchschritten. Es ist also zu erwarten, dass sich langfristig das Wachstum der Nachfrage nach anderen Rohstoffen ebenfalls verlangsamt – der Zeitpunkt dafür ist aber schwer vorherzusagen. Ab dem Jahr 2020 etwa werden voraussichtlich auch andere bevölkerungsreiche Schwellen- und Entwicklungsländer wie Indien, Indonesien oder Brasilien dem Entwicklungspfad Chinas folgen. Die Angleichung der Wohlstandsniveaus dieser Länder an die westlichen Industrienationen führt auch weiterhin zu einer Zunahme des Rohstoffbedarfs über das Jahr 2050 hinaus.

Geologische Verfügbarkeit

Aber reichen die vorhandenen Rohstoffe aus, um den weltweit wachsenden Bedarf zu decken? Um dies abzuschätzen, wird in manchen Rohstoffstudien die sogenannte statische Reichweite herangezogen. Sie bezeichnet das Verhältnis der Reserven, also der bekannten und zu wirtschaftlichen Bedingungen förderbaren Rohstoffe, zum jährlichen Verbrauch. Dieser Quotient wird fälschlicherweise immer wieder als die Anzahl an Jahren interpretiert, für die die Rohstoffe noch ausreichen. Bei diesem Ansatz wird allerdings nicht berücksichtigt, dass es zusätzlich zu den Reserven noch die Ressourcen und Geopotenziale

gibt. Dabei bezeichnen Ressourcen die bekannten, aber mit heutiger Technik bei heutigen Preisen nicht förderbaren Rohstoffe. Geopotenziale sind alle noch nicht nachgewiesenen Vorkommen, die beispielsweise in bestimmten geologischen Strukturen vermutet werden. Durch Exploration, Weiterentwicklung der Bergbau-, Förder- und Aufbereitungstechnik und steigende Marktpreise können Geopotenziale und Ressourcen in Reserven umgewandelt werden. Dies führt dazu, dass die Reserven der meisten Rohstoffe mit dem Verbrauch „mitwachsen“. Wie das Beispiel Erdöl zeigt, steigen die Reserven teilweise sogar überproportional zum Verbrauch: Während sich der Verbrauch von 1950 bis 2013 etwa verachtfachte, stiegen die Reserven auf das Zwanzigfache.

Da die meisten mineralischen Rohstoffvorkommen im Feld der Geopotenziale liegen dürften, gibt es trotz des weltweit steigenden Bedarfs aus geologischer Sicht keinen Mangel, der den Umbau des Energiesystems behindern würde. Ausschlaggebend ist daher vielmehr deren Verfügbarkeit am Markt zu wettbewerbsfähigen Preisen. Generell können die Rohstoffmärkte flexibel auf Nachfrageschübe reagieren: Durch temporäre Knappheiten entstehen Preissignale, die wiederum zu Reaktionen auf der Angebots- und Nachfrageseite führen. So kann das Angebot durch Explorationsanstrengungen und technischen Fortschritt bei der Bergbau-, Förder- und Aufbereitungstechnik ausgeweitet werden, sodass bisherige Geopotenziale in Reserven umgewandelt und dem Markt zugeführt werden können. Neben der Primärproduktion durch Bergbau stehen auch die Rohstoffe zur Verfügung, die aus Altgeräten und Infrastruktur wiedergewonnen werden können (sekundäre Lagerstätten). Diese verstärkt zu nutzen, ist ebenfalls eine Maßnahme, mit der die Angebotsseite auf Knappheiten reagieren kann. Auf der Nachfrageseite führen Knappheiten und hohe Preise eines Rohstoffs zu Bemühungen, diesen Rohstoff effizienter, das heißt spar-

samer, zu verwenden oder durch andere Rohstoffe zu ersetzen – zum Beispiel durch effizientere Fertigungstechniken oder die Verwendung anderer Technologien. Das Zusammenspiel dieser Marktmechanismen wird auch als Regelkreis der Rohstoffversorgung bezeichnet. Dieser Regelkreis hat in den vergangenen hundert Jahren dazu geführt, dass sich die realen Preise der meisten Rohstoffe im Durchschnitt kaum erhöht haben.

Preisspitzen bei plötzlichen Nachfrageschüben

Dennoch kommt es immer wieder zu zeitlich begrenzten Preisspitzen. Dies liegt zum einen daran, dass das Angebot bei plötzlichen Nachfrageschüben nur zeitverzögert ausgeweitet werden kann. So betragen die Vorlaufzeiten von der Entdeckung einer Lagerstätte in der Exploration bis zur Entwicklung zu einem Bergwerk im Schnitt etwa zehn Jahre. Auch um bestehende Bergwerkskapazitäten auszuweiten, ist ein Zeitvorlauf notwendig. Da es für fast alle Rohstoffe einen globalen Markt gibt, können schon kleine Nachfrageanstiege um wenige Prozent irgendwo auf der Welt zu großen Preissprüngen führen und somit Einfluss auf die kurzfristige Versorgungssituation haben. Zum anderen führen die geografische Verteilung der Vorkommen und die Strukturen der Bergbauwirtschaft zu Konzentrations-trends, das heißt, immer mehr Rohstoffvorkommen gehören immer weniger Firmen in immer weniger Förderländern. Es besteht daher eine gewisse Tendenz zur Bildung von Oligopolen. Dies ermöglicht es einzelnen Unternehmen oder Ländern, zum Beispiel durch Exportrestriktionen, den Rohstoffmarkt sehr stark zu beeinflussen. Dadurch verschlechtert sich die Versorgungssicherheit.

Rohstoffe verarbeitende Unternehmen müssen entsprechende Risiken entlang der Versorgungskette bewer-

ten können. Nur wenn potenziell kritische Rohstoffe im Vorfeld identifiziert werden, kann die Wirtschaft rechtzeitig Ausweichstrategien entwickeln, indem sie die Bezugsquellen diversifiziert, verstärkt heimische Sekundärmaterialien nutzt oder Möglichkeiten zur Substitution und sparsamerem Materialverbrauch in ihren Produktionsabläufen entwickelt. Auch durch die Bildung von Käufergemeinschaften, langfristige Lieferverträge mit Preisgleitklauseln und Hedgingmaßnahmen können Unternehmen das Versorgungsrisiko abfedern.

Die dafür benötigten Informationen werden in Deutschland beispielsweise von der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) zur Verfügung gestellt. Unterstützt werden können die Bemühungen der Unternehmen von politischer Seite zum Beispiel dadurch, dass die Europäische Union und die Welthandelsorganisation WTO Wettbewerbsverzerrungen und Handelshemmnisse auf den globalen Rohstoffmärkten abbauen. Diese Maßnahmen wirken allerdings in der Regel erst mittel- bis langfristig.

Bewertung der Kritikalität

Die Kritikalität von Rohstoffen kann anhand verschiedener Kenngrößen bewertet werden. Ein wichtiger Frühwarnindikator ist das Verhältnis aus Reserven und jährlichem Verbrauch. Durch das Mitwachsen der Reserven ist dies, wie bereits beschrieben, keine feste Größe, sondern eine Momentaufnahme in einem dynamischen System. Die langzeitige Beobachtung dieses Verhältnisses ermöglicht es aber, drohende Versorgungsengpässe zu erkennen: Fällt der Wert auf unter 10 bis 15 Jahre – also in den Bereich typischer Vorlaufzeiten von Bergbauprojekten – kann der Rohstoff möglicherweise als kritisch bewertet werden. Dies trifft bisher nur für Antimon und Zinn zu, zwei Rohstoffe, die für die Energiesysteme der Zukunft unkritisch sind.

Ein weiterer wichtiger Indikator ist das gewichtete Länderrisiko. Dieses bewertet Rahmenbedingungen in den Lieferländern wie politische Stabilität, Korruptionskontrolle und Leistungsfähigkeit der öffentlichen Hand, und setzt die resultierende Risikobewertung ins Verhältnis zum Anteil des Landes an der weltweiten Rohstoffproduktion. Kritisch sind demnach Rohstoffe, die zu einem großen Teil aus wenigen Lieferländern mit einem hohen Länderrisiko bezogen werden. Während die statische Reichweite also eher ein Maß für die gegebenenfalls notwendigen Explorationsaktivitäten ist, bewertet das gewichtete Länderrisiko die politisch bedingte Zuverlässigkeit der Rohstoffversorgung. Für die Bewertung der Kritikalität muss das gewichtete Länderrisiko in Zusammenhang damit gesehen werden, wie schwer die Wirtschaft durch Nicht-Verfügbarkeit der Rohstoffe geschädigt wird. Geringe Substitutions- und Recyclingmöglichkeiten erhöhen das Risiko.

Rohstoff-Risikolisten, wie beispielsweise die der Europäischen Kommission von 2010 und 2014, können der Wirtschaft helfen, sich auf mögliche Versorgungsengpässe bei einzelnen Rohstoffen einzustellen und Ausweichstrategien zu entwickeln. Bei der Beurteilung der Versorgungssituation für deutsche Unternehmen ist zu beachten, dass diese häufig Zwischenprodukte höherer Wertschöpfungsketten verarbeiten. Dazu stehen derzeit kaum Informationen zur Verfügung. Die DERA hat daher begonnen, auch wichtige Zwischenprodukte in ihren Kritikalitätsanalysen zu erfassen. Detaillierte Analysen gibt es zum Beispiel bereits für Kupfer, Zinn, Zink, Zirkon, Antimon und Wolfram, die Platingruppenmetalle und Wismut. Bemerkenswert hierbei ist, dass die Angebotskonzentration der Produktion bei zahlreichen mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten erheblich größer ist als bei fossilen Rohstoffen wie Erdöl. Dies kann beim Ausbau von erneuerbaren Energie-

technologien im Rahmen der Energiewende zu neuen handelspolitischen Konflikten führen.

Für die Abschätzung der zukünftigen Versorgungssituation sind Szenarien, mit denen sich Technologieentwicklungen und Nachfragetrends abschätzen lassen, von großer Bedeutung. Durch immer kürzere Produktzyklen lassen sich Änderungen in der Nachfrage jedoch immer weniger vorhersehen. Ein eindrucksvolles Beispiel dafür ist die Fernsehindustrie: Der Wechsel von Röhren- zu LCD-Fernsehern vollzog sich innerhalb von nur zwei Jahren. Statt Barium und Strontium waren plötzlich Indium und Zinn die entscheidenden Elemente.

Metalle für die Energiewende

Um den Rohstoffbedarf für die Umsetzung der Energiewende abzuschätzen, müssen alle relevanten Technologien berücksichtigt werden. Dabei ist ein Energiesystem, das großenteils auf dezentralen Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien basiert, vielfältiger als das heutige System. Windkraft- und Photovoltaikanlagen, verschiedene Batteriesysteme, Wasserstoffspeicher, Elektrofahrzeuge und Leuchtdioden (LEDs) sind nur einige Beispiele. Etwa 45 verschiedene Technologien sind für den Umbau des Energiesystems voraussichtlich von Bedeutung.

Kritische Rohstoffe sind dabei vor allem die Elemente der Seltenen Erden, die Platingruppenmetalle sowie Indium, Tellur und andere seltene Metalle. Die Seltene-Erden-Elemente, deren Weltbergwerksproduktion zu 95 Prozent in China liegt, werden etwa für energiesparende Leuchtstoffe und vor allem für Permanentmagnete in Windenergieanlagen, Motoren und Generatoren benötigt. Zukünftig könnten sie möglicherweise auch verstärkt in Batterien und Photovoltaikanlagen zum Einsatz kom-

men. Die Platingruppenelemente spielen insbesondere für Brennstoffzellen und die Wasserstoffelektrolyse – und damit für mögliche Schlüsseltechnologien der Energiewende wie Langzeitspeicher und Power-to-Gas – eine wichtige Rolle.

Zudem gibt es eine Reihe von Elementen, bei denen die Kritikalität in verschiedenen Rohstoffstudien unterschiedlich bewertet wird. Hierzu zählen Nickel, Niob, Wolfram, Gallium, Germanium, Selen, Vanadium, Silber, Grafit, Rhenium und Hafnium. Diese Elemente könnten je nach Annahmen zu künftigen technologischen Entwicklungen und den Entwicklungen der Rohstoffmärkte ebenfalls kritisch werden.

Viele kritische oder nahezu kritische Elemente – darunter Indium und Tellur – sind beibrechend, das heißt, sie werden als Nebenprodukt im Bergbau eines anderen Metalls gewonnen. Bei beibrechenden Metallen funktioniert der Regelkreis der Rohstoffversorgung nur eingeschränkt: Ein Produzent des Hauptmetalls, bei Indium zum Beispiel Zink, wird die Hauptmetallproduktion kaum bei einer Knappheit des beibrechenden Metalls ausweiten. Es gibt oft nur wenige Produzenten und Abnehmer, wodurch der Markt weniger transparent ist als bei Rohstoffen, die über große Börsen gehandelt werden. Daher ist auch die künftige Verfügbarkeit schwer einzuschätzen.

Neue Lagerstätten in der Tiefe und im Meer

Wurde durch ein langanhaltendes Überangebot an Rohstoffen seit den 1980er Jahren die Lagerstättenforschung weltweit zurückgefahren, so hat sich dieser Trend in der Hochpreisphase zwischen 2005 und 2014 umgedreht, und die Exploration wurde weltweit wieder ausgebaut. Allerdings gehen aktuell mit

den fallenden Rohstoffpreisen auch die Explorationstätigkeiten wieder zurück. Große Potenziale, neue Lagerstätten zu entdecken, liegen in der Tiefe. Wurden zunächst oberflächennahe Lagerstätten exploriert und abgebaut, so werden seit den 1990er Jahren immer häufiger tief liegende Erzkörper entdeckt. Im Bereich mariner Rohstoffe sind die Erkundungstechniken bereits weit fortgeschritten, während die Technologien für die Gewinnung und Weiterverarbeitung von Rohstoffen aus der Tiefsee wie etwa den marinen polymetallischen Knollen (Manganknollen) noch am Anfang ihrer Entwicklung stehen.

Trotzdem dürften diese marinen Rohstoffe zukünftig an Bedeutung gewinnen. So hat die Bundesregierung Konzessionen im Pazifik für polymetallische Knollen (Manganknollen) erworben, die insbesondere Kupfer, Nickel und Kobalt enthalten, sowie eine Konzession für Buntmetall-führende Massivsulfide im Indischen Ozean. Die Massivsulfide enthalten als beibrechende Elemente auch viele wichtige „Hightech-Elemente“.

Recycling wichtiger Metalle

Deutschland verfügt bei den Sekundärlagerstätten, das heißt den Rohstoffen in Altprodukten, über erhebliche Potenziale. Alte Autos, Computer, Gebäude, Stromleitungen und Deponien – nutzt man diese sekundären Lagerstätten intensiv, so lässt sich die Rohstoffbasis der Volkswirtschaft deutlich erweitern. Grundsätzlich können mit metallurgischen Prozessen Metalle aus Sekundärmaterialien in der Regel in der gleichen Qualität gewonnen werden wie aus Primärquellen (eine Ausnahme ist Aluminium). Somit kann das Recycling dazu beitragen, sich von der Versorgung mit kritischen Primärrohstoffen unabhängiger zu machen. Zudem sind die Vorlaufzeiten und der Investitionsbedarf oft geringer als bei

Primärlagerstätten, und die gesellschaftliche Akzeptanz für das Recycling ist höher als für den Bergbau.

Das Recycling von reinen Metallen verbraucht weniger Energie als die Primärgewinnung. Strebt man jedoch sehr hohe Recyclingquoten an, so muss zunehmend Material aus Sekundärlagerstätten mit niedriger Konzentration und komplexer Zusammensetzung gewonnen werden – mit oft entsprechend höherem Energieaufwand. Da die primären Lagerstättenverhältnisse jedoch schwieriger werden, wird sich der energetisch optimale Recyclinganteil künftig erhöhen.

Bislang werden hohe Recyclingquoten nur bei Haupt- und Edelmetallen erreicht. Bei den Seltene-Erden-Elementen oder den Hightechrohstoffen wie Indium, Germanium, Gallium oder Tellur sind sie hingegen noch unzureichend, da es nur eine eingeschränkte metallurgische Infrastruktur zur Gewinnung dieser Elemente gibt und diese Elemente oft dissipativ verteilt sind. Das Verhältnis zwischen der tatsächlichen Produktion und dem Potenzial der sekundären Rohstofflagerstätte hängt von der Effizienz der gesamten Prozesskette ab: Sammeln, Demontage, Aufbereitung und metallurgische Verarbeitung. Dabei spielen die Abfallgesetzgebung und ihr Vollzug eine wichtige Rolle. Gerade bei vielen für zukünftige Energiesysteme wichtigen Metallen kommt es bereits auf der ersten Stufe, dem Sammeln, zu hohen Verlusten. So wird normale Verbraucherelektronik bis heute nur zu einem geringen Teil einem leistungsfähigen Recycling zugeführt. Obwohl die Gehalte pro Tonne Elektronikschrott oft höher sind als in einer Tonne Primärerz, ist der spezifische Metallwert für ein einzelnes Verbraucherprodukt gering, zum Beispiel rund ein Euro für ein Mobiltelefon. Damit fehlt für den Verbraucher ein ökonomischer Anreiz das Produkt dem Recycling zuzuführen.

Ein erheblicher Verlust an Metallen für die globale Kreislaufwirtschaft entsteht auch durch illegale und dubiose Exporte von Elektronikschrott beziehungsweise Altprodukten in Regionen mit unzureichenden Recyclingstandards. Die Verarbeitung der Altgeräte in Anlagen im außereuropäischen Ausland, die mit niedrigeren Standards arbeiten und weniger effizient sind, ist oft kostengünstiger – allerdings mit schwerwiegenden Folgen für menschliche Gesundheit und Umwelt und mit deutlich niedrigeren Metallausbeuten als in modernen industriellen Anlagen möglich.

Durch das Produktdesign lassen sich die Qualität der Sekundärlagerstätten und damit Recyclingquote sowie Energiebedarf für das Recycling beeinflussen. Sind Bauteile, die wertvolle Elemente enthalten – zum Beispiel Magnete, Batterien oder Elektronikbauteile in Autos und Elektrogeräten, besser zu erreichen, können sie vor dem Schredderprozess ausgebaut und die Rohstoffe effizienter wiedergewonnen werden.

Obwohl immer mehr Stoffe aus geologischen Lagerstätten in Infrastruktur und Produkten verbaut werden und sich daher in sekundären Lagerstätten anreichern, wäre ein hundertprozentiges Recycling langfristig weder energetisch sinnvoll noch ließe sich dadurch der gesamte Bedarf abdecken. Darüber hinaus können die Metalle erst am Ende der Produktlebenszeit wiedergewonnen werden. Bei einem schnellen Ausbau neuer Technologien sind daher die Vorräte an wiedergewinnbarem Material in der Technosphäre zunächst gering, wenn das entsprechende Metall nicht in anderen Altprodukten ausreichend vorhanden ist. Der Anteil, den die Sekundärproduktion beim Umbau des Energiesystems decken kann, hängt daher auch davon ab, wie schnell der Ausbau neuer Energietechnologien voranschreitet und wie lang die Lebenszeit der Produkte ist.

Wasser- und Energieeinsatz im Bergbau

Wasser wird im Bergbau vor allem für die Aufbereitung der Erze eingesetzt. Da viele Grubendistrikte in ariden oder semiariden Gebieten liegen, sehen manche Fachleute die Wasserverfügbarkeit als einen limitierenden Faktor für die künftige Rohstoffversorgung. Teilweise kann der Einsatz von Süßwasser reduziert werden, indem brackisches oder salziges Wasser genutzt wird. Auch entsalztes Meerwasser wird im Bergbau eingesetzt, dies erhöht jedoch den Energieverbrauch erheblich.

Der Energieaufwand pro Tonne Metall wird in Zukunft wahrscheinlich steigen, da zunehmend tiefer liegende Lagerstätten ausgebeutet und komplexere Erze aufbereitet werden müssen. Dies ist natürlich auch im Hinblick auf die Umweltbilanz relevant. Heute verursacht der Bergbau bereits acht Prozent des weltweiten Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen.

Für Energierohstoffe wird anhand von sogenannten energetischen Amortierungsrechnungen analysiert, welcher Anteil eines Energieträgers für dessen Erschließung, Gewinnung und Bereitstellung aufgewandt werden muss. Als Maß dafür wird der sogenannte Erntefaktor (Energy Return of Investment, EROI) verwendet. Dieser Wert ist sehr stark von den Lagerstättenverhältnissen abhängig. Bei Erdgas variiert er zum Beispiel zwischen 15 und 200. Auch für die erneuerbaren Energien ist wichtig, wieviel Energie für die Gewinnung der Rohstoffe aufgewendet werden muss, aus denen die Anlagen hergestellt werden. Für Photovoltaikanlagen und Windkraftanlagen liegen die EROI-Werte wesentlich höher als für die meisten Formen von Bioenergie.

Der Energieverbrauch für die Bereitstellung von Rohstoffen ist natürlich im Hinblick auf den Klimaschutz weniger

problematisch, wenn die eingesetzte Energie aus regenerativen Quellen stammt. Die Energiebilanz von Bergbauunternehmen ließe sich verbessern, indem die Produktion an das schwankende Angebot von Strom aus Sonne und Wind angepasst würde. Denkbar ist, dass Unternehmen gezielt preisgünstigen überschüssigen Wind- und Solarstrom einsetzen, um Erze mit besonders niedrigen Metallgehalten aufzubereiten. Schon heute arbeiten viele Tagebaue mit zwei Erzhaldden: Highgrade und Lowgrade Stockpiles. Die Letzteren werden bei günstigen, also hohen, Rohstoffpreisen verarbeitet.

Gesellschaftliche Legitimation – eine notwendige Bedingung

Auch wenn alle technischen und ökonomischen Voraussetzungen für ein Bergbauprojekt erfüllt sind, gibt es eine weitere, wichtige Bedingung: die gesellschaftliche Legitimation. Das heißt, die Bevölkerung muss den Bergbau befürworten oder zumindest tolerieren. Diese gesellschaftliche Legitimation für den Rohstoffabbau, die sogenannte „Social Licence to Operate“ zu bekommen beziehungsweise aufrechtzuerhalten, stellt eine zunehmend große Herausforderung für die Bergbaubranche dar.

In den heutigen Industrienationen wie Deutschland, Frankreich und England, die alle früher Rohstoffproduzentenländer waren, nimmt der Anteil des Bergbaus am Bruttoinlandsprodukt immer weiter ab. Mit dem Bedeutungsverlust der Rohstoffindustrie lässt auch das Wissen um die Bedeutung der Rohstoffe und Interesse an Rohstoffthemen in der Bevölkerung nach. Dem Bergbau haftet oft ein Negativimage an, und er wird in erster Linie mit Umwelterstörung und Gefährlichkeit für die Bergleute assoziiert. Dies gilt zunehmend auch für klassische Bergbauländer wie Kanada und Australien, wo immer größere Teile der Landesfläche von Explorationsberechtigungen ausgeschlossen werden.

Auch in den rohstoffreichen Schwellen- und Entwicklungsländern, die oftmals stark vom Rohstoffexport abhängig sind, zeigen sich Widerstände. Dies liegt auch daran, dass der frühere Bergbau in vielen Ländern – etwa in Bolivien, Chile und Peru – oft zerrüttete Sozialstrukturen und Altlasten hinterlassen hat. Denn große Rohstoffvorkommen bringen längst nicht immer Wohlstand und Wirtschaftswachstum mit sich. In vielen Fällen schafft der Bergbau in Entwicklungs- und Schwellenländern Inseln wirtschaftlicher Aktivität, die die sozialen Unterschiede in der Bevölkerung zementieren oder vergrößern, ohne auf die Gesamtentwicklung einer Region oder Landes auszustrahlen. Zudem sind in vielen rohstoffreichen Ländern indigene Bevölkerungsgruppen von den Auswirkungen des Bergbaus betroffen, die die Rohstoffe meist gar nicht selbst nutzen.

Die mit dem Bergbau oft einhergehenden Interessenkonflikte sind jedoch von Land zu Land verschieden und meist sehr komplex. Wie stark eine Bevölkerung den Bergbau im eigenen Land akzeptiert oder ablehnt, hängt von vielerlei Faktoren ab: vom Entwicklungsstadium des Landes und der wirtschaftlichen Abhängigkeit von der Rohstoffproduktion, von Devisen- und Steuereinnahmen, Arbeitsplätzen und Infrastrukturentwicklung, die der Bergbau generiert und auch von den lokalen Umweltauswirkungen von Bergbau und Verhüttung. Eine nachhaltige und sozioökologisch akzeptable Rohstoffgewinnung lässt sich nur etablieren, indem die verschiedenen Interessen diskutiert und gegebenenfalls abgewogen werden. Good-Governance-Strukturen sind hier ein wichtiger Schlüssel: Nur wenn wirksame Steuerungsprozesse im Zusammenspiel von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft etabliert sind, mit denen sich kollektive Aufgaben im Sinne des Allgemeinwohls bewältigen lassen, ist es wahrscheinlich, dass sich eine exportorientierte Rohstoffproduktion in der Summe positiv für ein Land auswirkt.

Eine soziale Akzeptanz für die Rohstoffgewinnung wird letztlich nur erreicht werden können, wenn die Bevölkerung überzeugt werden kann, dass ihre Werte geachtet, die Umwelteingriffe minimiert sowie wirtschaftliche Vorteile für sie durch Arbeitsplätze und bessere Infrastruktur geschaffen werden.

Tagebauprojekte gehen oft mit besonders vehementem Widerstand einher. Im Vergleich zu Tiefbauprojekten ist der Eingriff in die Landschaft ungleich größer, im Zweifel müssen ganze Dörfer umgesiedelt werden. Zudem sind die Spätfolgen, zum Beispiel für den Wasserhaushalt, schwer abzuschätzen. So stellt sich die Frage, ob der in der Bergbauplanung zu beobachtende Trend, aus Kostengründen Tiefbaue in immer größere Tagebaue umzuwandeln, nicht langfristig ein Irrweg ist.

Interessant ist eine Entwicklung in Österreich: Hier wird aus Umweltgründen teilweise von Tagebauen in Tiefbaue übergegangen. Derartige Bestrebungen können dazu beitragen, die Folgen der Rohstoffgewinnung für Umwelt und Landschaft zu begrenzen und damit auch die gesellschaftliche Akzeptanz für den Bergbau zu erhalten beziehungsweise zu steigern. Durch die Entwicklung hochleistungsfähiger Untertagemaschinen könnte diese Entwicklung unterstützt werden.

Umwelt- und Sozialstandards

Unzureichende Umwelt- und Sozialstandards führen jedoch nicht nur zu Gefahren für Gesundheit und die Umwelt, sondern stellen auch eine Wettbewerbsverzerrung auf den Rohstoffmärkten dar, weil die sozialen und ökologischen Kosten externalisiert und damit der Gemeinschaft angelastet werden. Die notwendige Verbesserung von Umwelt- und Sozialstandards dürfte für die rohstoffgewinnende Industrie im

internationalen Kontext eine große, wenn nicht die größte Zukunftsaufgabe sein.

Angesichts der auftretenden Missstände haben sich die großen internationalen Bergbauunternehmen in Initiativen zusammengeschlossen und zu Sozial- und Umweltstandards verpflichtet. Ein Beispiel ist der International Council of Mining & Metals (ICMM), nach dessen Standards etwa 30 bis 40 Prozent der Weltproduktion gefördert werden. Allerdings ist kein Unternehmen aus China Mitglied, obwohl China das weltgrößte Bergbauland ist. Auch regelmäßiges Monitoring, Evaluierungskampagnen und Aufklärungsarbeit können zur Verbesserung der Standards beitragen. Dies wird zum Beispiel von der Global Reporting Initiative (GRI) geleistet, einer unabhängigen, internationalen Organisation, die 1997 unter Beteiligung des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet wurde. Ein Problem ist allerdings, dass mittelgroße oder kleine Bergbauunternehmen sich teilweise nicht an die Standards solcher Initiativen halten. Diese Firmen haben zwar nur einen geringen Anteil an der Weltproduktion, verursachen aber oft überproportionale Umweltschäden im Verhältnis zu ihrer Produktion.

Bei der Durchsetzung spielen auch internationale Banken eine bedeutende Rolle, da sie durch eine entsprechende Steuerung der Bergbaufinanzierung Standards erzwingen können. In der Regel werden Bergbaugroßprojekte zu etwa einem Drittel mit Eigenkapital und zwei Drittel mit Fremdkapital von Bankenkonsortien finanziert. Den internationalen Banken und privaten Geldgebern kommt also eine besondere sozioökologische Verantwortung zu.

Fossile Energierohstoffe

Derzeit werden weltweit mehr als 80 Prozent des Primärenergieverbrauchs durch die fossilen Energieträger Erdöl, Erdgas und Kohle gedeckt. Die International

Energy Agency (IEA) geht zumindest bis 2040 von einem steigenden Energieverbrauch aus, wobei das Wachstum nicht in Westeuropa, sondern vor allem in China sowie verschiedenen Schwellenländern erfolgen wird. Auch in Deutschland wird der Energieverbrauch noch zu achtzig Prozent mit fossilen Energieträgern gedeckt, wobei der Verbrauch seit 1990 leicht gesunken ist; bis 2050 soll der Primärenergieverbrauch gegenüber 2008 halbiert werden.

Auch wenn die Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik weiterhin rasch ausgebaut wird, müssen doch – solange es keine Langzeitspeicher für Strom gibt – auf absehbare Zeit entweder Kohle- oder Gaskraftwerke (gefeuert mit Erdgas oder Biogas) bereitgehalten werden. Kohle ist auf lange Sicht verfügbar und relativ kostengünstig. Allerdings verursacht Kohle im Vergleich zu allen anderen Energieträgern die meisten CO₂-Emissionen. Gaskraftwerke hingegen haben den Vorteil, dass sie flexibler sind als Kohlekraftwerke und daher die fluktuierende Einspeisung aus Windkraft- und Photovoltaik gut ausgleichen können. Zudem verbrennen Erdgas und Biogas deutlich sauberer als Kohle, sind aber teurer.

Bei Steinkohle, Braunkohle und Uran gibt es so große Ressourcen und Reserven, dass selbst bei steigendem Verbrauch keine Einschränkungen bei der Verfügbarkeit zu erwarten sind. Für die deutsche Versorgung spielt Uran aufgrund des beschlossenen Kernenergieausstiegs jedoch keine große Rolle mehr.

Während Braunkohle praktisch ausschließlich aus heimischer Förderung stammt, ist der Anteil heimischer Steinkohle in den vergangenen zehn Jahren drastisch zurückgegangen und betrug 2013 nur noch 13 Prozent. Da die Subventionierung der deutschen Steinkohle bis zum Jahr 2018 beendet wird, ist ein weiterer Rückgang zu erwarten.

Erdöl und Erdgas sind im Vergleich zu Kohle knappe Rohstoffe. Erdgas aus deutschen Quellen deckte im Jahr 2013 etwa 12 Prozent des deutschen Verbrauchs, beim Erdöl waren es lediglich zwei Prozent.

Erdöl wurde in erster Linie aus Russland, Norwegen, dem Vereinigten Königreich und aus politisch wenig stabilen Regionen des Nahen Ostens und Nordafrikas bezogen. Erdöl ist der teuerste Energierohstoff und verzeichnet häufig kurzfristige Preissprünge. Zwischen 2000 und 2008 stieg der Preis beispielsweise um mehr als das zehnfache. Solche Preissprünge sind allerdings häufig weniger durch die Förderkosten bestimmt als durch politische Entwicklungen bedingt, in der Vergangenheit etwa durch Verknappungsmaßnahmen der OPEC, die Kuwaitkrise oder den Irakkrieg.

Auch beim Erdgas ist Deutschland von wenigen Lieferländern abhängig. Während heute noch ein Teil des Erdgases aus den Niederlanden kommt, wird diese Bezugsquelle aufgrund schrumpfender Reserven zukünftig ausfallen. Dadurch wächst die Abhängigkeit von Importen aus Russland. Sie ließe sich reduzieren, indem verstärkt verflüssigtes Erdgas (LNG) genutzt würde, das mit Tankern herantransportiert werden kann.

Eine weitere Alternative ist die Nutzung von Erdöl und Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten in Deutschland, das in sehr dichten Gesteinen lagert (zum Beispiel Schiefergas und Schieferöl) und häufig nur durch zusätzliche technische Maßnahmen gefördert werden kann. Am bekanntesten ist die hydraulische Stimulation durch das in der Öffentlichkeit kontrovers diskutierte Hydraulic Fracturing (Fracking). Die Entwicklung unkonventioneller Öl- und Gasressourcen in den USA zeigt, wie radikal technische Innovationen die Rohstoffversorgung beeinflussen können. So ist es durchaus möglich,

dass die USA bald Selbstversorger auf dem Gasmarkt werden. Auch die derzeit niedrigen Preise von Erdöl und Erdgas auf dem Weltmarkt werden großenteils auf die gestiegene Förderung von Schieferöl und -gas zurückgeführt.

Weitere Potenziale bietet die Förderung von Erdgas aus Kohleflözen. Hier ergeben sich auch Fördermöglichkeiten in Deutschland, vor allem im nördlichen Nordrhein-Westfalen, die aber noch weiter erkundet werden müssen. Auf lange Sicht könnte auch den Methanhydraten in der Tiefsee eine Bedeutung zukommen. Diese Vorkommen werden als sehr groß eingeschätzt, auch wenn die genauen Mengen und deren Förderkosten noch nicht quantifiziert werden können. Bisher ist die Förderung nicht wirtschaftlich. An Land hingegen, wo die Gashydrate in Permafrostgebieten vorkommen, werden sie bereits gefördert.

Selbst wenn die Förderung aus unkonventionellen Lagerstätten deutlich zunehmen sollte, bleiben Erdgas und Erdöl jedoch knappe Ressourcen. Daher ist auch weiterhin – trotz des aktuellen Preisverfalls – mit hohen beziehungsweise auf lange Sicht noch steigenden Preisen für Erdöl und Erdgas zu rechnen.

Bioenergie

Biomasse deckt derzeit knapp zehn Prozent des weltweiten Primärenergiebedarfs. In vielen Entwicklungsländern ist Biomasse, insbesondere Holz, die Hauptenergiequelle. In Deutschland betrug der Anteil am Primärenergieverbrauch im Jahr 2014 etwa 7,5 Prozent. Davon wurden 50 Prozent im Wärmesektor, 25 Prozent zur Stromerzeugung und 16 Prozent als Kraftstoffe eingesetzt. Etwa zwanzig Prozent der Bioenergie wurden importiert.

Im Vergleich zu Photovoltaik- und Windkraftanlagen, besitzt die Bioenergie eine geringe Flächeneffizienz. Auch die

Treibhausgasbilanz ist ungünstiger, und der Preis pro Tonne eingespartes CO₂ in der Regel höher. Durch ihre Speicherbarkeit und hohe Energiedichte kann die Bioenergie jedoch Funktionen im Energiesystem übernehmen, für die Wind- und Solarenergie weniger geeignet sind. So kann sie in der Stromerzeugung zur Überbrückung längerer Windflauten oder als Regelenergie eingesetzt werden. Zudem kann sie fossile Brennstoffe im Verkehr und vor allem im Lastverkehr (Lastkraftwagen, Lastschiffe) ersetzen.

Die Schätzungen, wie viel Bioenergie aus agrarischer Biomasse im Jahr 2050 weltweit zur Verfügung stehen wird, gehen weit auseinander. Sie reichen von 50 Exajoule pro Jahr (Ist-Zustand) bis 500 Exajoule pro Jahr. Die Unterschiede resultieren unter anderem aus unterschiedlichen Annahmen bezüglich der zu erwartenden Steigerungen der Ernteerträge, der für die Ernährung benötigten Agrarflächen und der nachhaltig verfügbaren Wassermenge.

Auch die Bewertung von Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft und anderer Umweltfolgen haben großen Einfluss auf das Bioenergiepotenzial. Äcker, Wiesen und Weiden müssen, um hohe Biomasse-Erträge zu erzielen, bearbeitet, gedüngt und zum Teil auch bewässert werden. Nur Waldflächen werden in der Regel nicht zusätzlich mineralisch gedüngt. Dies hat Konsequenzen für die Treibhausgasbilanz: Lediglich für nachhaltig bewirtschaftete Wälder ist sie weitgehend neutral. Dagegen erzeugen intensiv genutzte Äcker, Wiesen und Weiden durch die Freisetzung von Kohlendioxid, Methan und Lachgas netto Treibhausgase. Im Jahr 2011 stammten fast acht Prozent der Treibhausgasemissionen in Deutschland aus der Landwirtschaft. Weltweit liegt der Prozentsatz sogar bei etwa zwanzig Prozent. Auch wenn gegenüber der Verwendung von fossilen Energieträgern pro Energieeinheit we-

niger Treibhausgase entweichen, ist agrarische Biomasse als Energiequelle also keineswegs klimaneutral.

Weitere Umweltfolgen, die mit der intensiven Landwirtschaft einhergehen, sind Biodiversitätsverlust, hoher Wasserverbrauch und Gewässerkontaminationen durch überschüssige Nährstoffe. Auch die Bodenqualität kann sich verschlechtern. Trotz dieser Umweltrisiken wird mit einer Vergrößerung der Anbaufläche mit intensiver landwirtschaftlicher Produktion um fünf Prozent zwischen 2005 und 2050 gerechnet.

Global spielen die Qualität der Böden und die Verfügbarkeit von Wasser für die Landwirtschaft bereits eine begrenzende Rolle. In einigen Regionen der Welt geht zurzeit der Boden hundert Mal schneller verloren, als er gebildet wird. Ursachen dafür sind unter anderem Erosion, Versalzung durch Salze aus verdunstetem Bewässerungswasser, Verdichtung aufgrund schwerer Maschinen, Verlust von Bodenkohlenstoff, der zu CO₂ oxidiert wird, und Versiegelung durch Überbauung.

In vielen Regionen ist Bewässerung sehr wichtig für die landwirtschaftliche Produktivität. Derzeit werden etwa siebenzig Prozent der weltweiten Süßwasserentnahmen für die Bewässerung verwendet. In Form von Salzwasser ist Wasser praktisch unbegrenzt verfügbar und kann durch den energieaufwändigen Prozess der Entsalzung in Süßwasser umgewandelt werden. Die Wasserfrage verlagert sich damit auf eine Frage der Energieverfügbarkeit.

Eine signifikante Steigerung der verfügbaren Menge an Bioenergie ist daher unwahrscheinlich. Berücksichtigt man den global steigenden Primärenergieverbrauch, so wird der Anteil der Bioenergie daran von derzeit zehn Prozent also wahrscheinlich eher schrumpfen. Im Vergleich

zu den mineralischen Rohstoffen, deren Jahresproduktion über den Regelkreis der Rohstoffversorgung erhöht werden kann, gibt es bei der Biomasse also sehr viel engere Grenzen.

Demnach setzen Maßnahmen zur Sicherung der Versorgung sinnvollerweise eher bei der Nachfrage an – etwa, indem Biomasse in allen Sektoren möglichst effizient genutzt wird und Bioenergie nur dort eingesetzt wird, wo es dem Gesamtsystem den größten Nutzen bringt.

Der Bedarf an agrarischer Biomasse lässt sich durch effizientere Herstellungsketten von Nahrungsmitteln und durch eine Ernährungsweise mit weniger tierischen Produkten reduzieren. Letztere ist zudem mit einem hohen Flächenverbrauch verbunden. Freiwerdende agrarische Flächen könnten auch zur Erzeugung von Bioenergie genutzt werden. Auch die Nutzung agrarischer Biomasseabfälle bietet nicht unerhebliche Potenziale für die energetische Nutzung.

Düngemittel

Als Düngemittel werden Stickstoffdünger, Phosphat und Kaliumdünger für die Landwirtschaft benötigt. Sie sind nicht substituierbar. Stickstoffdünger kann durch das Haber-Bosch-Verfahren in praktisch unbegrenzter Menge aus Luftstickstoff hergestellt werden. Zukünftige Limitierungen können sich allerdings durch Treibhausgasemissionen, die bei der energieintensiven Herstellung entstehen, und durch Umweltfolgen der Düngung ergeben.

Im Falle von Kalium ist keine Ressourcenknappheit zu befürchten. Neben geologischen Lagerstätten ist Kalium in praktisch unbegrenzter Menge im Meerwasser vorhanden und kann durch Verdunstung gewonnen werden.

Die deutsche Landwirtschaft verbraucht zurzeit ungefähr 650.000 Tonnen Phosphat pro Jahr. Das Verhältnis von Reserven zu Bergwerksproduktion beträgt nach aktuellen Schätzungen etwa 300 Jahre, sodass dieser Frühwarnindikator nicht auf eine drohende Versorgungsknappheit für Phosphat hindeutet. Da es für Phosphor – im Gegensatz zu Stickstoff und Kalium – keine unbegrenzten Vorkommen gibt, kann er in gewisser Weise als kritischer Rohstoff betrachtet werden. Es gibt derzeit Ansätze, die Verfügbarkeit anhand der Geopotenziale international in den Fokus zu nehmen und zu beobachten. Eine Wiedergewinnung von Phosphat aus Klärschlamm ist technisch teilweise möglich, derzeit aber nicht wirtschaftlich. Etwa die Hälfte des Phosphatbedarfs der deutschen Landwirtschaft muss derzeit importiert werden, die andere Hälfte wird durch Gülle abgedeckt.

Fazit

Bisher hat der Weltrohstoffmarkt auf Knappheiten bestimmter Rohstoffe immer so flexibel reagiert, dass Lieferengpässe und Preisspitzen zeitlich begrenzt waren. Dies wird wohl auch zukünftig so bleiben, sodass die Umsetzung der Energiewende aller Voraussicht nach nicht an mangelnder Verfügbarkeit von Rohstoffen scheitern wird. Allerdings können durch die hohe Angebotskonzentration bei zahlreichen für die Energiewende benötigten mineralischen Rohstoffen handelspolitische Konflikte zunehmen.

Um eine zuverlässige Versorgung der Industrie mit den benötigten Rohstoffen zu wettbewerbsfähigen Preisen sicherzustellen, sind gute internationale Handelsbeziehungen sowie Innovationen sowohl im Bergbau als auch beim Recycling notwendig.

Forschung und Entwicklung im Bereich Lagerstätten erkundung, Bergbau und Aufbereitungstechnik können dazu

beitragen, trotz der schwieriger werdenden Lagerstättenverhältnisse die Kosten für Primärrohstoffe in Grenzen zu halten. Ein konsequenter Ausbau der Bereiche Recycling, Materialeffizienz und Substitution vor allem für wirtschaftsstrategische Rohstoffe verringert die Importabhängigkeit, den Energiebedarf und die Umweltauswirkungen der Primärproduktion. Flankiert werden kann der technische Fortschritt durch entsprechende Rahmenbedingungen, wie beispielsweise die Förderung eines freien Welthandels, Vermeidung von Monopolen, zielgerichtete Erschließung von Kooperationen mit rohstoffreichen Ländern, eine konzertierte internationale Rohstoffpolitik und Gesetzgebung zur Unterstützung des Recyclings.

Dabei darf die Beseitigung von Handelshemmnissen aber keineswegs zu Lasten einer umwelt- und sozialverträglichen Rohstoffproduktion gehen. Die Etablierung und Einhaltung höchster Umwelt- und Sozialstandards sind nicht zuletzt eine grundlegende Voraussetzung dafür, die Rohstoffgewinnung gesellschaftlich zu legitimieren. Gleichzeitig lässt sich eine wirklich nachhaltige Energiewende nur dann erreichen, wenn die Abnehmer der Rohstoffe entlang der Wertschöpfungskette bis hin zum Verbraucher darauf drängen, dass solche Standards weltweit eingehalten werden. Die entscheidende Frage ist letztlich nicht, ob es genügend Rohstoffe für die Energiewende gibt, sondern, ob diese langfristig zur Verfügung gestellt werden können, ohne dass die Vorteile der grünen Energie durch Umwelt- und Sozialauswirkungen in der Vorkette erheblich geschmälert werden.

1 Einleitung

Die ärgsten Folgen des anthropogenen Klimawandels werden sich wahrscheinlich nur vermeiden lassen, wenn die Menschheit so schnell wie möglich den Ausstoß von Kohlendioxid verringert und Alternativen zur Verbrennung von Erdgas, Erdöl und Kohle entwickelt. Obwohl heute bereits alternative Technologien zur Verfügung stehen, ist der Weg bis zu einer klimaverträglichen Energieversorgung noch weit: Während die erneuerbaren Energien in Deutschland derzeit rund 13 Prozent des Endenergieverbrauchs decken,¹ beträgt der Anteil der modernen erneuerbaren Energien (ohne Biomasse, die in Entwicklungsländern traditionell zum Kochen und Heizen eingesetzt wird) am weltweiten Verbrauch rund 10 Prozent.² Damit sind Erdöl, Kohle und Erdgas noch immer die wichtigsten Energielieferanten.

Deshalb treiben Deutschland und andere Nationen den Ausbau der erneuerbaren Energien voran. Ein eindrucksvolles Beispiel liefert China. Noch vor wenigen Jahren gab es in dem Land kaum Windenergieanlagen. Inzwischen aber hat sich China zum Spitzenreiter beim Ausbau der Windenergie entwickelt. Ende 2014 waren dort Windkraftanlagen in Betrieb, deren Nennleistung fast so groß ist wie die aller europäischen Anlagen zusammen. Dieses Beispiel verdeutlicht, wie schnell der Ausbau der erneuerbaren Energien an Fahrt gewinnen kann – und welche Dimensionen er in den kommenden Jahren erreichen dürfte. Parallel dazu werden sich voraussichtlich noch weitere

Energiemärkte stark entwickeln – zum Beispiel die Märkte für Elektromobilität oder Speicher für Strom aus Wind und Photovoltaik.

In dem Maße, wie neue Energietechnologien an Bedeutung gewinnen, wird sich auch die Rohstoffnachfrage verändern: Während die Abhängigkeit von Erdöl- und Erdgasimporten zurückgehen wird, werden für den Aufbau der neuen Infrastruktur viele chemische Elemente benötigt, die in der Vergangenheit weniger nachgefragt wurden. Besondere Bedeutung kommt hierbei verschiedenen Metallen zu. So stellt sich heute die Frage, ob oder wie sich der Rohstoffbedarf künftig decken lässt, damit der Ausbau innovativer Energietechnologien im großen Stil gelingen kann.

Gehen die Rohstoffe irgendwann aus?

Anfang der 1970er Jahre drang die Frage nach der Endlichkeit der Rohstoffe ins öffentliche Bewusstsein. Eine wichtige Rolle dabei spielte die Veröffentlichung des Berichts *Die Grenzen des Wachstums* des Club of Rome³. Auch die Ölpreiskrise führte den Menschen in Deutschland und anderen westlichen Industrieländern eindrucksvoll vor Augen, wie abhängig die Volkswirtschaften der Industrienationen vom Rohstoffangebot auf den Weltmärkten sind.

Seitdem ist viel darüber spekuliert worden, inwieweit die Rohstoffversorgung in Zukunft noch sicher ist. Beflügelt

¹ Umweltbundesamt 2015.

² REN21 2015.

³ Meadows et al. 1972.

werden solche Diskussionen von Zeit zu Zeit durch spektakuläre Preisanstiege bei einzelnen Rohstoffen, wie zuletzt den Seltene-Erden-Elementen. Aufgrund von Exportbeschränkungen und Preisspekulationen schnellten ihre Preise 2009 in die Höhe, im Extremfall sogar um den Faktor 100. Die Seltene-Erden-Elemente werden unter anderem für Dauermagnete in Computer-Festplatten oder Windkraftgeneratoren sowie für die Herstellung von Akkumulatoren (Akkus) oder Leuchtdioden (LEDs) benötigt. Ihr Beispiel veranschaulicht, wie neue Energietechnologien in neue Abhängigkeiten führen können, die ebenso problematisch sein können wie die Abhängigkeit von Erdöl.

Versachlichung der Diskussion

Die vorliegende Analyse soll zur Versachlichung der Diskussion um die Rohstoffverfügbarkeit beitragen. Eine wichtige Rolle spielt hierbei der sogenannte Regelkreis der Rohstoffversorgung, der das Wechselspiel aus Nachfrage und Angebot auf den Rohstoffmärkten beschreibt. Erläutert wird auch, welche Kräfte die Rohstofferkundung und die Erschließung neuer Rohstoffvorkommen antreiben.

Darauf aufbauend macht die Analyse deutlich, warum es in den kommenden Jahrzehnten bei den Rohstoffen zumindest in Bezug auf die geologischen Vorräte keine Engpässe geben wird. Geologische Verfügbarkeit heißt aber nicht automatisch Verfügbarkeit am Markt. Vielmehr ist es Aufgabe der Importnationen wie Deutschland, durch geeignete Strategien dafür zu sorgen, dass sie sich künftig auf dem Weltmarkt ausreichend mit Rohstoffen versorgen und einem möglichen Preisdiktat etwas entgegenzusetzen können. In diesem Sinne soll dieser Text eine objektive Analyse der weltweiten Rohstoffsituation liefern.

Im Fokus stehen Rohstoffe, die für die Energieversorgung wichtig sind.

Neben den fossilen Energieträgern (Erdöl, Erdgas und Kohle) und der Biomasse sind dies vor allem die mineralische Rohstoffe (insbesondere Metalle). Von besonderem Interesse für die Diskussion über die metallischen Rohstoffe ist, dass diese nicht im eigentlichen Sinne verbraucht, sondern lediglich in Form von Produkten gebraucht werden. Geologen unterscheiden deshalb zwischen den natürlichen Vorkommen im Erdboden, der Geosphäre, und jenen Rohstoffen, die in heutigen Produkten, in der heutigen Infrastruktur oder generell in dem vom menschlichen Handeln gestalteten Raum gebunden sind, der Technosphäre. Die Analyse geht daher auch der Frage auf den Grund, inwieweit ein optimiertes Recycling dazu beitragen kann, die Rohstoffversorgung zu verbessern.

Gesellschaftliche Legitimation: eine Voraussetzung für die Rohstoffgewinnung

Die geologische Verfügbarkeit und die technisch-wirtschaftliche Machbarkeit sind allerdings nicht die einzigen Bedingungen für die Rohstoffgewinnung. Zusätzlich wird eine „Social License to Operate“ benötigt, das heißt, die Rohstoffgewinnung muss gesellschaftlich gewollt sein oder zumindest geduldet werden. Angesichts der Missstände vergangener Jahrzehnte gibt es jedoch starke Vorbehalte gegen den Bergbau; viele Menschen verbinden damit vor allem die Attribute „dark, dirty, dangerous“. Die Verbesserung von Umwelt- und Sozialstandards dürfte für die rohstoffgewinnende Industrie daher eine große, wenn nicht die größte Zukunftsaufgabe sein – auch um in der Bevölkerung mehr Akzeptanz für den Bergbau zu erreichen. Das gilt besonders für die Rohstoffversorgung in zukünftigen Energiesystemen. Insofern soll diese Analyse auch eine kritische Bestandaufnahme der weltweiten Rohstoffgewinnung liefern.

2 Grundlagen

2.1 Klassische Gliederung der Rohstoffe und Definitionen

Rohstoffe werden in der Regel in erneuerbare und nicht-erneuerbare Rohstoffe unterteilt (Abbildung 2.1). Zu den **erneuerbaren Rohstoffen** zählt insbesondere Biomasse wie zum Beispiel Holz, Cellulose oder Stärke. Weiterhin können dazu die erneuerbaren Energien aus Wind, Sonne und Geothermie (Erdwärme) gezählt werden, die allerdings immaterielle Energiequellen

darstellen. Die **nicht-erneuerbaren Rohstoffe** werden in die zwei großen Untergruppen Energierohstoffe und Nicht-Energierohstoffe unterteilt. Die **Energierohstoffe** umfassen im Wesentlichen die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl, Erdgas und die radioaktiven Elemente Uran, Plutonium und Thorium, die für die Nutzung der Kernenergie relevant sind. Zu den **Nicht-Energierohstoffen** zählen die metallischen und nicht-metallischen Rohstoffe.

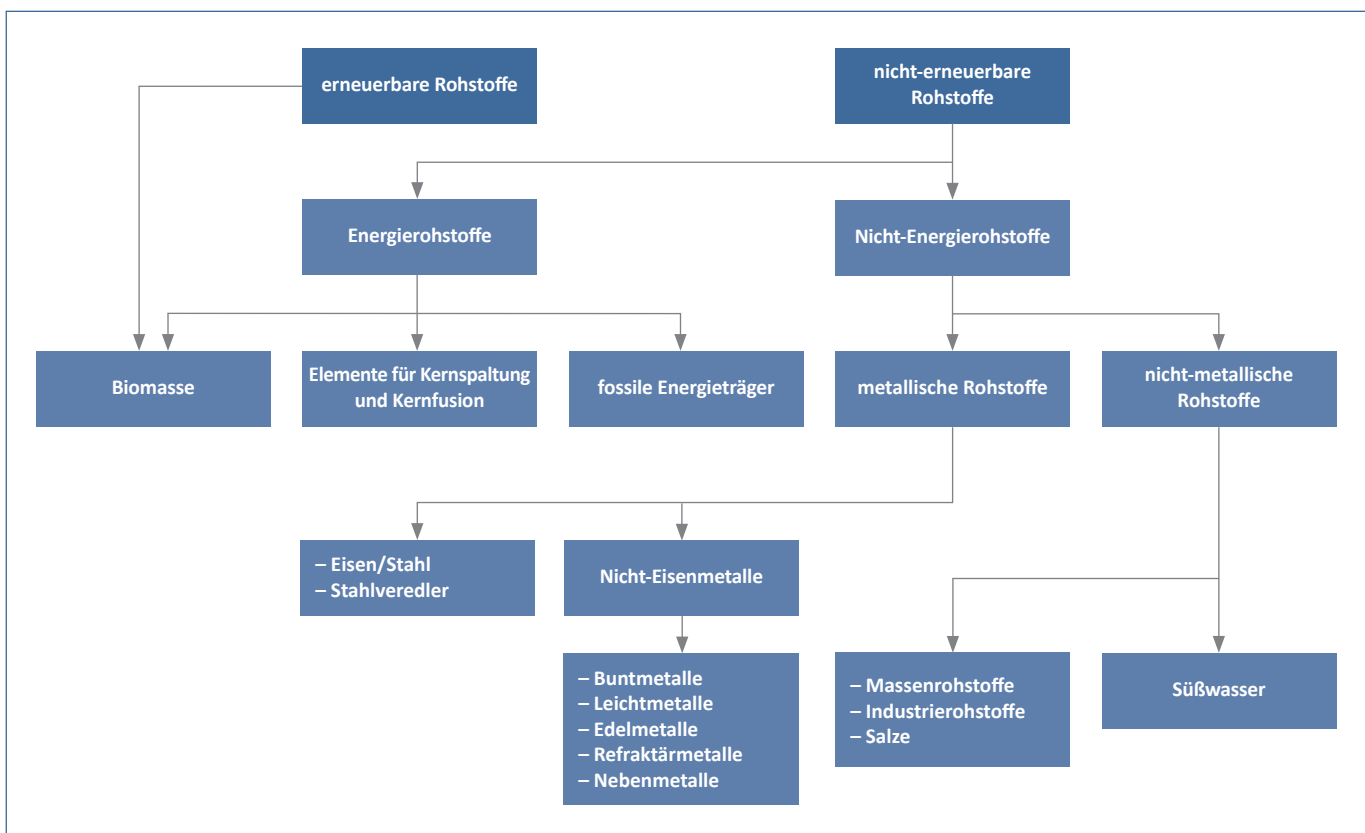


Abbildung 2.1: Untergliederung von Rohstoffen.⁴ Immaterielle erneuerbare Energiequellen wie etwa Wind- und Sonnenenergie oder Erdwärme sind hier nicht berücksichtigt.

⁴ Eigene Darstellung.

Aufgrund ihrer Recyclingfähigkeit werden Metalle nur gebraucht und nicht verbraucht. Daher könnte man sie fast als erneuerbare Rohstoffe werten. Die nicht-metallischen Rohstoffe werden wiederum in drei Gruppen unterteilt. Die erste Gruppe sind die Massenrohstoffe, zu denen die Baurohstoffe (Sand und Kies) und die Ausgangsstoffe für die Zementherstellung (Kalkstein, Ton, Mergel) gehören. Die zweite Gruppe bilden Salze wie zum Beispiel Kalisalze. Die dritte Gruppe sind Industriemineralien wie etwa Phosphat oder Kaolin.

Die Industriemineralien umfassen zudem eine Fülle von Spezialrohstoffen für verschiedene Anwendungsgebiete, in denen häufig sehr spezifische chemische oder mechanische Eigenschaften sowie Rohstoffkombinationen benötigt werden. Zu den nicht-metallischen Rohstoffen zählt auch Wasser. Zu unterscheiden ist zwischen dem begrenzt vorkommenden Süßwasser und dem praktisch unbegrenzt verfügbaren Salzwasser. Auch der Boden gilt als eine besondere Rohstoffform. Er ist als Substrat für das Wachstum der Pflanzen und damit für die Produktion von Biomasse von entscheidender Bedeutung.

Eine besondere Gruppe der Nicht-Energierohstoffe sind jene chemischen Elemente, die unter normalen Umgebungsbedingungen, sogenannten Standardbedingungen⁵, flüssig oder gasförmig sind. Dazu gehören unter anderem die Elemente Quecksilber, Brom oder Helium. Für die Energiesysteme der Zukunft ist insbesondere das Edelgas Helium von Bedeutung. Es wird beispielsweise in großen Mengen bei der

Kühlung technischer Anlagen eingesetzt – in sogenannten Kälteprozessen beziehungsweise kryogenen Systemen⁶ (siehe Kapitel 5.4.2).

Für zukünftige Energiesysteme sind vor allem die **metallischen Rohstoffe** (siehe auch Anhang 1, Abbildung A1.1) von Bedeutung. Daher werden die metallischen Rohstoffe in dieser Analyse besonders ausführlich behandelt. Die Vielfalt der metallischen Rohstoffe ist enorm. Manche Metalle, wie etwa Eisen, werden in großen Mengen produziert. So beläuft sich die weltweite Eisen- beziehungsweise Stahlproduktion auf etwa 1,5 Milliarden Tonnen pro Jahr. Von den Elektronikmetallen, wie zum Beispiel Gallium oder Germanium, werden hingegen jährlich nur wenige hundert Tonnen gewonnen. Generell werden die Metalle anhand folgender Gruppierungen unterschieden:

- Eisen/Stahl und Stahlveredler (zum Beispiel Nickel oder Molybdän)
- Nicht-Eisenmetalle (Bunt- und Leichtmetalle)
 - Buntmetalle (zum Beispiel Kupfer oder Zink)
 - Leichtmetalle (zum Beispiel Lithium, Aluminium und Magnesium)
 - Edelmetalle (Gold, Silber und die Platingruppenelemente beziehungsweise -metalle Platin, Palladium, Ruthenium, Rhodium, Iridium und Osmium)
 - Refraktärmetalle (zum Beispiel Tantal oder Wolfram)
 - Nebenmetalle (zum Beispiel Antimon),
 - die Gruppe der Seltene-Erden-Elemente und die Elektronikmetalle oder Halbleiterelemente (zum Beispiel Indium und Germanium)

Seltene-Erden-Elemente, die Elektronikmetalle und die Halbleiterelemente

⁵ In der Chemie sind Referenzbedingungen definiert, für die die Materialeigenschaften jedes Elements definiert sind: Standardbedingungen sind Raumtemperatur (25° Celsius oder 298,15 Kelvin) und ein Druck von 101,3 Kilopascal. Weiterhin gibt es noch die Normalbedingungen, bei denen die Referenztemperatur dann bei 0° Celsius (273,15 Kelvin) liegt.

⁶ Bradshaw/Hamacher 2013.

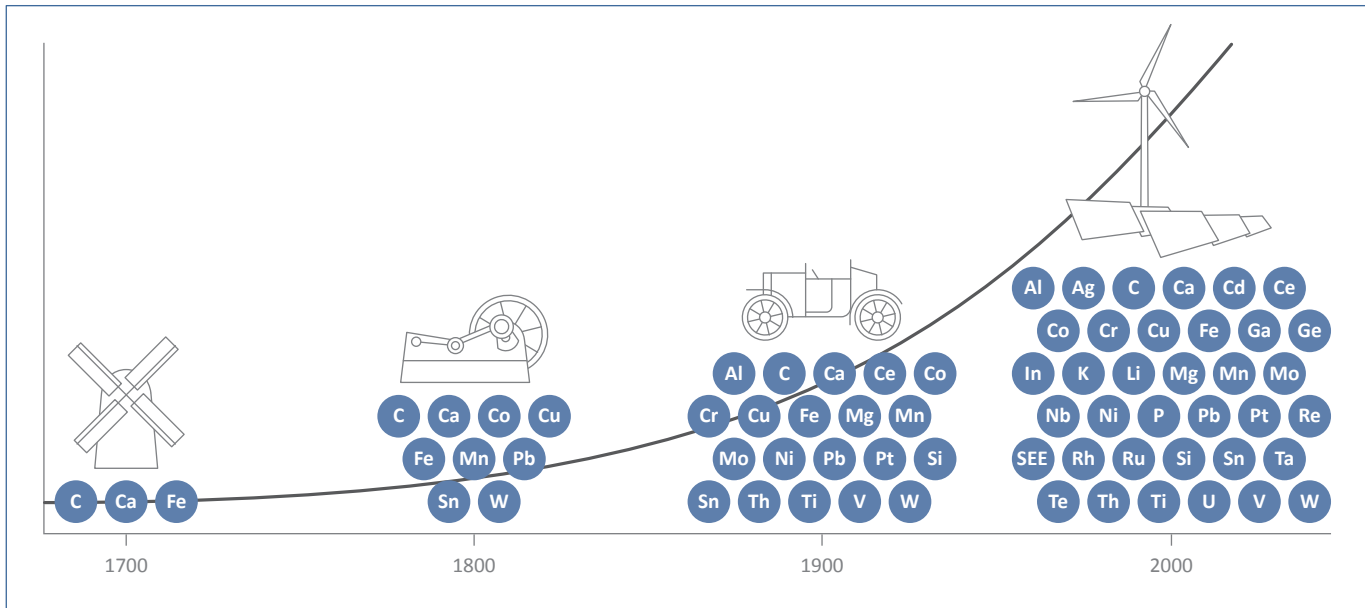


Abbildung 2.2: Zeitliche Entwicklung des technologisch bedingten Elementeinsatzes. Die Zahl der für Energietechnologien wie die Dampfmaschine, den Verbrennungsmotor im Auto oder moderne Solarzellen benötigten chemischen Elemente hat in den vergangenen 300 Jahren deutlich zugenommen. Vor allem seit Beginn der industriellen Revolution steigt der Elementeinsatz quasi exponentiell an.^{7,8}

werden mitunter auch als Sondermetalle bezeichnet. Der Begriff Halbmetalle, der in der Physik und Chemie normalerweise für Silizium, Germanium, Arsen, Selen, Antimon und Tellur verwendet wird, ist in der Rohstoffwirtschaft bisher nicht gebräuchlich.

Die Grenzen zwischen diesen Kategorien sind zum Teil unscharf. Das gilt insbesondere für die Abgrenzung der Nebenmetalle von den anderen Metallkategorien. So ist in der Rohstoffwirtschaft auch von Technologiemetallen die Rede, die beispielsweise die Edelmetalle und Metalle wie Indium, Gallium, Germanium, Antimon, Selen, Silizium und Tellur umfassen.

Abgesehen von den meisten Edelmetallen werden viele dieser Technologiemetalle erst seit wenigen Jahrzehnten in der Industrie eingesetzt (Abbildung 2.2). Und viele der Metalle werden beispielsweise im Vergleich zum Eisen nur in geringen Mengen produziert, gehandelt und

verwendet.⁹ Nichtsdestotrotz haben sie beispielsweise für die Halbleiterproduktion eine große Bedeutung.

2.2 Reserven, Ressourcen und Geopotenziale

Im Zusammenhang mit der Gewinnung von Rohstoffen unterscheiden Experten verschiedene Typen von Rohstoffvorkommen – die Reserven, die Ressourcen und die Geopotenziale. Als **Reserven** werden jene Rohstoffvorkommen bezeichnet, die bereits durch Beprobungen nachgewiesen wurden und mit heutiger Technik wirtschaftlich abbaubar sind. Als **Ressource** wird ein Vorkommen bezeichnet, das zwar bereits bekannt ist, aber mit heutiger Technik oder bei heutigen Preisen nicht wirtschaftlich gewonnen werden kann. Nicht-kostendeckende Preisniveaus, fehlende Infrastruktur, zu geringe Erzgehalte oder technologische Schwierigkeiten bei der Aufbereitung können beispielsweise Ursache für eine Unwirtschaftlichkeit sein. Die meisten der weltweiten Rohstoffvorkommen werden

⁷ Aus Achzet et al. 2011, S. 6.

⁸ Die Elementbezeichnungen können dem Periodensystem entnommen werden.

⁹ Hagelüken 2012.

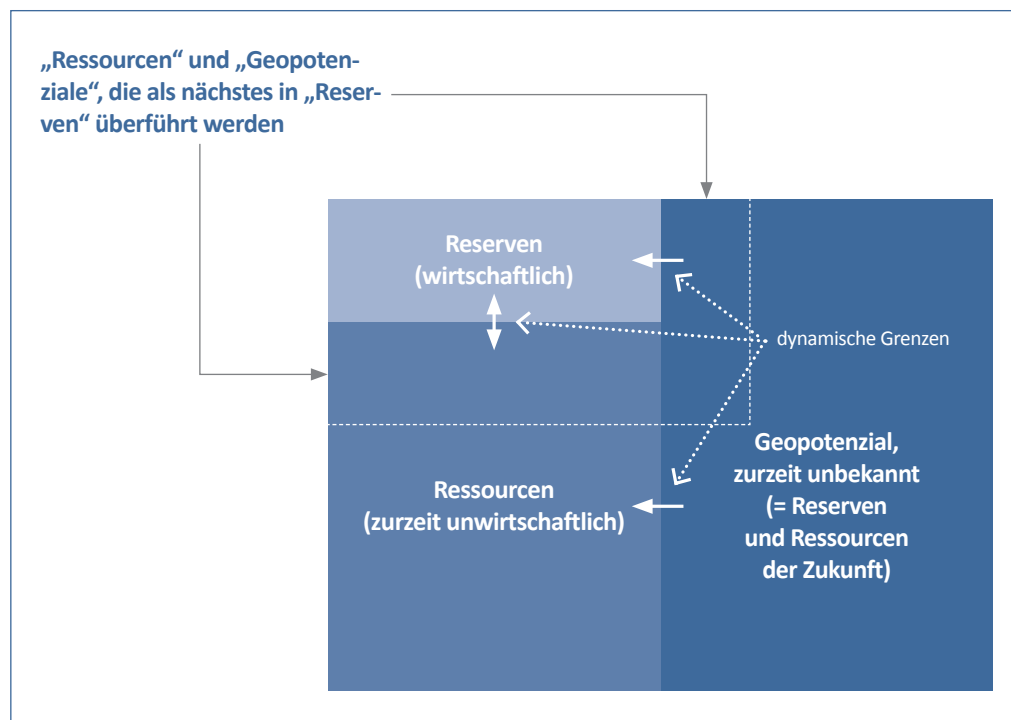


Abbildung 2.3: Rohstoffbox. Die Pfeile zeigen an, dass durch Exploration neue Reserven und Ressourcen entdeckt werden beziehungsweise dass sich in Abhängigkeit der wirtschaftlichen Bedingungen, wie sich verändernder Rohstoffpreise, die Bewertung von Rohstoffvorkommen entweder als Ressource oder als Reserve ändern kann.¹⁰

jedoch im **Geopotenzialfeld** liegen. Hierunter werden Vorkommen zusammengefasst, die heute noch nicht nachgewiesen wurden, durch Explorationsbemühungen aber in Zukunft entdeckt werden können. Oftmals gibt es aufgrund vergleichbarer geologischer Strukturen bereits Vermutungen, welche Gebiete vielversprechend für Rohstoffvorkommen sind, ob diese sozusagen „höflich“ sind (Abbildung 2.3).

Die Grenzen zwischen Reserven, Ressourcen und Geopotenzialen sind fließend. So hängt es nicht zuletzt von den Marktpreisen ab, ob sich der Abbau eines Vorkommens lohnt oder nicht. Heutige Ressourcen oder Geopotenziale können sich morgen durch Preisanstiege, Technologieverbesserungen oder Explorationsintensivierungen in Reserven wandeln. Rohstoffe, die sich zuvor nicht wirtschaftlich gewinnen ließen, lassen sich dann gewinnbringend abbauen. Umgekehrt können Preisverfall oder Kostensteigerungen, die beispielsweise durch

erhöhte Umweltauflagen oder Steuern bedingt sind, aus Reserven wieder Ressourcen werden lassen. Am Beispiel der Grafitgrube Kropfmühl in Bayern wird die Dynamik dieses Wechselspiel deutlich: Im Jahr 2000 war die Grube aus wirtschaftlichen Gründen stillgelegt worden – Reserven wurden zu Ressourcen. 2012 wurde, nach Verbesserung der wirtschaftlichen Bedingungen¹¹, der Betrieb wieder aufgenommen – aus Ressourcen wurden wieder Reserven.

Laufend werden auch heute noch Reserven neu entdeckt. In einem solchen Fall wandelt sich ein Geopotenzial in eine Reserve. Ein Beispiel ist die Erschließung neuer Erdgas- oder Erdölfelder im Meer, deren Zahl bis heute stark gewachsen ist. So stieg der Anteil des im Meer (offshore) gewonnenen Erdöls an der weltweiten Erdölgesamtproduktion von 5 Prozent im Jahr 1950 auf 40 Prozent heute. Zu diesem

¹¹ Ein allgemeiner Anstieg der Grafitpreise und eine erhöhte Nachfrage für den Einsatz in Lithium-Ionen-Batterien führten zu der Verbesserung der wirtschaftlichen Bedingungen (Regiowiki 2015).

¹⁰ Übersetzt und modifiziert nach Scholz et al. 2014.

Wachstum hat insbesondere die Weiterentwicklung der Bohr- und Fördertechnik beigetragen. Heute sind Bohrungen in bis zu 3.000 Metern Wassertiefe möglich – beispielsweise im Golf von Mexiko. 1950 lag die maximale Fördertiefe bei nur etwa 20 Metern. Vorkommen, die im Jahr 1950 im Bereich des Geopotenzials lagen, liegen heute im Bereich der Reserven oder Ressourcen.

Da sich durch wirtschaftliche und technische Entwicklungen kontinuierlich Ressourcen und Geopotenziale in Reserven wandeln, gibt es auch heute noch ausreichende Rohstoffmengen, obwohl der Verbrauch vieler Rohstoffe nach wie vor zunimmt. Die Reserven wachsen mit dem Verbrauch mit, zum Teil wachsen sie sogar stärker als der weltweite Verbrauch. Dieser Effekt wurde früher nicht berücksichtigt – unter anderem auch nicht vom Club of Rome, einer internationalen Nichtregierungsorganisation und Expertenrunde, die 1968 von führenden Industriellen, Ingenieuren, Wirtschaftsexperten und Geistes- und Naturwissenschaftlern gegründet wurde. Der Club of Rome postulierte in seiner Studie *Die Grenzen des Wachstums*, dass Rohstoffknappheit und Umweltverschmutzung zu schweren Krisen und noch vor dem Jahr 2100 zum Rückfall in einfache Lebensverhältnisse führen würden.¹² Auch in der aktuellen Fortschreibung der Studie des Zukunftsforschers Jorgen Randers¹³ bleibt dieser Effekt unberücksichtigt.

Die Ölindustrie liefert ein weiteres Beispiel für das Mitwachsen der Reserven: 1950 betrug die Förderung circa 540 Millionen Tonnen pro Jahr. Die damals bekannten Erdölreserven von 11,3 Milliarden Tonnen hätten bei konstant dieser Förderung also lediglich etwa zwanzig Jahre ausgereicht. Im Jahr 2013 war die Förderung auf 4,2 Milliarden Tonnen pro

Jahr gestiegen und die Reserven betragen 219 Milliarden Tonnen. Obwohl die Fördermenge im Jahr 2013 mehr als siebenmal so hoch war wie 1950, waren die Reserven inzwischen überproportional zum Verbrauch angewachsen. Bezogen auf die Annahme einer konstant bleibenden Fördermenge von 4,2 Milliarden Tonnen pro Jahr reichten sie nun nämlich für mehr als 50 Jahre. Auch bei den Metallen lässt sich dieses Mitwachsen der Reserven anhand des jeweiligen Verhältnisses aus Reserven zu jährlicher Produktion beobachten: Bei Zink liegt es seit 1950 zum Beispiel stetig bei einem Wert zwischen 20 und 25 Jahren, beim Kupfer jeweils um die 40 Jahre, obwohl die Kupferproduktion von 1960 bis 2013 von circa 4 Millionen Tonnen auf etwa 18 Millionen Tonnen gestiegen ist.

2.3 Kritische und wirtschaftsstrategische Rohstoffe

In der Diskussion um die Verfügbarkeit von Rohstoffen sprechen Fachleute häufig von **kritischen** und **wirtschaftsstrategischen Rohstoffen**. Die Bezeichnung „kritisch“ bezieht sich dabei nicht auf die physikalischen oder chemischen Eigenschaften des jeweiligen Rohstoffs oder die Größe der Reserven oder Ressourcen, sondern darauf, inwieweit der Rohstoff verfügbar ist und welche Bedeutung er für die Wirtschaft hat.¹⁴ Manche Rohstoffe werden beispielsweise nur in wenigen Ländern wie etwa China, Chile oder der Demokratischen Republik Kongo abgebaut. Politische Krisen oder Handelshemmnisse können die Versorgung mit den entsprechenden Rohstoffen erschweren, sodass diese auf dem Weltmarkt weniger verfügbar sind. Obwohl die geologischen Reserven eigentlich ausreichend wären, kann sich das Rohstoffangebot also verknappen. Da es keine einheitliche, objektive „Kritikalitätsgrenze“ gibt, ab der ein Rohstoff als kritisch zu bewerten ist, ist eine Bewertung von Fall zu Fall notwendig.

¹² Meadows et al. 1972.

¹³ Randers 2012.

¹⁴ Buchholz et al. 2012-1; Bradshaw et al 2013.

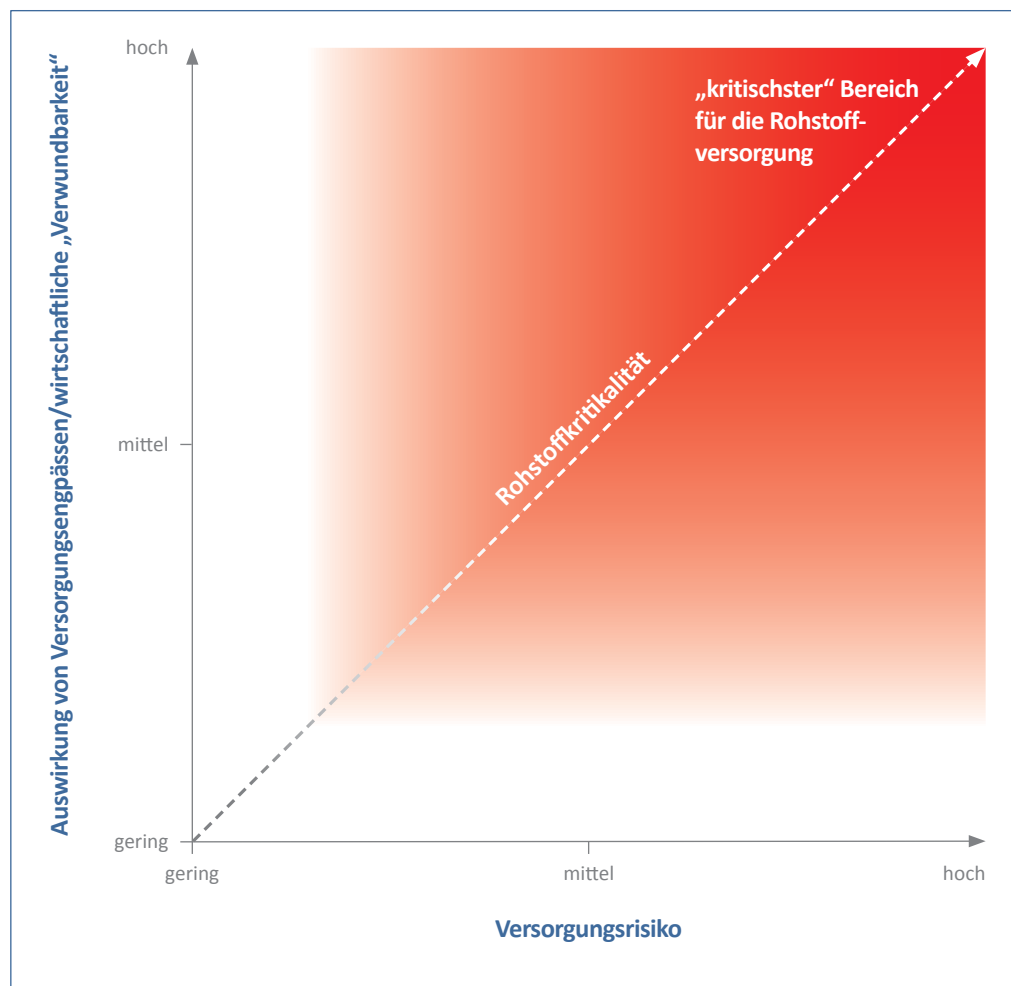


Abbildung 2.4: Kritikalitätsmatrix für Rohstoffe.¹⁵ Die Kritikalität eines Rohstoffs ergibt sich aus dem Spannungsfeld des Versorgungsrisikos, also der Zuverlässigkeit der Angebotsseite, und der wirtschaftlichen Bedeutung, also der Abhängigkeit von dem jeweiligen Rohstoff auf der Nachfrageseite. Der fließende Farbverlauf signalisiert, dass der Übergang zwischen kritisch und nicht-kritisch fließend ist.

Zur Bewertung der Kritikalität¹⁶ von Rohstoffen wird in der Regel mit einer Kritikalitätsmatrix gearbeitet (Abbildung 2.4).¹⁷ Als „kritisch“ werden normalerweise solche Rohstoffe eingestuft, bei denen die Verwundbarkeit der Wirtschaft relativ hoch ist. Das ist bei jenen Rohstoffen der Fall, die sich kaum durch Recycling wiedergewinnen oder durch andere Rohstoffe ersetzen (substituieren) lassen

und die zudem überwiegend aus dem Ausland bezogen werden. In den wohl bisher am umfangreichsten recherchierten Stoffflussanalysen, die an der Yale Universität in den USA durchgeführt werden¹⁸, wird noch mit einer dritten Achse, den Umweltimplikationen¹⁹, gearbeitet. Auch die Europäische Union (EU) arbeitet in

¹⁵ EC 2010; EC 2014.

¹⁶ Im englischsprachigen Raum hat sich in Bezug auf die Rohstoffversorgung die Verwendung des Begriffs „criticality“ durchgesetzt. Er wurde hier daher im Sprachgebrauch auch im Deutschen übernommen. Es ist in diesem Kontext aber anzumerken, dass die Verwendung des Begriffs „Kritikalität“ im Kontext von Rohstoffverfügbarkeiten nichts mit der klassischen Definition in der Physik gemein hat.

¹⁷ EC 2010; EC 2014.

¹⁸ Graedel et al. 2012; Gaedel et al. 2013.

¹⁹ Die Definition dieses Bewertungsfaktors ist in Graedel et al. (2012, S. 1066) angegeben. Produktherstellern, Regierungsbehörden und Nicht-Regierungsorganisationen sollen mit diesem Kriterium die Umweltauswirkungen bei der Verwendung eines Rohstoffes aufgezeigt werden, die sich durch dessen Gewinnungsprozess ergeben. Die Umweltauswirkungen berücksichtigen das Schädigungspotenzial für Umwelt und Menschen. Die Datenbasis stammt vom ecoinvent Centre – Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Hischer/Weidema 2010). Durch die dritte Achse ergibt sich anstatt einer Kritikalitätsmatrix ein Kritikalitätsraum. Für weitere Details siehe Graedel et al. (2012, 2013).

Kritische Rohstoffe der EU-14- und EU-20-Liste		
nur EU-14-Liste	EU-14- und EU-20-Liste	nur EU-20-Liste
Tantal	Antimon	Borat
	Beryllium	Chrom
	Kobalt	Kokskohle
	Fluorit	Magnesit
	Gallium	Phosphatgestein
	Germanium	Siliziummetall
	Indium	
	Magnesium	
	natürliches Grafit	
	Niob	
	Platingruppenelemente	
	schwere Seltene-Erden-Elemente	
	leichte Seltene-Erden-Elemente	
	Wolfram	

Tabelle 2.1: Vergleich der EU-14-kritischen Rohstoffe von 2010 mit denen der EU-20-kritischen Rohstoffe von 2014²⁰

ihren Risikoanalysen mit einem Environmental-Country-Risk-Faktor. Während der an der Yale Universität entwickelte Faktor die Umweltrisiken durch die Rohstoffgewinnung an sich bewertet, ist der Environmental-Country-Risk-Faktor der EU²¹ ein Maß dafür, inwieweit durch eine Verschärfung von Umweltschutzmaßnahmen in den Förderländern die Versorgung der EU mit dem entsprechenden Rohstoff gefährdet werden könnte – ist also letztlich keine Bewertung von Umweltrisiken, sondern von Versorgungsrisiken.

Von besonderer wirtschaftspolitischer Bedeutung für die EU sind jene Rohstoffe, die gemäß zweier Studien der Europäischen Kommission als für die Industrie besonders wichtig eingestuft wurden. Diese Studien wurden in den Jahren 2010 und 2014 durchgeführt und listen 14 beziehungsweise 20 kritische Rohstoffe auf. Entsprechend ist von den „EU-14-kritischen“²² und „EU-20-kritischen“²³

Rohstoffen die Rede (siehe Tabelle 2.1). Einen hohen Anteil haben darin Rohstoffe, bei denen China der wesentliche Lieferant ist (siehe Kapitel 4.3.1, BOX IV).

Der Vergleich der beiden Listen zeigt, dass Studien stets nur eine Momentaufnahme der Rohstoffversorgung darstellen, die stets durch aktuelle Gegebenheiten beeinflusst wird²⁴ und sich jederzeit ändern kann. So umfasste die Liste von 2010 nur 14 Rohstoffe, von denen einer (Tantal) aus der 2014er Liste herausgefallen ist. Dagegen sind sieben andere hinzugekommen. Erstmals tritt Chrom wieder auf, das in den 1970er Jahren fast immer an der Spitze von Kritikalitätsuntersuchungen stand²⁵, dann aber in den Studien, die in der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts durchgeführt wurden, kaum mehr auftrat.

Am Beispiel von Tantal lässt sich die Veränderlichkeit des Versorgungsrisikos besonders gut verdeutlichen: Die Darstellung des Versorgungsrisikos für einen

²⁰ EC 2010; EC 2014.

²¹ EC 2010.

²² EC 2010.

²³ EC 2014.

²⁴ Bujijs et al. 2012.

²⁵ Wellmer/Schmidt 1989.

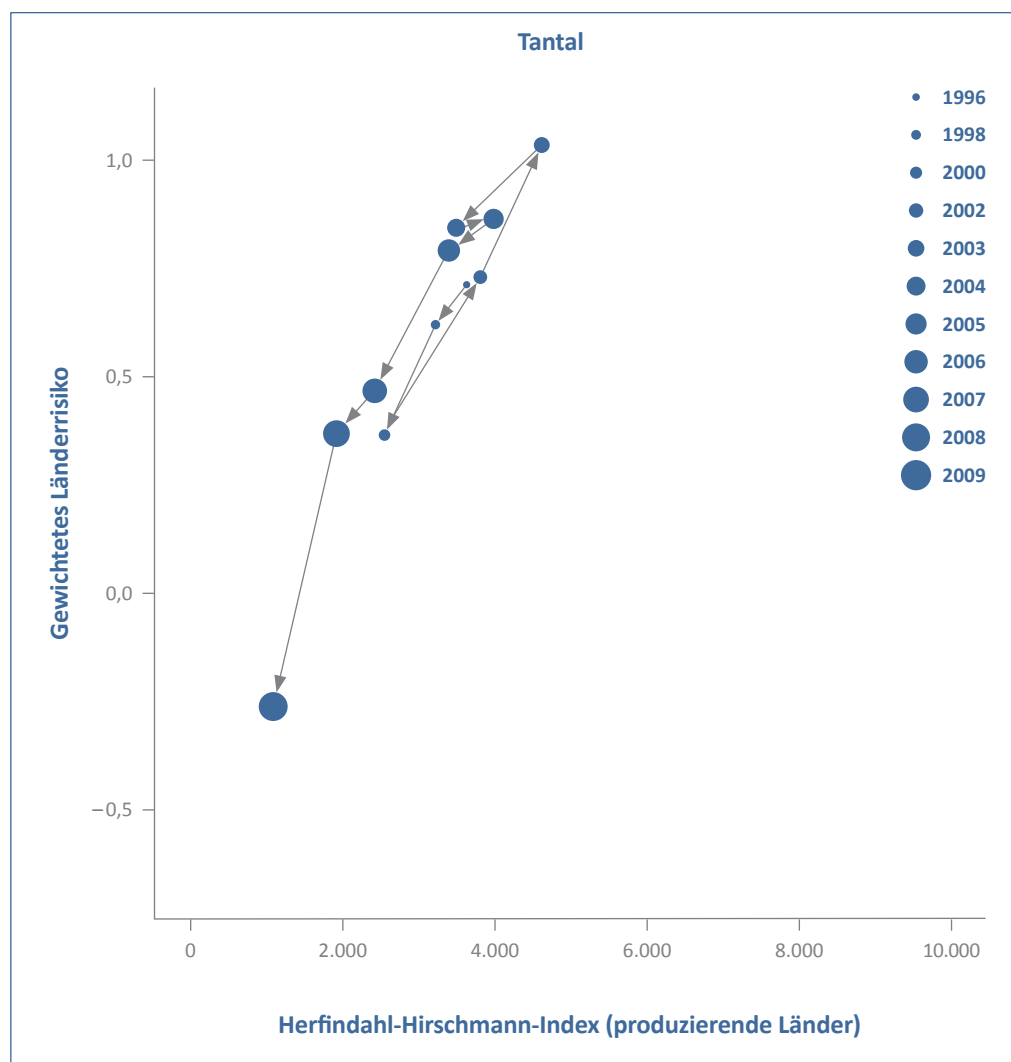


Abbildung 2.5: Veränderungen der Kritikalität in der Rohstoffversorgung am Beispiel des Elements Tantal für den Zeitraum zwischen 1996 und 2009.²⁶ Durch Verschiebungen der relativen Produktionsanteile der Lieferländer, mit der der WGI gewichtet wird, hat das Versorgungsrisiko in der Vergangenheit großen Schwankungen unterlegen und ist zuletzt stark gesunken.

Rohstoff ergibt sich aus einer Matrix, mit der die Angebotssituation für einen Rohstoff analysiert werden kann. Dabei wird auf der Y-Achse das sogenannte Länderisiko, in das die jeweiligen Lieferländer eingestuft sind, aufgetragen. Das Länderisiko leitet sich vom World Governance Index der Weltbank (WGI)²⁷ ab. Generell gilt: Je niedriger der WGI, desto höher das Länderrisiko. Dem wird auf der X-Achse die Angebotskonzentration in Form des Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)²⁸ gegenübergestellt. In Abbildung

2.5 ist die Risikoeinstufung für Tantal für den Zeitraum von 1996 bis 2009 exemplarisch dargestellt. Je kleiner der Markt ist, desto größer sind die Änderungen in kurzer Zeit, die Kritikalitätsstudien stark beeinflussen. Über die Jahre waren die wesentlichen Produzentenländer von Tantal Australien, Brasilien und Kanada mit hohen WG-Indizes und verschiedene afrikanische Länder mit negativen WG-Indizes. Die Veränderung der Produktionsanteile und/oder der Risikobewertung eines Landes bedingt beispielsweise Verschiebungen bei der Bewertung des Versorgungsrisikos.

²⁶ Mit freundlicher Unterstützung von L. A. Tercero Espinoza. Modifiziert nach Sievers et al. 2012, S. 8.

²⁷ Siehe Glossar World Governance Index der Weltbank (WGI).

²⁸ Siehe Glossar Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI).

Doch obwohl derartige Einschätzungen und Listen kritischer Rohstoffe

nur eine Momentaufnahme darstellen, sind sie ein wichtiger Anhaltspunkt, um den Handlungsbedarf zur Sicherung der zukünftigen Rohstoffversorgung richtig einzuschätzen. Die EU-Liste zu kritischen Rohstoffen ist beispielweise wesentliche Grundlage für die Auswahl von förderfähigen Rohstoffen im Rahmen des Explorationsförderprogramms der Bundesregierung.²⁹ Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) definiert für sein neues Forschungsprogramm r4 Wirtschaftsstrategische *Rohstoffe für den Hightech-Standard Deutschland* die Gruppe der „wirtschaftsstrategischen Rohstoffe“ als jene Rohstoffe (siehe auch Kapitel 3.3.2), deren Verfügbarkeit für Zukunftstechnologien gesichert werden muss, da sie für die Herstellung von Spitzenprodukten notwendig sind und bereits in geringen Mengen eine große Hebelwirkung für die Wirtschaft und deren Wertschöpfung haben:³⁰ Stahlveredler, Refraktärrohstoffe, Rohstoffe für die Elektronikbranche und andere Hightech-Rohstoffe, wie die Seltene-Erden-Elemente oder die Gruppe der Platinmetalle.³¹

In einer aktuellen Studie der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) wird erstmals nicht nur das Versorgungsrisiko von Primärrohstoffen, sondern auch das von einzelnen Zwischenprodukten der höheren Wertschöpfungsstufen untersucht.³² Zwischenprodukte bezeichnen dabei Verarbeitungs- beziehungsweise Veredelungsstufen eines Rohstoffes, die über die ersten Gewinnungsstufen, wie dem Erz, der Raffinade oder dem Reinmetall, hinausgehen. Es kann sich dann um Handelsprodukte handeln. Dies ist insofern bedeutend, als deutsche Unternehmen im Bereich der Metalle und Industriemi-

nerale verstärkt Zwischenprodukte und nicht mehr Primärrohstoffe als Ausgangsmaterial in ihren Verarbeitungsprozessen einsetzen. Bislang stehen diesen Unternehmen kaum Informationen zu den Versorgungsrisiken dieser global gehandelten Waren zur Verfügung. Kritikalitätsanalysen sollten sich demnach künftig wie jene der DERA bis in die höheren Wertschöpfungsstufen fortsetzen.

2.4 Verfügbarkeit von Rohstoffen: der Regelkreis der Rohstoffversorgung und Rohstoffstudien

Um sicherzustellen, dass für die Energiesysteme der Zukunft ausreichend Rohstoffe zur Verfügung stehen, muss man heute überprüfen, wie sich deren Verfügbarkeit künftig entwickeln wird. Neben der Notwendigkeit des Vorhandenseins geeigneter Lagerstätten ist dabei auch zu beachten, dass die Gewinnung, Verarbeitung und Nutzung von Rohstoffen stets Auswirkungen auf die Umwelt und das soziale Umfeld hat. Entsprechend spielen zum Beispiel Klimafolgen oder die Beeinträchtigung von Lebensräumen bei der Betrachtung der Verfügbarkeit von Rohstoffen eine zunehmend bedeutende Rolle. In Bezug auf die zukünftige Rohstoffversorgung ist mit der Rohstoffgewinnung im Allgemeinen das Ziel zu verknüpfen, die Einflüsse auf die Umwelt so gering wie möglich zu halten. Gleichzeitig ist die Menge der geogen³³ gewinnbaren Rohstoffe endlich (vergleiche Kapitel 2.2). Das gilt besonders für die fossilen Energierohstoffe. Diese werden nämlich tatsächlich verbraucht, denn die Energie, die mit der Verbrennung frei wird, lässt sich

²⁹ BMWi 2012.

³⁰ BMBF 2012, S. 51.

³¹ Eine Gruppe von Rohstoffen unter dem Aspekt der Technologieoffenheit (keine Einschränkungen aufgrund der Verfügbarkeit von Rohstoffen) als „wirtschaftsstrategisch“ zu bezeichnen, soll den Nachteil einer statischen Liste vermeiden (vergleiche BMBF 2012).

³² Buchholz et al. 2015.

³³ Geogen meint, dass die Rohstoffe natürlicherweise auf der Erde gebildet wurden und vorkommen. Damit werden die hier definierten Rohstoffgruppen der mineralischen Rohstoffe und der fossilen Energierohstoffe umfasst. Sie sind in diesem Kontext von den biologisch gebildeten Rohstoffen, wie der hier betrachteten pflanzlichen Biomasse, zu unterscheiden.

nur einmal nutzen³⁴, während sich nicht-metallische sowie insbesondere metallische Rohstoffe rezyklieren lassen.

Die Verfügbarkeit von Energierohstoffen wird auch durch den **Erntefaktor** (Energy Return of Investment, EROI) bestimmt. Der Erntefaktor beschreibt die Effizienz der Nutzung von Energiequellen und ist definiert als das Verhältnis aus gewonnener Energie zu investierter Energie³⁵. Er ergibt sich aus dem Verhältnis der Verbrennungsenergie des geförderten fossilen Rohstoffs zur Energiemenge, die für die Förderung benötigt wird. Wird bei der Förderung von Energierohstoffen fast so viel Energie verbraucht wie bei deren Verbrennung freigesetzt wird, lohnt sich der Abbau letztlich nicht. Der Wert des Erntefaktors variiert von Lagerstätte zu Lagerstätte.

Die Verfügbarkeit nachwachsender Rohstoffe hängt außerdem davon ab, wie viel pflanzliche Biomasse nachwachsen kann. Außerdem wird die Verfügbarkeit der Biomasse als Energiequelle auch dadurch eingeschränkt, dass Biomasse auch anderen Zwecken dient – der Ernährung des Menschen und der Tiere beispielsweise (siehe Kapitel 4.3).

Der Verbrauch und die Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe unterscheiden sich von dem der fossilen Energierohstoffe und der nachwachsenden Rohstoffe. Mineralische Rohstoffe werden im Bergbau (Primärgewinnung) gewonnen und dann in vielfacher Weise industriell verarbeitet. Sie werden sozusagen aus der Geosphäre in die Technosphäre überführt. Prinzipiell lassen sich

die mineralischen Rohstoffe durch Recycling aus der Technosphäre wiedergewinnen (Sekundärgewinnung).³⁶ Somit stellen sie, insbesondere die Metalle, ein quasi unerschöpfliches Rohstoffpotenzial dar. Da Metalle in der Technosphäre gewissermaßen gebraucht und nicht verbraucht werden, könnte man unter bestimmten Randbedingungen, wie zum Beispiel der Optimierung von Recyclingraten, auch hier fast von erneuerbaren Rohstoffen reden. In dem Maße, wie die Menge der weltweit in der Industrie verarbeiteten Metalle steigt, wird die Wiedergewinnung, also die Rohstoffgewinnung aus Sekundärmaterialien der Technosphäre, zunehmen (siehe Kapitel 3.4.4 und 3.4.5). Was die Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe angeht, muss man also stets die Geosphäre zusammen mit der Technosphäre betrachten.

2.4.1 Der Regelkreis der Rohstoffversorgung

Obwohl es heute grundsätzlich genügend Rohstoffe gibt, um die Nachfrage zu decken, kommt es durch Marktentwicklungen, wie beispielsweise die Durchsetzung neuer Technologien, Phasen starken wirtschaftlichen Wachstums (Wirtschaftszyklen), die eine erhöhte Rohstoffnachfrage nach sich ziehen, oder Spekulationen, immer wieder zu Rohstoffverknappungen und signifikanten Preissteigerungen. In der Regel aber gleichen sich diese Preissteigerungen durch dann einsetzende Marktmechanismen der Angebots- und Nachfrageseite wieder aus. Diese Systematik des Rohstoffmarktes ist in Abbildung 2.6 mit dem von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) definierten Regelkreis der Rohstoffversorgung³⁷ dargestellt. Auf Verknappungen und Preisanstiege reagieren in der Regel sowohl die Ange-

³⁴ Obwohl die Energie erhalten bleibt und zum Beispiel in Umgebungswärme umgewandelt wird, geht ihre Fähigkeit verloren, Arbeit zu verrichten. Experten bezeichnen diese Arbeitsfähigkeit als Exergie.

³⁵ Bei der investierten Energie wird meist der gesamte Lebenszyklus, einschließlich Errichtung und Rückbau der benötigten Anlagen berücksichtigt (kumulierter Energieaufwand).

³⁶ Durch chemische Veränderungen mancher Rohstoffe, wie zum Beispiel Kalk, der zu Zement gebrannt wird, kann es hierbei allerdings Einschränkungen geben. Betroffene Rohstoffe sind aber ausreichend vorhanden und liegen nicht auf dem kritischen Pfad für die Energiewende.

³⁷ Wellmer/Becker-Platen 1999.

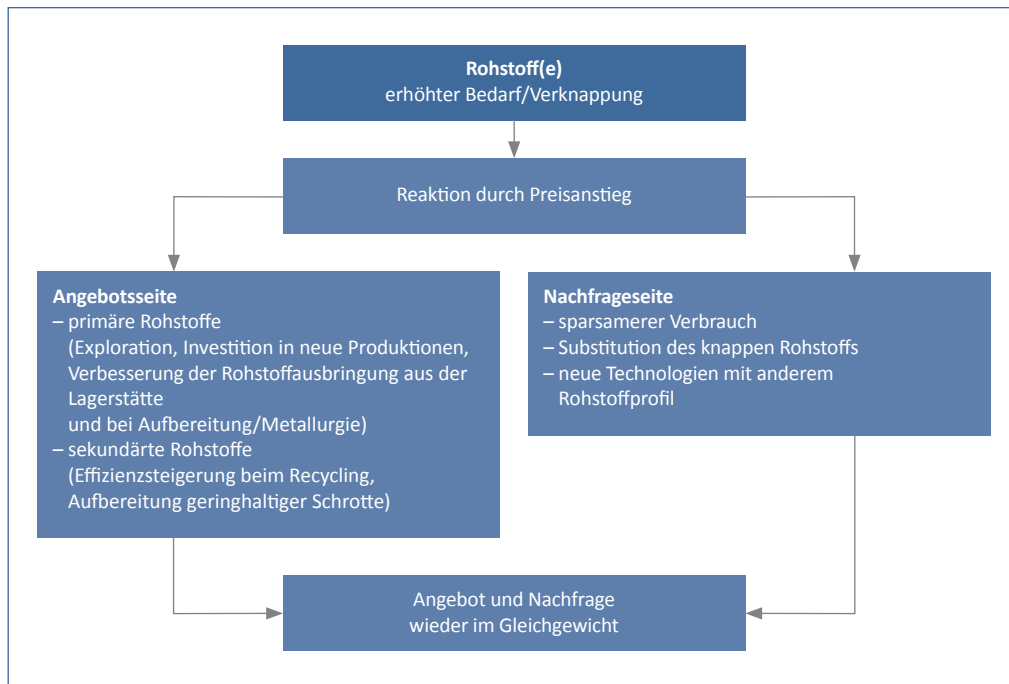


Abbildung: 2.6: Regelkreis der Rohstoffversorgung³⁸

botsseite als auch die Nachfrageseite. So kann auf der Angebotsseite beispielsweise durch Effizienzsteigerungen beim Recycling mehr Rohstoff zurückgewonnen werden. Auf der Nachfrageseite lässt sich die Verknappung etwa durch einen sparsameren Einsatz des Rohstoffs kompensieren.³⁹ Dieses Regelkreis-Prinzip ist in der Studie des Club of Rome⁴⁰ und seiner aktuellen Fortschreibung⁴¹ nur ungenügend berücksichtigt worden.

2.4.2 Studien zur Rohstoffkritikalität

Seit dem starken Anstieg des Rohstoffverbrauches in China mit Beginn des 21. Jahrhunderts und den ebenso starken Anstiegen der Preise am Weltmarkt ist das Rohstoffthema auf die politische Bühne zurückgekehrt. So haben nationale und internationale Gremien in den vergangenen zehn Jahren zahlreiche Untersuchungen zur Versorgung mit potenziell kritischen Rohstoffen durchgeführt, in denen die zukünftige Verfüg-

barkeit von Rohstoffen analysiert und extrapoliert wurde. Betrachtet werden darin unter anderem auch jene Rohstoffe, die für die Energiesysteme der Zukunft von Bedeutung sind. Um die verschiedenen Studien miteinander vergleichen zu können, muss zum einen berücksichtigt werden, wie die Studien im Detail die Kritikalität ermitteln und zum zweiten, wie sich die Reserven zukünftig entwickeln werden.

Inzwischen weiß man, dass sich das Versorgungsrisiko eines Rohstoffs schneller und stärker ändert, wenn ein Markt klein ist. Entsprechend stark ändern sich auch die Randbedingungen der Kritikalitätsstudien. Exemplarisch sind zwei bedeutende, immer wieder zitierte Studien miteinander verglichen worden,⁴² und zwar die Kritikalitätsstudie des US-amerikanischen Nationalen Forschungsrats (National Research Council, NRC)⁴³ und die Studie für die EU-14-kritischen Rohstoffe⁴⁴. Die

³⁸ Übersetzt und modifiziert nach Wellmer/Dalheimer 2012.

³⁹ Wellmer/Hagelüken 2015.

⁴⁰ Meadows et al. 1972.

⁴¹ Randers 2012.

⁴² Erdmann/Graedel 2011.

⁴³ NRC 2008.

⁴⁴ EC 2010.

BOX I: Beibrechende Elemente

Gemäß dem Regelkreis der Rohstoffversorgung werden Rohstoffverknappungen und Preisanstiege ausgeglichen, weil sich der Markt (Angebot und Nachfrage) mit der Zeit selbst reguliert. Dieser Regelkreis der Rohstoffversorgung gilt indes für Rohstoffe, die nicht eigenständig in Lagerstätten vorkommen, sogenannte beibrechende Elementen, nur eingeschränkt. Die Vorkommen beibrechender Elemente sind an einen anderen Hauptwertstoff (Primärrohstoff) gebunden. Die mineralischen Erzphasen von Hauptwertstoff und Beiprodukt können dabei eng miteinander verwachsen sein, oder das beibrechende Element ist fest im Kristallgitter des Primärrohstoffs eingebaut. Eine Trennung der Elemente kann dann oftmals nur unter sehr hohem Energieaufwand möglich sein. Die Gewinnung eines beibrechenden Elements ist somit zwangsläufig an die Gewinnung des Primärrohstoffs gekoppelt. Dieser Zwang gilt allerdings nur für die ersten Prozessschritte der Gewinnung, den Bergbau und die Aufbereitung⁴⁵, die sogenannte primäre Rohstoffgewinnung. Ob die beibrechenden Elemente im anschließenden Hüttenprozess auch wirklich als getrennte Wertstoffe gewonnen werden, hängt von der Wirtschaftlichkeit dieses zusätzlichen Gewinnungsprozesses ab. Viele Hightech-Elemente, wie zum Beispiel Indium, Germanium, Gallium, Tellur oder Selen, sind nur beibrechend gewinnbar.

Dass der Regelkreis der Rohstoffversorgung für die beibrechenden Elemente nur eingeschränkt gilt, hat folgenden Grund: Wenn der Preis für ein beibrechendes Element steigt, ist ein Bergbauproduzent in der Regel kaum gewillt, seine Bergbauproduktion auszuweiten; er wird sich immer nach der Nachfragesituation des Hauptrohstoffs richten. Allenfalls wird ein Hüttenproduzent reagieren, der die Erze metallurgisch auftrennt, und die Gewinnung des beibrechenden Elements ausweiten. Ein Beispiel ist das Germanium. Germanium wird als beibrechendes Element im Zinkbergbau gewonnen. Eine Germaniumpreissteigerung wird kaum zu einer Steigerung der Zinkbergbauproduktion führen. Daher wird bei diesem wirtschaftlichen Zusammenhang des Bergbaus von einer „Preiselastizität“ für beibrechende Rohstoffe gesprochen. Allenfalls ergibt sich für eine Zinkhütte ein Anreiz, mehr Germanium aus Zinkkonzentraten zu gewinnen. Von Vorteil ist allerdings, dass die Vorlaufzeiten (Lead Times) für die Produktion beibrechender Elemente deutlich kürzer sind als bei den Hauptrohstoffen. Bei den Hauptrohstoffen müssen unter Umständen erst neue Vorkommen exploriert (erkundet) werden, um die Rohstoffmenge erhöhen zu können. Bei beibrechenden Elementen hingegen lässt sich die Produktion relativ einfach erhöhen, indem man den Primärrohstoff besser ausnutzt. Ein weiterer Vorteil: Oftmals befinden sich die Anlagen zur Gewinnung der beibrechenden Elemente an den Hüttenstandorten der Hauptrohstoffe. Für die Gewinnung der beibrechenden Elemente müssen also nicht eigens Anlagen auf der „grünen Wiese“ errichtet werden, wofür normalerweise längere Genehmigungsverfahren nötig wären.

Ergebnisse dieses Vergleichs stimmen bei den wesentlichen Elementen gut überein (Abbildung 2.7). Beim Mangan gibt es aber einen großen Unterschied:

Zwar wird die wirtschaftliche Bedeutung von Mangan in beiden Studien sehr hoch eingeschätzt. Das Versorgungsrisiko jedoch schätzt die NRC-Studie als hoch, die EU-Studie dagegen als gering ein. Dabei spielt vermutlich eine unterschiedliche politische Einschätzung des Länderrisikos des großen Produzentenlandes

⁴⁵ Aufbereitungen sind den Bergwerken angeschlossene Anlagen, in denen aus dem Erz durch Zerkleinerung, Mahlung und verschiedene Anreicherungsverfahren ein angereichertes, verkaufsfähiges Produkt erzeugt wird.

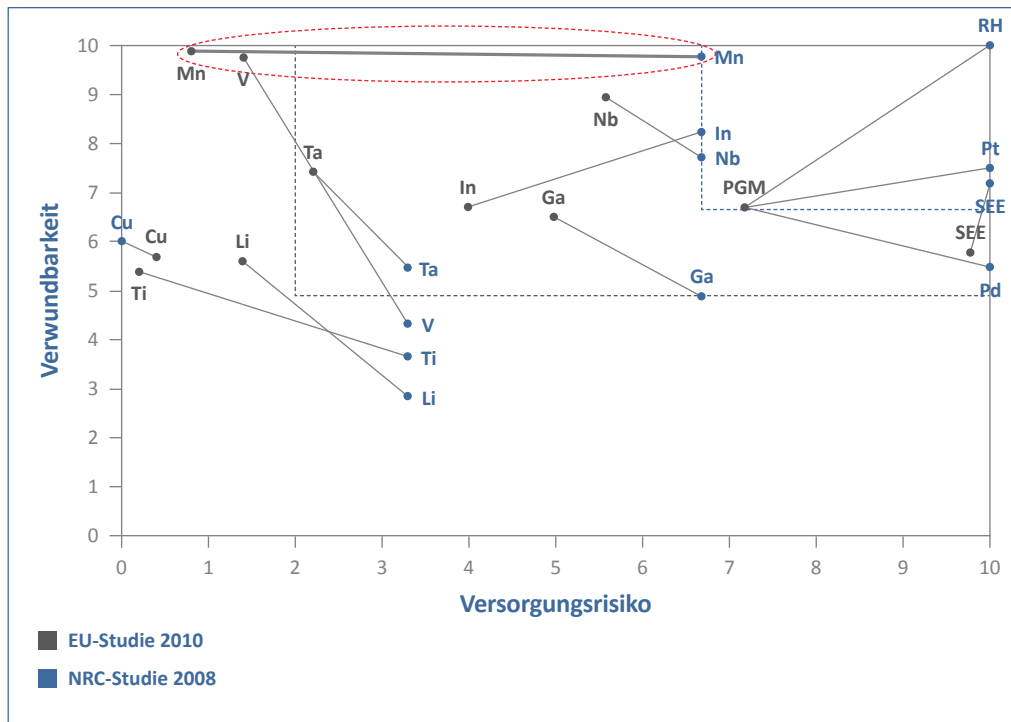


Abbildung 2.7: Vergleich von Kritikalitätseinschätzungen des US-amerikanischen Nationalen Forschungsrats (NRC) von 2008 und der EU-14 von 2010.⁴⁶ Große Unterschiede in der Bewertung des Versorgungsrisikos, wie zum Beispiel bei Mangan (Mn), können sich durch eine unterschiedliche Bewertung der Zuverlässigkeit wichtiger Produzentländer ergeben.

Gabuns eine Rolle, in dem der Manganbergbau von einer französischen Bergbaufirma kontrolliert wird.

Überraschenderweise sind Rohstoffstudien häufig mit dem Vorwurf kritisiert worden, dass sie solche Rohstoffe als kritisch klassifizieren, die real niemals Versorgungsprobleme gemacht haben, wie zum Beispiel Platin.⁴⁷ Das 20. Jahrhundert wurde sogar als das „Massengrab der Prognosen“⁴⁸ bezeichnet. Bei der Kritik wird allerdings verkannt, dass derartige Analysen zum Ziel haben müssen, vor drohenden Engpässen zu warnen. Die Wirtschaft braucht verlässliche Informationen, um Versorgungsschwierigkeiten von vornherein vermeiden zu können – beispielsweise indem ausreichend Rohstoffe gelagert oder technologische Ausweichstrategien vorbereitet werden. Werden die Warnungen von der Wirtschaft ernst

genommen, so kann unter Umständen also verhindert werden, dass die vorhergesagten Versorgungsschwierigkeiten überhaupt erst auftreten. Die Prognose hat in diesem Fall durchaus ihren Zweck erfüllt – auch wenn sie sich gerade dadurch, dass sie erfolgreiche Gegenmaßnahmen ausgelöst hat, am Ende nicht bewahrheitet. Zu optimistische Prognosen, die Probleme verkennen, wären fatal. Wünschenswert ist also eher, dass sich eine zu pessimistische Prognose als falsch erweist oder falsifiziert wird,⁴⁹ als dass sich eine Prognose selbst erfüllt und tatsächlich Versorgungsschwierigkeiten auftreten. Wenn im 20. Jahrhundert viele Prognosen falsch lagen, so kann es zum einen daran gelegen haben, dass politische Szenarien nicht eingetreten sind, und zum anderen, dass die Industrie auf die möglichen Szenarien reagierte. Wenn heute die Seltene-Erden-Elemente in allen Studien als kritisch eingestuft werden, so liegt das auch daran, dass die Industrie

⁴⁶ Übersetzt nach Erdmann/Graedel 2011, S. 7626.

⁴⁷ Buijs et al. 2012.

⁴⁸ Sames et al. 2000.

⁴⁹ Honolka 1976.

frühere Prognosen⁵⁰ nicht ernst genommen hat. Trotz dieser Prognosen setzte die Industrie einseitig auf eine Versorgung aus China, obwohl ähnliche Entwicklungen (Aufbau eines Quasi-Monopols mittels Preisdumping, das zur Verdrängung vieler Konkurrenten führt, nachfolgende Preiserhöhungen durch Erhebung von Exportbeschränkungen) schon vorher – zum Beispiel bei Wolfram oder Flussspat – zu beobachten waren (vergleiche Kapitel 3.4.2, Abbildung 3.17).

⁵⁰ BGR/DIW 1999.

3 Rohstoffversorgung und Einflüsse der Weltwirtschaft

Die Verfügbarkeit von Rohstoffen wird durch die Angebots- und Nachfrageseite beeinflusst. Ferner hängt die Rohstoffversorgung – im Allgemeinen als auch für die Energiesysteme der Zukunft – von den Entwicklungen in der Weltbergbauwirtschaft beziehungsweise der Weltwirtschaft ab. Hierbei haben auch politische Einflüsse eine besondere Bedeutung.

3.1 Primärgewinnung von Rohstoffen und Reichweitenprognose

Bei der Primärgewinnung, also durch Bergbau, werden Rohstoffe auch danach unterschieden, wie oder unter welchen wirtschaftlichen Bedingungen die Elemente gewonnen werden. So differenziert man zwischen

1. Elementen, die (a) aus Erzen in eigenen Lagerstätten gewonnen werden, wie Eisen, Kupfer oder Gold, und (b) Elementen, die beibrechend gewonnen werden, wie Indium oder Germanium (Zinklagerstätten), Tellur (Kupferlagerstätten) oder Rhenium (Kupferlagerstätten, in Verbindung mit dem beibrechend zu gewinnenden Molybdän), und
2. Elementen, die (a) von großen Bergbauunternehmen und (b) solchen, die von mittelgroßen oder kleinen Bergbauunternehmen abgebaut werden.

Große Bergbauunternehmen zeigen mehr und mehr die Tendenz, sich auf sogenannte Tier-One-Projekte zu konzentrieren, das heißt große, langlebige Projekte mit niedrigen Kosten und hohen Geldflüssen

(Cashflows⁵¹). Typische Rohstoffe hierbei sind Kohle, Eisenerz, Kupfer, Nickel, Zink, Gold, Diamanten, Kali und Phosphat.⁵² Bei Refraktärmetallen, wie Tantal und Wolfram, oder den Seltene-Erden-Elementen sind die Umsätze zu gering, um für eine große Bergbaufirma von Interesse zu sein. Es sind oft Nischenmärkte, die von mittelgroßen oder kleinen Bergbauunternehmen kontrolliert werden.

Das hat Konsequenzen für die Exploration: In dem Maße, wie große Firmen Vorräte abbauen, erschließen sie auch neue Vorkommen. Das heißt, dass kontinuierlich eine systematische Exploration stattfindet, auch wenn diese vor allem durch Wirtschaftszyklen und/oder Explorationserfolge getrieben ist. Eine solche systematische Exploration eines Rohstoffs findet auch bei großen Unternehmen statt, die sich auf einen oder zwei Rohstoffe spezialisiert haben, wie zum Beispiel Uran-, Kali- oder Phosphatgesellschaften. Die mittelgroßen und kleinen Bergbauunternehmen sind ebenfalls daran interessiert, ihre Reservenposition zu erhalten. Dabei betreiben sie allerdings weniger eine systematische, langfristig angelegte Exploration. Sie warten vielmehr auf Gelegenheiten, Ansätze für neue Rohstoffvorkommen⁵³ zu übernehmen, die von kleinen Explorationsunternehmen entdeckt werden. Diese

⁵¹ Kapitalfluss innerhalb eines Betriebes. Der Cashflow bezeichnet den Überschuss von Einzahlungen gegenüber den Auszahlungen eines Unternehmens.

⁵² Crowson 2012.

⁵³ Ansätze können auf Basis von Suche und Erkundung (Prospektion) von sehr hoffigen geologischen Formationen (also Gebieten, die basierend auf Erfahrungswerten prinzipiell Rohstoffvorkommen versprechend sind), über Ausbisse mit vielversprechenden Erzgehalten bis zu anexplorierten Vorkommen oder gar Lagerstätten reichen.

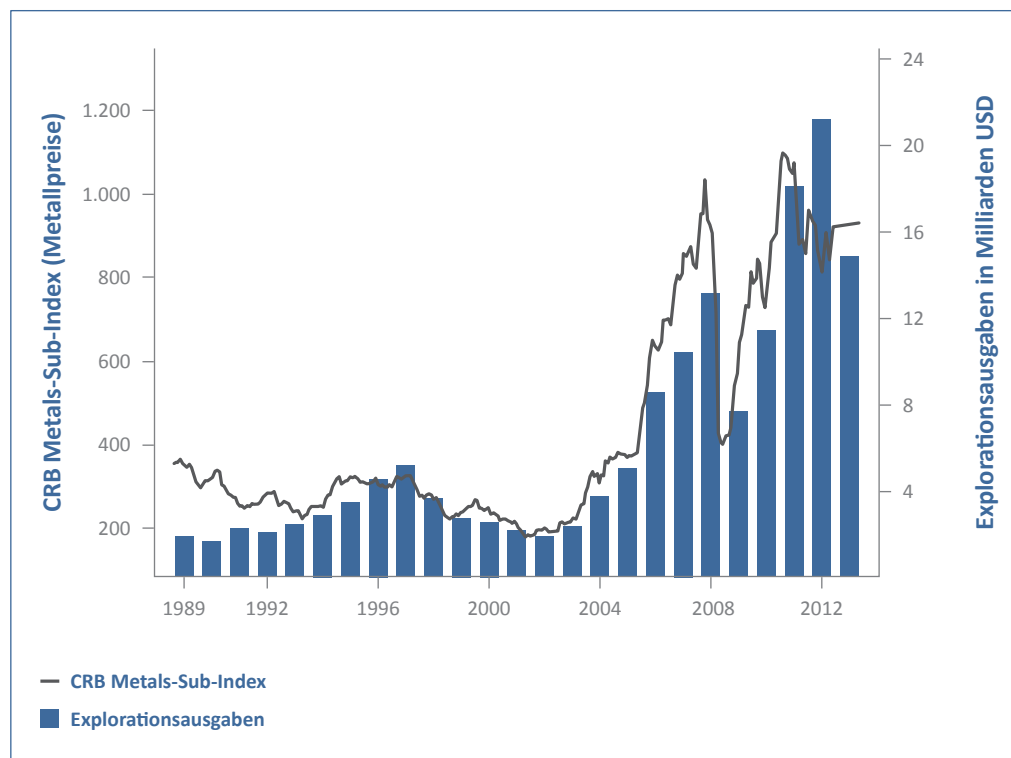


Abbildung 3.1: Entwicklung der Metallpreise und der Explorationsausgaben im Zeitraum von 1989 bis 2013.⁵⁴ Die extremen Ausschläge der wirtschaftlichen Boom- (2003 bis 2007 und nach 2008) und Baisse-Phasen (2008) überprägen den zuvor gemäßigeren Verlauf der Rohstoffzyklen. Sie veranschaulichen auch den Rohstoffhype zu Beginn dieses Jahrhunderts.

kleineren Explorationsfirmen und insbesondere die sogenannten Juniorfirmen, die keinen eigenen Cashflow aufweisen, finanzieren ihre Exploration im Wesentlichen über die Ausgabe von Aktien in Ländern wie Kanada, den USA oder Australien, also ausschließlich durch Fremdkapital und nicht durch den Verkauf eigener Produkte. Sie orientieren sich an Rohstoffen, die „in“ sind. Das sind Rohstoffe, die gerade hohe Preise erzielen (wie in den vergangenen Jahren die Seltene-Erden-Elemente) oder ein besonderes Image bei Börsenanlegern haben, wie zum Beispiel Diamanten. Die Exploration wird also sehr stark von Preisanreizen oder „Moden“ bestimmt. Entsprechend kurz sind die Explorationszyklen. Hier kommt in besonderem Maße der Regelkreis der Rohstoffversorgung mit dem Wechselspiel von Maßnahmen auf Angebots- und Nachfrageseite zum Tragen (siehe Kapitel 2.4).

Abgesehen von den Juniorfirmen bezahlen alle Unternehmen in der Branche Explorationsvorhaben aus ihren Gewinnen. Die Gewinne hängen sehr von den sich verändernden Metallpreisen ab. Die Preisentwicklung ist wiederum an wirtschaftliche Entwicklungszyklen und Explorationserfolge gekoppelt und verhält sich damit ebenfalls zyklisch. Somit stehen auch die Explorationsausgaben in enger Korrelation zu den Preisentwicklungen. In der Regel folgen Sie den Metallpreiszyklen mit einem Phasenverzug von ein oder zwei Jahren (Abbildung 3.1). Zudem ist zu berücksichtigen, dass wie in vielen anderen Forschungsdisziplinen auch, das Wissen um neue Rohstoffvorkommen nicht kontinuierlich wächst. Vielmehr gibt es in unregelmäßigen Abständen Entdeckungen neuer Vorkommen, gewissermaßen einen wissenschaftlichen Durchbruch bei der Exploration. Mit zunehmender Präzisierung der Explorationsbemühungen für ein Vorkommen, steigen auch die Kosten an. Das heißt, dass die Frühphase von Erkundungen

⁵⁴ Aus BGR 2014-2: Daten von CRB 2013 und MEG 2013.

BOX II: Der Quotient aus Reserven und Verbrauch als Frühwarnindikator für die Verfügbarkeit von Rohstoffen

Der Quotient aus Reserven zu Verbrauch, der fälschlicherweise als Kennwert zur Bemessung der „Reichweite“ von Rohstoffen genutzt und oft als die „statische Reichweite“ (dies ist der Quotient aus Reserven zur Bergbauproduktion⁵⁵; Abbildung 3.2 und im Anhang 1 Abbildung A1.2) bezeichnet wird, stellt nicht die absolute „Lebensdauer“ eines Rohstoffes dar, sondern ist immer nur eine Momentaufnahme in einem dynamischen System. Alle Kenngrößen, wie Reserven, Ressourcen, Verbrauch und Produktion, unterliegen einem ständigen Wandel, sodass aktuelle Zahlenwerte nicht die Grundlage für eine Projektion der Entwicklungen in die Zukunft sein können. Der Reserven/Verbrauchs-Quotient eignet sich allerhöchstens als Frühwarnindikator.⁵⁶ Das Unterschreiten eines Zeitraums von 10 bis 15 Jahren wird hierbei in Hinblick auf die Vorlaufzeiten neuer Produktionen als kritischer Wert angesehen (siehe Kapitel 4.1, BOX XIII). Die langzeitige Beobachtung des Quotienten ist bislang die beste Methode, Warnsignale bei der langfristigen Versorgung mit Rohstoffen zu erkennen. Dies ergibt sich als Konsequenz aus der Tatsache, dass es keine Institution auf der Welt gibt, die die Mittel hat, die gesamten Rohstoffvorkommen der Erde zu erkunden. Die publizierten Reserven sind immer nur die Summe aller einzelnen Lagerstätten, die von den Bergwerksgesellschaften und manchmal staatlichen Behörden festgestellt wurden.

Viele Hightech-Elemente und Elemente, die wichtig für zukünftige Energiesysteme sind, kommen nicht in eigenständigen Lagerstätten vor. Für beibrechend vorkommende Rohstoffe eignet sich der Quotient aus Reserven zu Verbrauch allerdings nur bedingt als Frühwarnindikator. Hinsichtlich der Rohstoffverfügbarkeit dieser Rohstoffe kann dieses Verhältnis gar keinen Hinweis geben, da nur der Anteil des Primärrohstoffes, der tatsächlich für die Gewinnung beibrechender Rohstoffe genutzt wird, hierbei als Berechnungsgrundlage herangezogen wird. Dies richtet sich in der Regel nach der Nachfrage des beibrechenden Rohstoffes und lässt weitere, potenziell gewinnbare Mengen außer Acht. Dies führt somit zu einer Unterschätzung der Verfügbarkeit.

Der jeweils errechenbare Quotient Reserven/Produktion ist bei diesen Elementen oft niedrig, da die zugrundeliegende Datenbasis in der Regel schlecht ist. Ursache hierfür ist, dass entsprechend notwendige Daten von den Bergbaubetrieben entweder nicht systematisch erhoben und/oder veröffentlicht werden. Dies sind zum einen Gehalte und Ausbringungsgrade der beibrechenden Rohstoffe aus den jeweiligen Primärrohstoffen. Zum anderen muss das Potenzial von bisher gewonnenen, aber für die Beiproduktion ungenutzten Erzvorkommen erfasst werden. Eine beispielhafte Potenzialabschätzung für Germanium ist kürzlich auf statistischer Basis vorgenommen worden. Sie zeigt, dass für beibrechende Elemente der Weg über das Reserven/Verbrauchs-Verhältnis der Primärrohstoffe eine Möglichkeit bietet, sich genaueren Angaben zu deren tatsächlicher Verfügbarkeit zu nähern. Die lückenhafte Kenntnis von Gehalten beibrechender Rohstoffe im Erz und des Nutzungsgrades, also wie hoch zum Beispiel der Anteil des Germaniums in den weltweit verhütteten Zinkkonzentraten ist, der wirklich genutzt wird, lässt darauf schließen, dass dieser Anteil bei allen Hightech-Rohstoffen zurzeit generell weit unter hundert Prozent liegt.⁵⁷

⁵⁵ Über einen längeren Zeitraum betrachtet sind Verbrauch von Primärrohstoffen und Bergwerksproduktion annähernd identisch. Differenzen treten durch Lagerhaltung auf.

⁵⁶ Dorner et al. 2014.

⁵⁷ Frenzel et. al 2014.

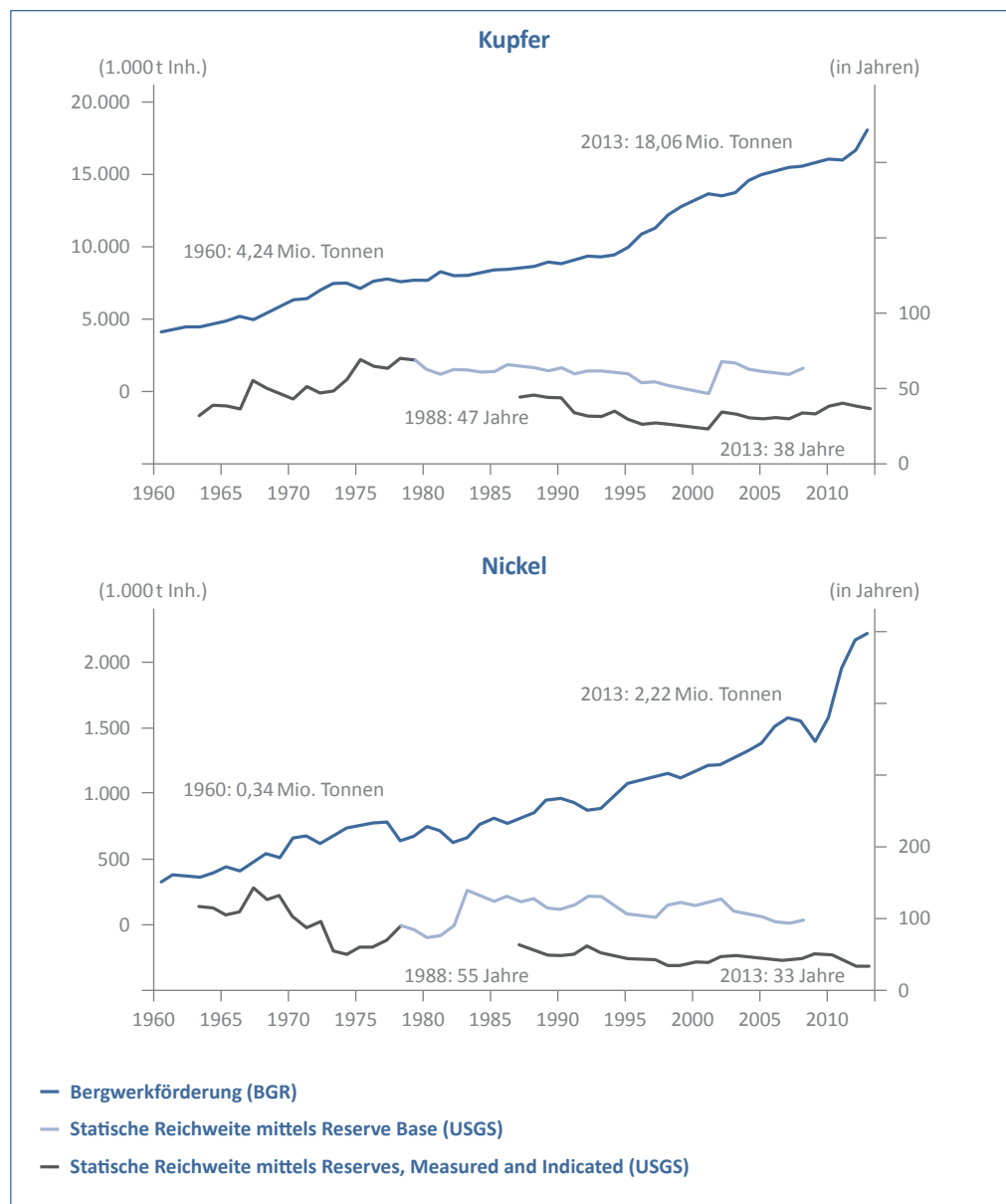


Abbildung 3.2: Die „statischen Reichweiten“ von Kupfer und Nickel auf Basis der jeweiligen Reserven⁵⁸ im Kontrast zur zeitgleichen Bergwerkförderung.⁵⁹ Der abfallende Trend der „Reichweiten“ bei zeitgleich steigenden Förderraten wird durch den jeweiligen starken Nachfrageanstieg mit Beginn des 21. Jahrhunderts verursacht. Der Nachfrageanstieg geht größtenteils auf den wirtschaftlichen Aufschwung Chinas zurück. Die Exploration, die zum Ziel hat, die abgebauten Vorräte zu ersetzen, kann dieser Entwicklung nicht so schnell folgen.

vergleichsweise kostengünstig ist, die Bestimmung der genauen Lagerstättenqualität in der Spätphase beispielweise durch viele Bohrungen und unter Umständen untertägige Explorationsmaßnahmen kostenintensiv ist. Diese zyklischen Effekte müssen berücksichtigt werden, wenn man verstehen will, warum es immer wieder Zeiten gibt, in denen es an neu entdeckten Vorkommen mangelt und deshalb in Studien für bestimmte Rohstoffe Versorgungssengpässe prognostiziert werden.

⁵⁸ Die Reserven basieren unter anderem auf den Angaben, die der US Geological Survey (USGS) in seinen Jahresberichten, den Mineral Commodity Summaries, herausgibt. Hier werden die Reserven nach dem Erkundungsgrad unterschieden. „Measured“ steht dabei für berechnete Reserwendaten, die durch eine hohe Erkundungsdichte und Beprobungszahl in Bezug auf die Ausbreitung von Lagerstätten und deren Gehalten als sehr gesichert anzusehen sind. „Indicated“ sind berechnete Reserven, die im Vergleich zu den „measured“ Reserven auf einem weniger dichten Erkundungsraster beruhen. Die Güte der Datengrundlage ist immer noch ausreichend zur Interpolation der Lagerstättenverhältnisse zwischen den Analysepunkten, allerdings aufgrund einer geringeren Anzahl von Beprobungspunkten insgesamt weniger abgesichert.

⁵⁹ DERA 2014; BGR 2014-1.

Reserven bilden für Bergwerksgesellschaften das Arbeitskapital. Sie benötigen eine entsprechend aktuelle Datengrundlage für ihre Projektplanung, also um ermitteln zu können, wann, in welchem Umfang und zu welchen Kosten eine Lagerstätte abgebaut werden kann. Der anvisierte Zeithorizont ist dabei in der Regel kurz bis mittelfristig (bis etwa fünfzig Jahre). Das bedeutet, dass Vorkommen, die erst in hundert Jahren oder gar noch später abgebaut werden können, zunächst uninteressant sind.

Für die Elemente Zinn und Antimon ergeben sich „statische Reichweiten“ von sieben beziehungsweise elf Jahren. Dies sind Werte, die – bei Berücksichtigung üblicher Vorlaufzeiten für neue Bergbauprojekte von 10 bis 15 Jahren – nahe dem kritischen Bereich liegen.⁶⁰ Antimon gehört wegen der hohen Angebotskonzentration (China), der geringen Substituierbarkeit und der begrenzten Recyclingfähigkeit zu den EU-20-kritischen Rohstoffen. Für die Energiesysteme der Zukunft sind weder Zinn noch Antimon relevant.

Die „Reichweite“ (Reserven/Verbrauchs-Quotient) kann als Maß dafür dienen, den nötigen Innovationsaufwand abzuschätzen. Für Zink oder Kupfer muss kontinuierlich exploriert werden, damit ausreichend Erz gewonnen werden kann, um den Bedarf zu decken und ein Gleichgewicht zwischen Reserven und Produktion zu halten. Für Rohstoffe mit hohen Reichweiten, wie zum Beispiel Phosphat oder Kali, ist der Innovationsaufwand geringer. Das gilt vor allem für Phosphat, da ausreichend Reserven vorhanden sind und die Reichweite aktuell hier fast 300 Jahre⁶¹ beträgt. Der Quotient gibt, wie gesagt, keine Auskunft über die Verfügbarkeit eines Rohstoffes. Er korreliert vielmehr mit den Lagerstättentypen und -größen, in denen

die verschiedenen Rohstoffe typischerweise vorkommen. Niedrige Quotienten, wie für Kupfer oder Zink, sind typisch für Rohstoffe mit linsigen, isolierten Lagerstättenkörpern. Rohstoffe, die in Schichten oder Flözen auftreten, wodurch man Beobachtungen weit extrapolieren kann, wie Bauxit (Aluminiumrohstoff, siehe im Anhang 1 Abbildung A1.2), Phosphat oder Kohle, weisen im langzeitigen Mittel Quotienten mit Werten von oft weit über hundert auf. Dass für Eisen und Bauxit der Reserven/Verbrauchs-Quotient gesunken ist, hängt allein mit den seit 2002 rasant gestiegenen chinesischen Verbräuchen zusammen. Die Exploration kann dem, wie erwähnt, nicht so schnell folgen (Welteisenerzproduktion 2000: 1.010 Millionen Tonnen, 2013: 3.110 Millionen Tonnen; Weltbauxitproduktion 2000: 127 Millionen Tonnen, 2013: 283 Millionen Tonnen).⁶²

3.1.1 Produktionspeak statt „Reichweite“?

Ein anderer Versuch, die Verfügbarkeit von Rohstoffen abzuschätzen, geht über den Produktionspeak, den Moment der maximalen Förderung eines Rohstoffs. So folgt die Produktion eines Rohstoffs für eine räumlich definierte Lagerstättenregion einer charakteristischen Kurve. Nach der Entdeckung eines Rohstoffs steigt die Förderung zunächst exponentiell an, bis der Punkt der maximalen Förderung, der sogenannte Produktionspeak, erreicht ist. Danach fällt sie wieder ab (Abbildung 3.3). Jeder Rohstoffproduktionsverlauf in einem regional abgeschlossenen Gebiet, sei es eine Bergbauregion, ein Land, ein Kontinent oder die Welt, durchläuft eine solche Kurve. Je nach Abbaubedingungen und der Entwicklung des Marktes verläuft diese Kurve für jedes Vorkommen und jeden Rohstoff anders. Nur in seltenen Fällen ist sie mathematisch definierbar und symmetrisch. Diese Kurve ist nach dem US-amerikanischen Geologen Marion King Hubbert benannt, der mit ihrer Hilfe

⁶⁰ Für die wichtigsten Rohstoffe sind die Zeitreihen dieses Frühwarnindikators für den Zeitraum 1988 bis 2012 in Anhang 2 gegeben.

⁶¹ USGS 2015, S. 118ff.

⁶² USGS 2001, S. 28f. und S. 82f.; USGS 2015, S. 26f. und S. 84f.

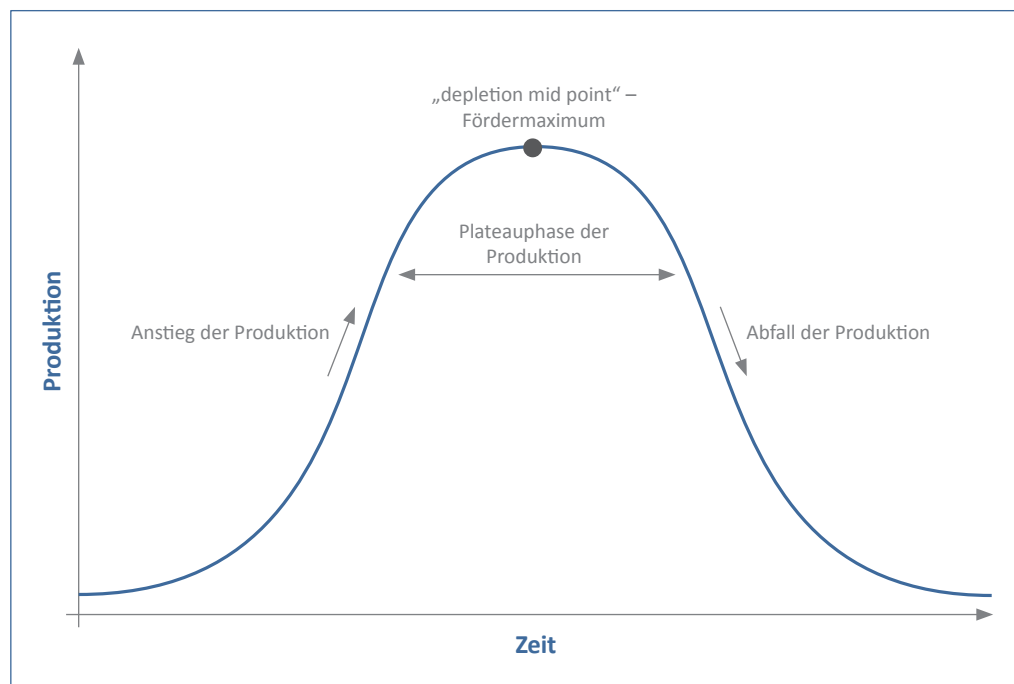


Abbildung 3.3: Die glockenförmige „Hubbert“-Kurve.⁶³ Sie spiegelt den Idealtyp der Produktion eines nicht-erneuerbaren Rohstoffs bezogen auf ein definiertes Gebiet oder Vorkommen wider. Die Fläche unter der Kurve entspricht dem Volumen des vorhandenen Rohstoffs. Im Idealfall, wie hier dargestellt, fällt der Produktionspeak mit der fünfzigprozentigen Rohstofferschöpfung zusammen, dem sogenannten Depletion Mid Point (dmp).

1956 vorhersagte, dass die USA (ohne Alaska) ihr Ölfördermaximum 1971 erreichen würden.⁶⁴ Zu damaliger Zeit waren Hubberts Annahmen fast richtig. Er lag mit seiner Prognose zunächst nur um ein Jahr daneben. Aus heutiger Sicht aber hat Hubbert sich überschätzt. Denn er berücksichtigte nicht die sogenannten unkonventionellen⁶⁵ Ölvorkommen der USA, deren Erschließung heute Stand der Technik ist. Bezieht man die unkonventionellen

Vorkommen in die Ölförderung mit ein, so ist der Ölproduktionspeak (Peak Oil) noch nicht einmal heute erreicht (Abbildung 3.4). Das gilt nicht nur für die USA. Auch weltweit verschiebt sich das Ölfördermaximum durch die Berücksichtigung unkonventioneller Lagerstätten weiter in die Zukunft.

Die Diskussion um einen weltweiten Peak wird auch auf andere Rohstoffe übertragen, insbesondere auf Phosphat, einen essenziellen Pflanzennährstoff, der nicht substituierbar ist und auch nicht wie Stickstoff aus der Luft oder wie Kali aus dem Meerwasser praktisch unbegrenzt gewonnen werden kann. Problematisch ist, dass bei der Bestimmung eines Peaks in der Regel zwei Effekte vermischt werden: So gibt es einen angebotsgetriebenen Peak, welcher bei der Diskussion über Rohstoffverfügbarkeiten einzig relevant ist, und einen nachfragegetriebenen Peak. Das Beispiel der Ölproduktion in den USA ohne Alaska um 1970 ist ein angebotsgetriebener Peak. Der angebotsgetriebene Peak sagt also aus,

⁶³ Schematische Darstellung in Anlehnung an Hubbert (1956).

⁶⁴ Hubbert 1956.

⁶⁵ Der Begriff „unkonventionell“ bezieht sich nicht auf den Rohstoff, sondern auf die Lagerstätte, in der dieser vorkommt. Der Begriff „unkonventionelle Lagerstätten“ bei Kohlenwasserstoffen steht für Vorkommen von Erdöl und Erdgas, in denen diese Rohstoffe, im Gegensatz zu konventionellen Lagerstätten, nicht in gut durchlässigen Gesteinen eingeschlossen sind. Bei unkonventionellen Lagerstätten bedarf es daher meist spezieller Bohrtechniken (Horizontalbohrungen) und hydraulischer Stimulationsmaßnahmen, um das Reservoirgestein um die Bohrung aufzubrechen, sodass das im Gestein gebundene Erdgas oder -öl frei zur Bohrung strömen kann und förderbar wird. Zu diesen Lagerstättentypen zählen heute Vorkommen in Schiefen und Kohleflözen, sogenannten Muttergesteinsformationen. Tight-Gas-Lagerstätten, also Vorkommen in dichten Sandsteinen oder Karbonaten, werden, aufgrund der langen Erfahrungen (seit den 1990er Jahren) mit diesem Lagerstättentypus, mittlerweile als konventionell betrachtet.

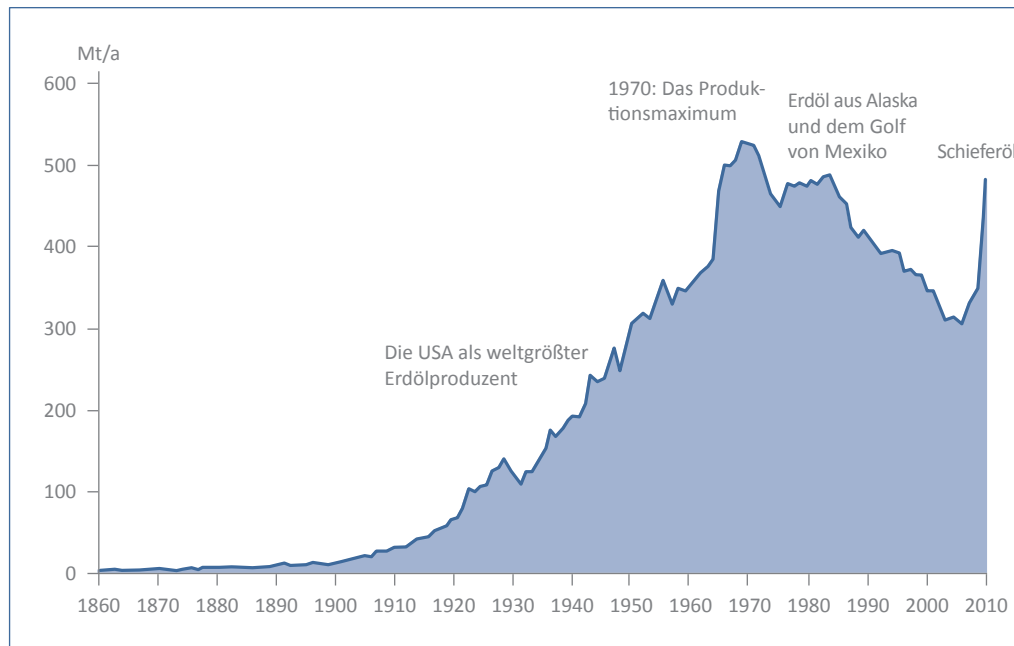


Abbildung 3.4: Die US-amerikanische Ölproduktionskurve (in Millionen Tonnen pro Jahr).⁶⁶ Gut zu sehen ist der von Hubbert um ein Jahr verfehlt Förder-Peak (1970) und die jetzige Entwicklung (Gewinnung von Schieferöl), die zeigt, dass Hubbert sich in seiner Gesamtvorhersage geirrt hat, da er den Aspekt der technologischen Weiterentwicklung bei seiner Prognose nicht berücksichtigt hat.

welche Mengen eines Rohstoffs in Summe verfügbar gemacht werden können. Der nachfragegetriebene Peak kann zur tatsächlichen, physischen Verfügbarkeit eines Rohstoffs kaum eine Aussage liefern. Nachfragegetriebene Peaks können sich nämlich aus verschiedenen Gründen verändern, zum Beispiel durch Umweltschutzgesetzgebungen, die den Einsatz eines Rohstoffes verbieten. Ein Beispiel hierfür ist der Peak Asbest. Obwohl heute noch viel Asbest zur Verfügung steht (Angebotsseite), gibt es praktisch keine Nachfrage mehr, weil Asbest wegen seiner krebserregenden Wirkung kaum noch verwendet wird. Entsprechend sagt der Nachfragepeak Asbest nichts über die tatsächliche Verfügbarkeit des Rohstoffs Asbest aus. Neben den Umweltschutzgesetzgebungen verringern häufig auch Rationalisierungseffekte die Nachfrage nach einem Rohstoff.

Grundsätzlich kann man sagen, dass es nur möglich ist, einen Peak für einen Rohstoff vorherzusagen, wenn man –

zumindest statistisch – eine Aussage über die gesamten Geopotenziale (Abbildung 2.3) des Rohstoffs machen kann. Diese globale Gesamtmenge eines Rohstoffs wird als Ultimate Recoverable Resource (URR) bezeichnet. Allerdings ließ sich bislang für keinen Rohstoff eine URR bestimmen. Lange glaubten Fachleute, dass sich für Erdöl eine URR errechnen ließe, weil die großen Sedimentbecken der Welt, in denen Erdölvorkommen zu finden sind, bekannt und gut erforscht seien. Da heute aber zunehmend auch unkonventionelle Erdöllagerstätten erschlossen werden, wird die Bestimmung einer URR deutlich erschwert.

Letztlich ist die Diskussion um einen Peak Minerals wenig zielführend⁶⁷, weil sich die Menge der Reserven und damit auch der Zeitpunkt eines Produktionspeaks jederzeit verschieben können. Steigen die Rohstoffpreise beziehungsweise die Nachfrage oder werden neue, effizientere und somit kostengünstigere Gewinnungstechnologien entwickelt,

⁶⁶ Modifiziert und aktualisiert nach Wellmer 2014, S. 128.

⁶⁷ Ericsson/Söderholm 2010.

erhöhen sich die Gewinne. Dies kann, wie beschrieben, eine verstärkte Exploration nach sich ziehen, und die sogenannten Bauwürdigkeitsgrenzen⁶⁸ verschieben sich. Ressourcen und Geopotenziale werden in Reserven überführt. Bei Preiserhöhungen oder technologischen Neuentwicklungen steigen also in der Regel die Reserven überproportional, und ein Peak verschiebt sich in die Zukunft. Die jüngsten Entwicklungen, Öl aus Primärlagerstätten durch Fracking zu gewinnen (Schieferöl; siehe Kapitel 3.4.3., BOX VIII), zeigen dies beispielhaft. Umgekehrt können aus Reserven wieder Ressourcen werden, wenn die Preise sinken und sich der Abbau nicht mehr lohnt – beispielsweise weil der Abbau unkonventioneller Vorkommen wie beim Schieferöl mithilfe kostspieliger Bohrtechnik zu teuer wird.

3.1.2 Energie und Wasserbedarf

Nicht allein wirtschaftliche und politische Aspekte beeinflussen die Verfügbarkeit von Rohstoffen. Auch die ausreichende Versorgung der Bergbaustandorte mit Energie und (Süß-)Wasser, das vor allem für die Aufbereitung der Erze benötigt wird, ist von entscheidender Bedeutung. Das kann zu einer Herausforderung werden. So liegen wichtige Grubendistrikte in Wüstengebieten, zum Beispiel die Kupfergruben im Norden Chiles, des größten Kupferproduzentenlandes der Welt. In der Wasserverfügbarkeit sehen daher manche Fachleute⁶⁹ den stärksten limitierenden Faktor für die zukünftige Rohstoffversorgung. Oftmals wird in ariden und semi-ariden Gegenden brackisches oder salziges Wasser in den Gruben benutzt. Große Anstrengungen werden zum Beispiel im

chilenischen Kupferbergbau unternommen, den Einsatz von Süßwasser in der Erzaufbereitung zu reduzieren. Für die im Jahr 2011 geplanten Projekte in Chile waren 46 Prozent entsalztes Wasser und 23 Prozent Salzwasser vorgesehen.⁷⁰

Um Wasser zu entsalzen, sind wiederum große Mengen an Energie nötig, die ebenfalls bereitgestellt werden muss. Da es Salzwasser fast überall gibt, kann die Frage einer ausreichenden Wasserverfügbarkeit für die Rohstoffgewinnung somit auf die Frage einer ausreichenden und nachhaltigen Energiebereitstellung reduziert werden. So ist die Energie für die Rohstoffverfügbarkeit neben sozialen und politischen Aspekten der kritischste Punkt bei der primären Rohstoffgewinnung. Selbst wenn die Energieeinsatzkosten beim Bergbau künftig dadurch sinken sollten, dass vermehrt oder sogar ausschließlich erneuerbare Energien zur Versorgung verwendet werden, wird es stets nennenswerte Gesamtkosten für die Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien geben. Der Grund: Um Anlagen für die Gewinnung erneuerbarer Energien zu bauen, sind für deren Fertigung große Mengen vergleichsweise teurere Rohstoffe, wie Metalle, notwendig. Der spezifische Materialaufwand für erneuerbare Energieanlagen ist zurzeit noch höher als für konventionelle.⁷¹ Wie in Kapitel 3.2 gezeigt, haben sich die realen Preise für fast alle Rohstoffe in den letzten hundert Jahren kaum geändert. Langfristig muss allerdings bei einer vollständigen Internalisierung aller Kosten beispielsweise für entstehende Umweltbelastungen mit Preissteigerungen – auch in realen Werten – gerechnet werden. Zusätzlich wird der Energieaufwand zur Gewinnung der eingesetzten Rohstoffen selbst steigen – also die relative Energievorbelastung für einen Rohstoff. Denn es ist anzunehmen, dass die abgebauten Metallgehalte wohl

68 Bei Metallagerstätten gibt es normalerweise Zonierungen, die sich durch den jeweiligen Rohstoffgehalt und damit hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit einer Gewinnung unterscheiden. Dazwischen muss die Grenze definiert werden, bis zu der es sich lohnt, die Erze abzubauen. Dies ist die Bauwürdigkeitsgrenze. Die niedrigste Bauwürdigkeitsgrenze ist diejenige, bei der gerade noch die Betriebskosten erwirtschaftet werden (zum Beispiel Wellmer et al. 2008). Für die Optimierung der Bauwürdigkeitsgrenze gibt es umfangreiches Schrifttum.

69 McLean et al. 2010.

70 Rosas et al. 2012.

71 Wellmer 2012-2; Vidal et al. 2013; Hertwich et al. 2014.

weiter sinken, Lagerstätten tiefer liegen sowie die Erze komplexer und damit schwieriger aufbereitbar sein werden.

Zwar ist man bei den Metallgehalten noch weit von der Energieschwelle, der sogenannten mineralogischen Barriere entfernt, bei der die Metalle nicht mehr in leicht aufzuschließenden Metallschwefelverbindungen (Sulfiden) vorliegen, sondern fest im Kristallgitter der gesteinsbildenden Minerale (Silikate) eingebaut sind und somit nur mit viel höherem Energieeinsatz gewonnen werden können.⁷² Aber trotzdem stellt sich schon heute die Frage der Energiebilanz, also einer „energetischen Amortisierungsrechnung“.

Auch im Hinblick auf den Klimawandel und die Energiewende ist es von Bedeutung, wie viel Energie bei der Gewinnung von Rohstoffen aufgewendet wird. So stellt sich die Frage, wie gut die CO₂-Bilanz grüner Technologien wie etwa Windradgeneratoren oder Solarzellen ist. Denn diese hängt auch davon ab, wie viel Energie bei der Gewinnung der Rohstoffe aufgewendet werden muss, aus denen die Energieerzeugungsanlagen hergestellt werden. Dadurch könnten die Einsparungen, die man durch die Produktion des „grünen Stroms“ erzielt, deutlich verringert werden (siehe Kapitel 3.4.3).

Die Energiebilanz von Bergbauunternehmen ließe sich künftig noch verbessern, wenn diese ihre Produktion an das schwankende Angebot von Strom aus Sonne und Wind anpassen würden. Denkbar ist, dass Unternehmen, die ihre Energie aus erneuerbaren Energien beziehen, gezielt mit preisgünstiger Energie in Überschusszeiten arbeiten. Für diese Überschussenergie gibt es heute keinen Markt. Mit diesem Strom ließe sich besonders niedrighaltiges Erz aufbereiten, wofür wegen der geringen Metallgehalte ein hoher technischer Aufwand betrieben

werden muss. Schon heute arbeiten viele Tagebaue mit zwei Erzhalde: Highgrade und Lowgrade Stockpiles. Die Letzteren werden bei günstigen, also hohen, Rohstoffpreisen verarbeitet.

Im Bereich fossiler Energieträger werden Energiebilanzen beispielhaft bereits erstellt: Als Beispiel für die deutsche Erdöl- und Erdgasförderung zeigt die Lagerstätte des Gifhorner Troges, auf der Basis der VDI-Richtlinie 4600 über den kumulierten Energieaufwand⁷³ erstellt, dass für die Erdölförderung nur 0,8 Prozent und für die Erdgasförderung nur 0,4 Prozent des exploitierten Energieinhaltes für Erschließung, Gewinnung und Bereitstellung aufgewandt werden musste.⁷⁴ Daraus ergibt sich ein Erntefaktor von circa 100 beim Erdöl beziehungsweise von fast 200 beim Erdgas. Für die Gewinnung der Rohstoffe im Gifhorner Trog muss also verhältnismäßig wenig Energie aufgewendet werden. Eine solche Bilanzierung ist natürlich von vielen Lagerstättenparametern abhängig, wie der Tiefe der Lagerstätte oder der Zuflussrate vom Öl oder Gas zu den Bohrungen, und kann in anderen Lagerstättendistrikten deutlich ungünstiger liegen. So liegen die EROI-Werte in Nordamerika für Erdöl bei 20 bis 40 und für Erdgas bei 15 bis 25.⁷⁵

Auch einige Konzepte zur Gewinnung von Biomasse werfen am anderen Ende des Energieeffizienzspektrums die Frage der Energiebilanz auf (siehe Kapitel 4.3.6): Die Bewässerung von Wüstenflächen mit entsalztem Meerwasser, um schließlich energetisch nutzbare Biomasse zu gewinnen, ist beispielsweise fast ein „Nullsummenspiel“ – die in Summe aufzuwendende Energie für die Entsalzung entspricht etwa fünfzig Prozent der aus der Biomasse zu gewinnenden Energie.

⁷³ VDI 2012: ersetzt die Fassung von 1997.

⁷⁴ Teuber et al. 1999.

⁷⁵ Hall et al. 2009.

⁷² Skinner 1979.

Primärgewinnung von Rohstoffen und Reichweitenprognose

Nicht die geologischen Verfügbarkeiten, sondern mangelnde Marktverfügbarkeiten von Rohstoffen bedingen mögliche Versorgungsrisiken. In wirtschaftlichen Hochphasen kommt es meist zu nachfragegetriebenen Preisanstiegen. Diese rufen – mit Verzögerung – Investitionen im Bergbausektor hervor, durch die längerfristig das Angebot erweitert und an die gestiegene Nachfrage angepasst wird. Die Angebotsanpassung auf Basis von Neuentdeckungen erfolgt jedoch nur sehr langsam: Die Entwicklung eines neuen Bergbauprojektes, also von der Entdeckung des Vorkommens bis zur Produktionsaufnahme, bedingt Vorlaufzeiten von durchschnittlich etwa zehn Jahren. Auch unter Umständen mögliche Kapazitätsausweitungen bestehender Anlagen benötigen eine Vorlaufzeit. Dadurch kommt es zu zeitlich begrenzten Preis- und Lieferrisiken bei der Rohstoffversorgung.

Die Explorationsbemühungen hängen im Allgemeinen von den Gewinnen und Rohstoffpreiserwartungen der Bergbauunternehmen ab. Daher unterliegt der Explorationsumfang wirtschaftlichen Entwicklungszyklen. Auch die Explorationserfolge sind zyklisch und treten nicht unbedingt zeitgleich mit dem größten Explorationsaufwand auf. Um die Explorationseffizienz zu beurteilen, muss daher über einen längeren Zeitraum gemittelt werden.

Das Verhältnis der Reserven zum Verbrauch entspricht nicht – wie oft angenommen – der Lebensdauer der Reserven, sondern ist immer nur eine statistische Momentaufnahme in einem dynamischen System. Der Quotient ist unter anderem von den Lagerstättentypen und -größen abhängig. Er kann als Maß dienen, den notwendigen Explorationsaufwand abzuschätzen. Er kann auch als Warnsignal dienen, wenn der Quotient sich dem Wert zehn nähert, also der typischen Vorlaufzeit für neue Bergbauprojekte. Das ist derzeit bei Antimon und Zinn der Fall, zwei Rohstoffen, die für die Energiesysteme der Zukunft weniger bedeutend sind.

In der Öffentlichkeit wird oft über Rohstoffpeaks spekuliert, also darüber, ob und wann das geologische Angebot eines Rohstoffs sein Maximum erreicht und es zu Verknappungen kommt. Die rohstoff-spezifischen Geopotenziale fast aller Rohstoffe sind jedoch weitgehend als unbekannt anzunehmen, daher sind Rohstoffpeaks nicht vorhersagbar. Hinzu kommt, dass mineralische Rohstoffe, insbesondere Metalle, technisch weitestgehend wiedergewonnen werden können. Diese Rohstoffe werden also nicht ver-, sondern nur gebraucht. Peaks entstehen hier durch geändertes Nachfrageverhalten. Somit ist die Diskussion über Peak Minerals wenig zielführend.

Die Rohstoffgewinnung hängt von der Verfügbarkeit von Wasser und Energie ab. Salzwasser, das quasi überall verfügbar ist, kann durch Energieaufwand entsalzt werden. Somit reduziert sich die Frage der Wasserversorgung überwiegend auf die Frage der Energiebereitstellung. Angesichts des Rohstoffbedarfs für „grüne Technologien“ ist es eine zentrale Herausforderung für die Zukunft, auch die Wasser- und Energieversorgung bei der Rohstoffgewinnung nachhaltig zu gestalten. Eine Umstellung auf erneuerbare Energietechniken ist auch hier notwendig.

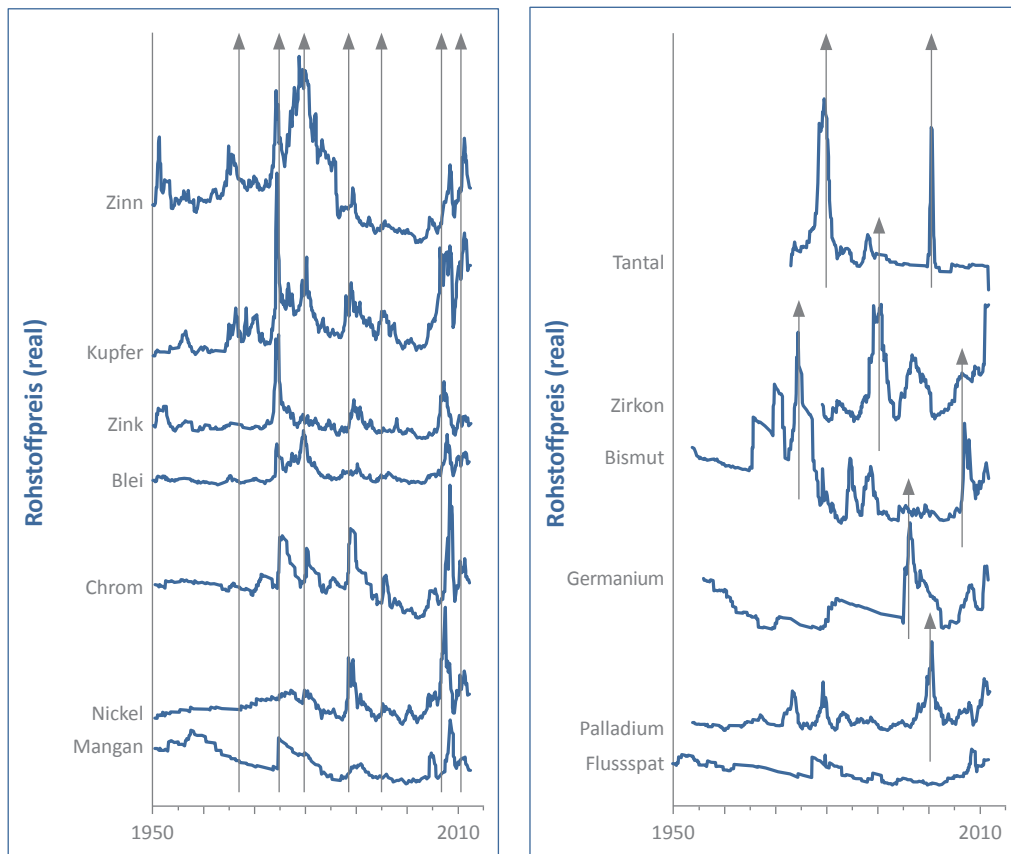


Abbildung 3.5: Preispeaks bei „normalen“ Rohstoffen und Sondermetallen.⁷⁶ Die in realen Preisen dargestellten Preispeaks treten bei „normalen“ Buntmetallen und Stahlveredlern (links) meist zur gleichen Zeit auf, während es bei den Sondermetallen (rechts) eher individuelle Preispeaks gibt. In der Gegenüberstellung lassen sich aber durchaus gesamtwirtschaftliche Entwicklungstendenzen, wie der Preisboom ab 2003 oder die Finanzkrise 2008, erkennen.

3.2 Preisbildungs- und Marktmechanismen

Im Gegensatz zu Fertigprodukten zeichnen sich Rohstoffe dadurch aus, dass sie keine Alleinstellungsmerkmale besitzen. Zwar gibt es etwa beim Erdöl unterschiedliche Qualitäten, doch im Grunde handelt es sich bei einem Rohstoff stets um dasselbe Massenprodukt. Die Rohstoffe werden weltweit auf der Basis von physikalischen und chemischen Merkmalen gehandelt, oft an Warenterminbörsen, wie die Buntmetalle an der London Metal Exchange (LME) oder Rohöl an der International Petroleum Exchange. Das führt dazu, dass es schon durch kleine Unter- oder Überdeckungen irgendwo am Markt zu erheblichen Preisausschlägen kommen

kann. Da Wirtschaftszyklen immer mit Schwankungen in der Rohstoffnachfrage einhergehen, sind die Märkte selten im Gleichgewicht. Meist schwanken sie zwischen Käufer- und Verkäufermärkten.⁷⁷ Diese Marktungleichgewichte werden noch durch die großen Produktionskapazitäten akzentuiert, die auf Nachfrageschwankungen nur träge reagieren. Die Wirtschaftszyklen betreffen alle normalen Rohstoffe wie etwa die Buntmetalle oder Stahlveredler gleichermaßen. So ist es nicht verwunderlich, dass Preispeaks bei den „normalen“ Rohstoffen in etwa gleichzeitig auftreten (Abbildung 3.5 links).⁷⁸

⁷⁷ Käufermarkt ist ein Markt, in dem der Käufer den Markt bestimmt, also ein Überschuss herrscht und der Käufer also die Preise drücken kann; Verkäufermarkt ist das Gegenteil.

⁷⁸ Bräuninger et al. 2013.

⁷⁶ Buchholz 2013-1, auf Basis Bräuninger et al. 2013.

Demgegenüber ist das Preisverhalten bei Sondermetallen, wie Tantal, Bismut, Germanium oder Palladium, mehr durch rohstoffspezifische Ereignisse bestimmt. Dazu gehört beispielsweise eine Veränderung der Nachfrage, weil plötzlich neue technische Verfahren oder neue Produkte im Markt sind, für deren Herstellung ganz bestimmte, einzelne Metalle benötigt werden. Daher ist beim Preisverhalten dieser Metalle keine Gleichzeitigkeit zu erkennen (Abbildung 3.5 rechts). Starke Preisausschläge treten in diesen kleinen Marktsegmenten vergleichsweise öfter auf.

Die Marktentwicklung kann durch die Nachfrage einzelner Marktakteure sogar dominiert werden. So war in letzter Zeit der vergleichsweise langanhaltende Nachfrageschub aus China ein bestimmender Faktor. Bisherige Hochpreiszyklen hatten in der Regel eine Frequenz von etwa vier bis sechs Jahren. Der 2013 zu Ende gegangene Preisboom begann etwa 2003 und wurde durch die Finanzkrise 2008 kurzfristig unterbrochen. Man bezeichnet diesen ungewöhnlich langen Rohstoffboom daher auch als Superzyklus.

Die nominalen Metallpreise, insbesondere die der Börsenmetalle, steigen langfristig an. Betrachtet man aber die realen, um Inflationseffekte bereinigten Preise⁷⁹, fallen diese mit der Zeit (Abbildung 3.6). Wirtschaftliche und politische Ereignisse durchbrechen diesen abfallenden Trendverlauf jedoch immer wieder nach oben. Dann kommt es, wie beispielsweise durch die Ölkrisen in den 1970er Jahren oder zuletzt durch den von China ab dem Jahr 2003 ausgelösten Rohstoffboom, zum Teil zu sehr starken Anstiegen der re-

alen Preise. Langfristig gesehen, also von 1950 bis heute, blieben die realen Preise dadurch insgesamt in etwa auf einem konstanten Niveau (Abbildung 3.6).

Die Entwicklung der Rohstoffpreise in den vergangenen hundert Jahren mag überraschen: Während des Ersten Weltkriegs stiegen die Rohstoffpreise zunächst stark an. Die enormen Rüstungsanstrengungen trieben die Nachfrage nach oben. Mit dem Kriegsende ging die industrielle Produktion zurück und die Nachfrage nahm schlagartig wieder ab. Zudem folgten bald darauf verschiedene Wirtschaftskrisen und eine starke Rezession im Bergbausektor, sodass die Rohstoffpreise der Metalle verfielen. Diese Situation und eine starke Rationalisierung in der Rohstoffgewinnung durch die Einführung modernerer technischer Verfahren, wie zum Beispiel der Einsatz leistungsfähigerer Tagebauausrüstungen (Bagger, LKWs), führten in den Jahren danach zu einer totalen Umstrukturierung des Bergbaus. Dadurch wurde ein Preisniveau erreicht, das bis heute annähernd gleich geblieben ist. Obwohl viele Menschen genau das Gegenteil empfinden, haben sich die realen Preise fast aller Rohstoffe seit Ende des Ersten Weltkriegs kaum erhöht. Zwischenzeitlich kam es lediglich zu inflationsbedingten Preisanstiegen. Dies verdeutlicht beispielsweise die Preisentwicklung der Nicht-Eisenmetalle (Abbildung 3.6 und 3.7). Bislang gibt es keine Anzeichen dafür, dass sich diese Situation mittelfristig für die meisten Rohstoffe ändern wird. Voraussetzung für ein gleichbleibendes Preisniveau ist aber, dass der Bergbau durch technische Entwicklungen auch weiterhin Effizienzsteigerungen erfährt. Allerdings sind fortlaufende Effizienzsteigerungen nicht unabhängig von der Einhaltung von Umwelt- und Sozialstandards zu sehen. Diese Aspekte bilden eine wichtige Säule, um auch in der Gesellschaft die Akzeptanz für die Rohstoffgewinnung und -verarbeitung dauerhaft zu erhalten (siehe Kapitel 3.4.2). Langfristig kann eine vollständige Internalisierung aller Kosten

⁷⁹ Bei Rohstoffen ist zwischen den nominellen und den realen Preisen zu unterscheiden. Nominelle Preise sind die, die sich tagesaktuell am Markt (oft Börsen) bilden. Bei realen Preisen wird – von einem beliebigen Zeitpunkt an, dem sogenannten Basisjahr – die Inflation über Inflationsindizes herausgerechnet. Im Basisjahr sind nomineller und realer Preis identisch. Betrachtungen von realen Preisen sind wichtig für Zeitreihen, um Trends zu erkennen.

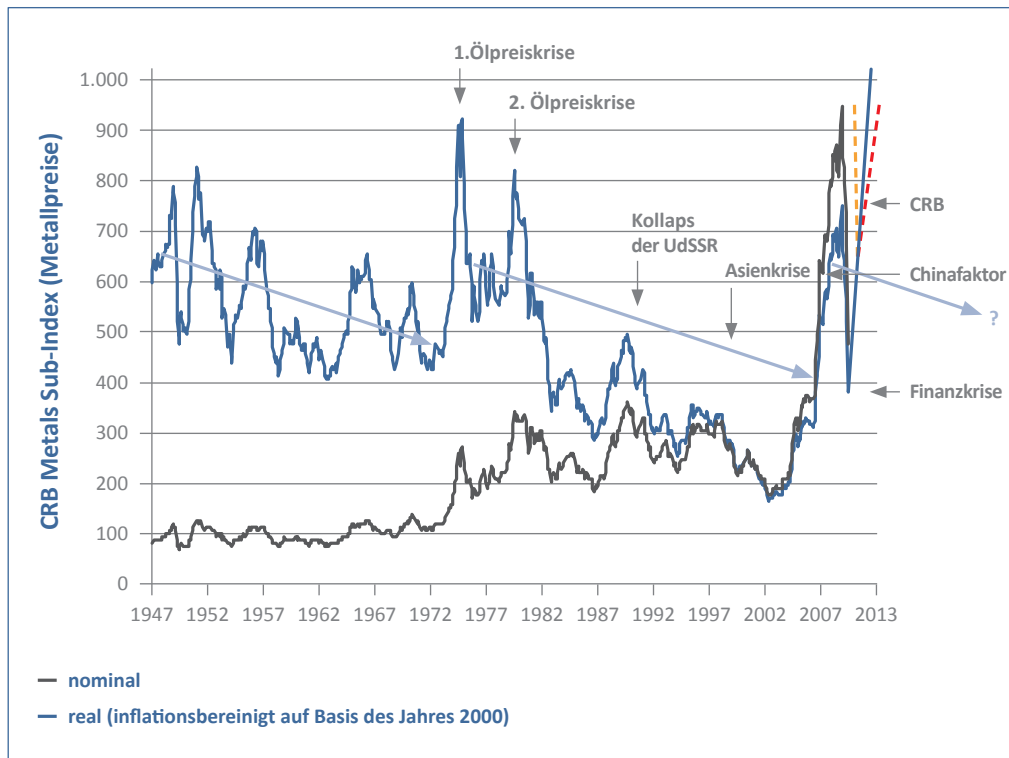


Abbildung 3.6: Entwicklung der nominalen und realen Metallpreise auf Basis des CRB Metals Sub-Index nach dem Zweiten Weltkrieg.⁸⁰ Der generell fallende Trend der realen Rohstoffpreise (blaue Pfeile) wird von Zeit zu Zeit durch wirtschaftliche und politische Ereignisse unterbrochen, die zu starken Preisanstiegen führen. Langfristig ergibt sich hinsichtlich der realen Preise seit dem Zweiten Weltkrieg dadurch ein quasi stagnierendes Preisniveau.

für Umweltbelastungen und -eingriffe preisteigernden Einfluss haben.⁸¹

Zurzeit nimmt die Schwankung der Rohstoffpreise zu, die sogenannte Preisvolatilität, die anhand der Standardabweichungen der monatlichen oder jährlichen Schwankungen gemessen wird. Von vielen Fachleuten wird dieser Effekt auf Börsenspekulationen zurückgeführt, insbesondere durch Exchange Traded Funds (ETF).⁸² Die normalen Händler an den Warenterminbörsen

kaufen und verkaufen Metalle auf Termin, ohne diese je physisch zu besitzen. Der Börsenumsatz beträgt vor allem dadurch oftmals das Zwanzig- bis Sechzigfache des physisch gehandelten Metalls. ETFs kaufen tatsächlich physisch Rohstoffe, halten und verkaufen sie auch wieder. Man muss allerdings bedenken, dass die Volatilität über die Zeit selbst Zyklen aufweist.

Diese Preissignale sind in einer Marktwirtschaft essenziell. Sie liefern Anreize, die dazu führen, dass die Industrie für eine sichere Rohstoffversorgung sorgt. Der in Kapitel 2.4 beschriebene Regelkreis der Rohstoffversorgung spielt dabei eine besondere Rolle.⁸³ Auslöser sind oft Preispeaks, die besonders häufig bei Sondermetallen, wie zum Beispiel den elektronischen Metallen, auftreten. Da die Produktzyklen immer kürzer werden und schnell neue

⁸⁰ Buchholz 2013-2.

⁸¹ Bleischwitz 2010.

⁸² Exchange Traded Funds sind Investmentfonds, die an der Börse gehandelt werden. Man unterscheidet passiv verwaltete und aktiv verwaltete ETFs. Passiv verwaltete Fonds bilden einen Index ab, wie zum Beispiel den deutschen Börsenindex DAX. Aktiv verwaltete ETFs investieren auf Basis eigener Meinungsbildung in Aktien oder auch in Rohstoffe, das heißt, sie kaufen, halten und verkaufen Rohstoffe. Derartige ETFs kaufen, halten und verkaufen nicht nur Kontrakte auf in der Zukunft zu lieferndes Metall, sondern auch Metalle (beziehungsweise Anrechte auf physisches Metall) selbst. Dadurch agieren sie praktisch sowohl als Abnehmer als auch als Lieferanten auf den Rohstoffmärkten.

⁸³ Wellmer/Dalheimer 2012.

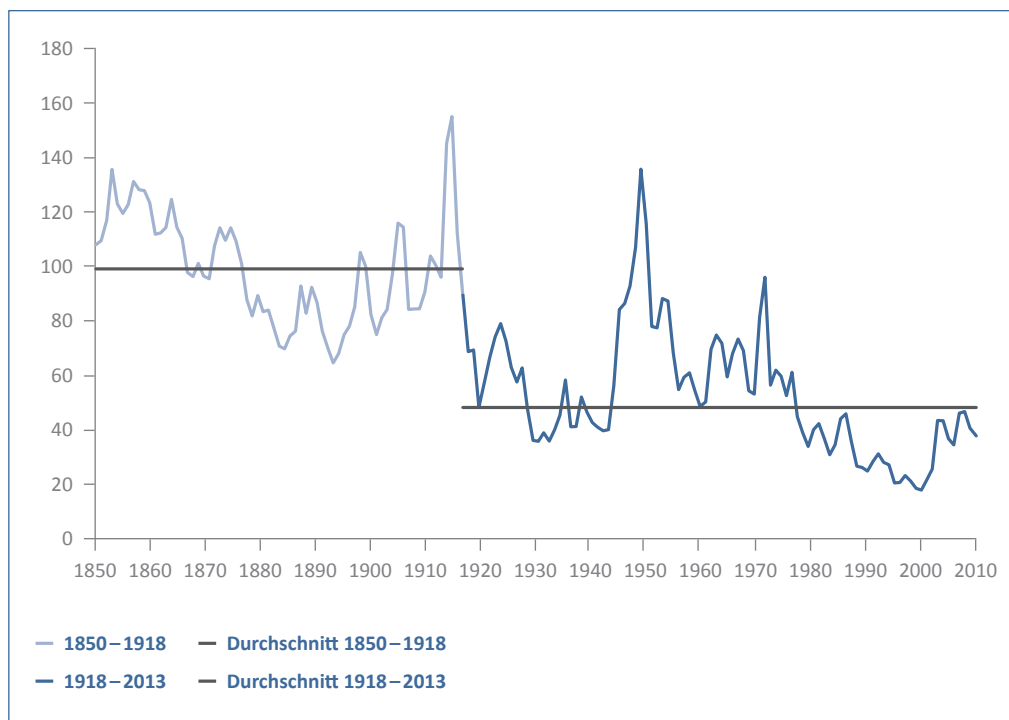


Abbildung 3.7: Index für die reale Preisentwicklung von Nicht-Eisenmetallen von 1850 bis 2013 (normiert auf das Jahr 1900). Die Preise von Aluminium, Kupfer, Blei, Zink und Zinn sind anhand des realen Wertes der jeweiligen Produktion gewichtet. Die Daten stammen von der Londoner Metallbörse und ihren Vorläufern.⁸⁴ Der Versatz nach dem Ersten Weltkrieg ist die Folge von Kriegsproduktion, Wirtschaftskrisen und Rationalisierungen im Bergbau.

Produkte auf den Markt kommen, für die andere Rohstoffe benötigt werden, kann es auch schneller einmal zu Versorgungsengpässen kommen. Hier spielen „Hypes“ eine wesentliche Rolle. Dabei handelt es sich um eine Meinung, die sich im Markt schnell ausbreitet. So kann sich die Meinung durchsetzen, dass bei einem Rohstoff mit einer kritischen Unterversorgung zu rechnen ist. Hinterher stellt sich dann oftmals heraus, dass ausreichend Rohstoff vorhanden war. Letztlich sollte sich jede Firma sowohl auf schwankende Rohstoffpreise als auch schwankende Volatilitäten einstellen. Die Industrie sollte also Langfriststrategien entwickeln, um sich künftig jederzeit mit Rohstoffen versorgen zu können. Zudem sollte sie sich nicht von Hypes treiben lassen.

⁸⁴ Nach Stürmer 2013-1 und Stürmer 2013-2: Die Inflationsbereinigung erfolgte auf Basis des britischen Konsumentenpreisindex.

Preisbildungs- und Marktmechanismen

Unabhängig von der Herkunft handelt es sich bei Rohstoffen in der Regel um weltweit gehandelte und qualitativ gleichwertige Massenprodukte. Bei unbearbeiteten Produkten wie Erdöl werden Qualitätsunterschiede durch Abschläge oder Zuschläge ausgeglichen. Die Preisbildung findet also auf einem globalen Markt statt.

Während die nominalen Rohstoffpreise steigen, stagnieren die realen Preise (inflationsbereinigt) langfristig. Dieser langfristige Trend kann in Zukunft anhalten, wenn es weiterhin gelingt, durch technologische Verbesserungen und Effizienzsteigerungen dem zu erwartenden Anstieg der Rohstoffnachfrage zu begegnen. Kurzfristig können kleine Unter- oder Überdeckungen am Markt allerdings zu erheblichen Preisausschlägen führen. Im Einzelfall kann der langfristige Preistrend durch plötzliche Nachfrageschübe, zum Beispiel im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Produkte, überlagert werden. Rohstoffe mit kleinen Märkten erleben vergleichsweise öfter starke Preisausschläge, da einzelne Akteure hier eine dominierende Rolle einnehmen können. Auch Spekulationen und Hypes können die Preisentwicklung beeinflussen und sind vor allem in jüngster Zeit wohl mitverantwortlich, dass sich die Preisvolatilität deutlich erhöht hat.

3.3 Die Nachfrageseite

Die heutige Rohstoffwirtschaft ist global. Lokale Rohstoffmärkte gibt es kaum noch. Es gibt nur wenige Ausnahmen: Diese ergeben sich beispielsweise durch Exportrestriktionen. Auch die Erdgasversorgung über Pipelines, die in gewisser Weise auf bestimmte Regionen beschränkt bleibt, ist eher ein Spezialfall. Tatsächlich findet selbst hier eine Globalisierung statt, weil Erdgas zunehmend in Form von Flüssigerdgas (liquefied natural gas, LNG) per Schiff über große Distanzen befördert wird.

Zu dieser Globalisierung trägt bei, dass heute jede Form der Wertschöpfung viele verschiedene Rohstoffe benötigt, die aus verschiedenen Teilen der Welt stammen. Selbst der Dienstleistungssektor kommt heute nicht mehr ohne Rohstoffe aus. Hier kommen vor allem Computer oder Kommunikationsgeräte (Smartphones) zum Einsatz, deren wichtigsten Bestandteile elektronische Bauteile und Mikrochips sind. Heutige Computerchips bestehen beispielsweise aus bis zu sechzig

Elementen.⁸⁵ Für Smartphones sind bestimmte Halbleiterelemente wie etwa Gallium unentbehrlich. Diese wurden noch vor 25 Jahren kaum nachgefragt, heute sind sie aber entscheidend für die Funktechnik in den Telefonen. Wie diese Beispiele zeigen, wird die Rohstoffnachfrage im Wesentlichen durch Technologieentwicklungen bestimmt. Sie ändert sich vor allem durch die Entwicklung neuer Produkte und Technologien, die der gesellschaftliche Fortschritt und die Industrialisierung mit sich bringen. Eine treibende Kraft sind Zukunftstechnologien. Da viele Produkte wie etwa Autos oder Smartphones weltweit nachgefragt und produziert werden, greift so gut wie jede Nation beziehungsweise nationale Wirtschaft auf denselben globalen Rohstoffpool zurück. Studien, die die Ressourcenverfügbarkeit für die Energiesysteme der Zukunft abschätzen sollen, müssen sich deshalb auch mit der Entwicklung der Weltwirtschaft und der Entwicklung von Zukunftstechnologien beschäftigen.

⁸⁵ NRC 2008.

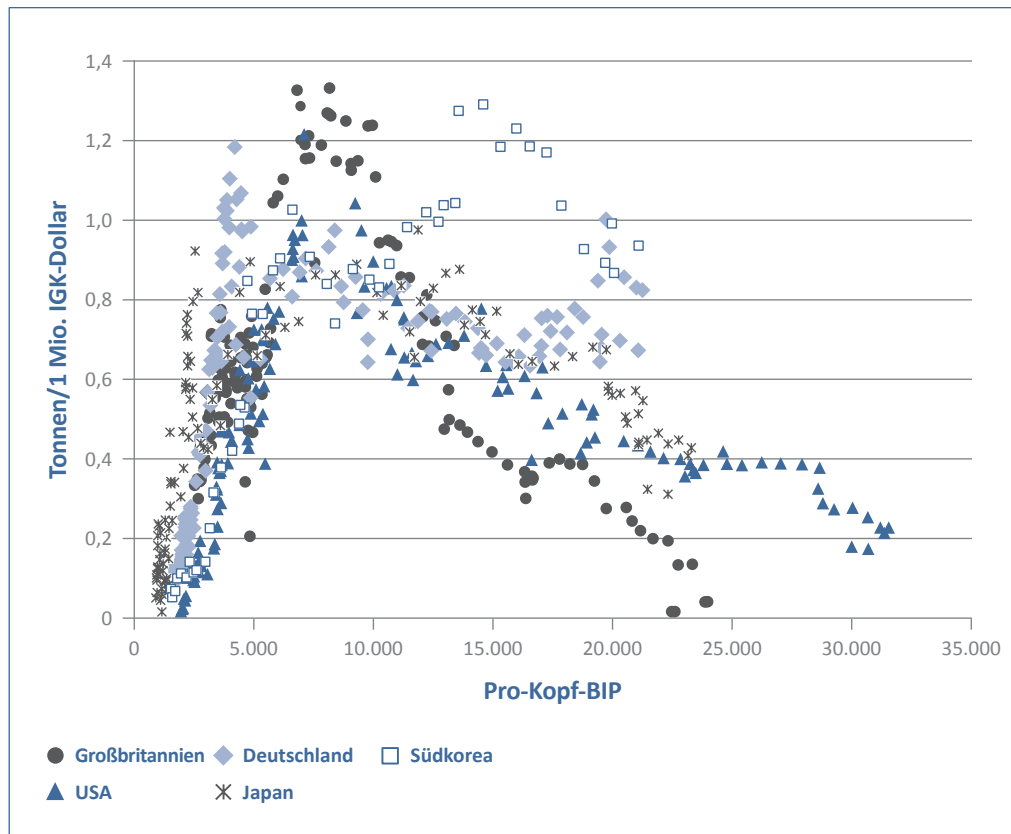


Abbildung 3.8: Entwicklung der Materialintensität von Kupfer in ausgewählten Industriestaaten^{86, 87} auf Basis des International Geary-Khamis Dollar (IGK- $\text{\$}$)⁸⁸

3.3.1 Allgemeine Entwicklungen

Wie die Entwicklung neuer Produkte im Laufe der vergangenen Jahrzehnte zeigt, verändert sich mit der Industrialisierung und der Wirtschaftsentwicklung der Rohstoffbedarf von Volkswirtschaften. Die Industrialisierung wird in diesem Zusammenhang als ein Prozess betrachtet, bei dem sich die Produktionsfaktoren⁸⁹ von der Primärproduktion (Bergbau, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei) in den sekundären industriellen Sektor (Verarbeitung) verschieben. Dabei steigen der

Materialeinsatz absolut als auch die Materialintensität (Rohstoffeinsatz im Verhältnis zum Bruttoinlandsprodukt, BIP, auch als Intensity of Use-Faktor bezeichnet).⁹⁰

Ab einem bestimmten Entwicklungsstand nimmt der Anteil der Industrieproduktion am BIP ab und der tertiäre Sektor (Dienstleistungssektor), der im Vergleich nicht sehr materialintensiv ist, gewinnt an Bedeutung. Während der absolute Rohstoffeinsatz noch zunimmt, sinkt entsprechend die Materialintensität. Der industrielle Entwicklungsstand eines Staates spiegelt sich also anhand des Rohstoffbedarfs im Verhältnis zu seiner wirtschaftlichen Produktivität wider. Trägt man die Materialintensität gegen das Verhältnis BIP/Kopf auf, entstehen typische „Glockenkurven“, wie sie beispielhaft in Abbildung 3.8 für einige Industrieländer anhand von Kupfer dargestellt sind.

86 Stürmer/von Hagen 2012, S. 26.

87 Methodik nach Kravis et al. 1978.

88 IGK- $\text{\$}$ ist eine von der Weltbank berechnete Vergleichswährung auf Basis des USD, um die Vergleichbarkeit zwischen Ländern mit unterschiedlicher Währung herzustellen. Ein IGK- $\text{\$}$ entspricht der Kaufkraft eines USD zu einem gegebenen Zeitpunkt. Hier ist das Basisjahr 1990. Die anderen Währungen werden über die Kaufkraftparität in IGK- $\text{\$}$ umgerechnet. Dies ermöglicht im Gegensatz zum Bruttoinlandsprodukt auf Basis von Wechselkursen eine angemessene Darstellung relativer Preise von Gütern und Dienstleistungen.

89 Unter Produktionsfaktoren versteht man alle materiellen und immateriellen Mittel und Leistungen, die an der Produktion von Gütern mitwirken.

90 Malenbaum 1978.

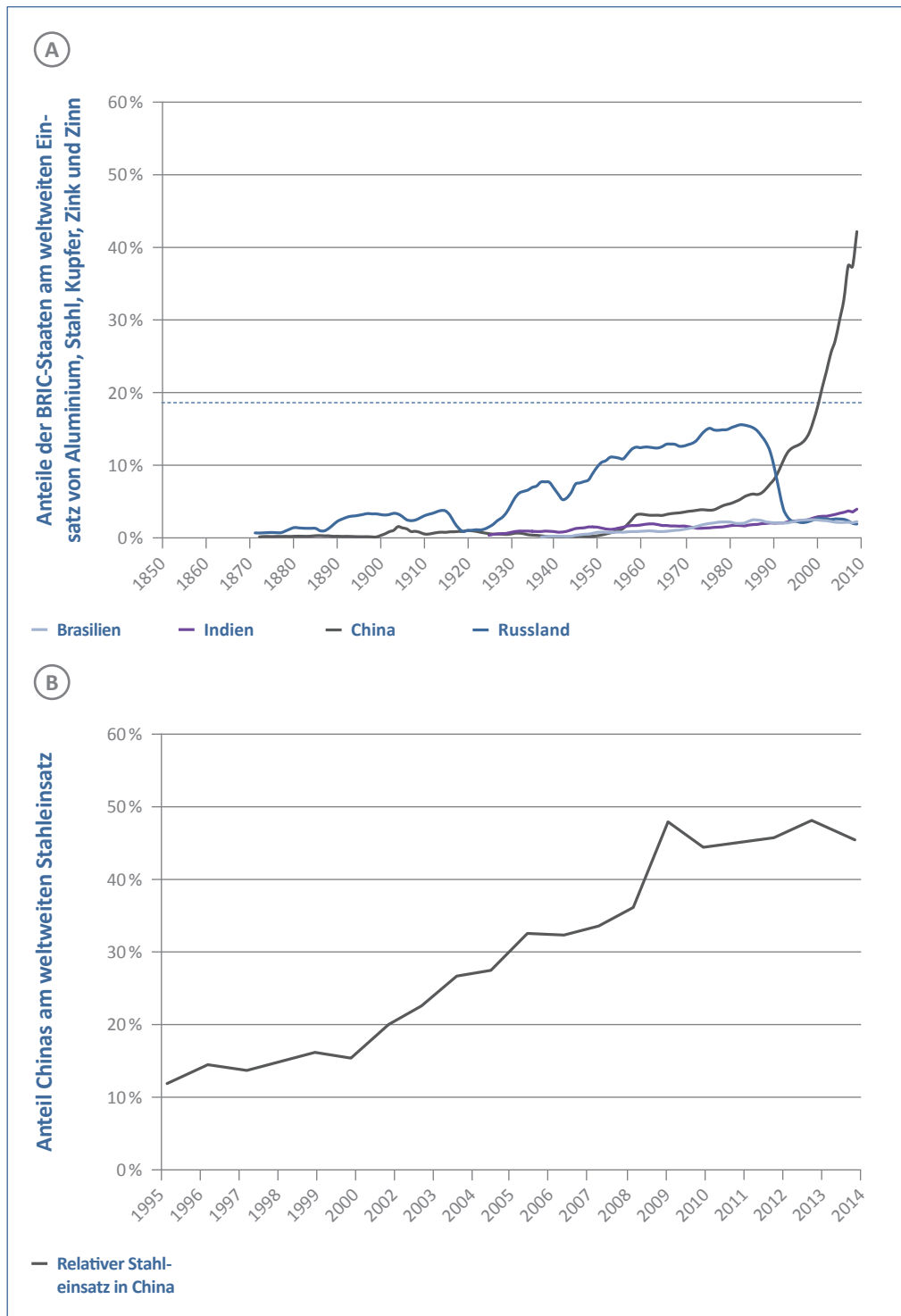


Abbildung 3.9: Der Rohstoffeinsatz als Gradmesser für den industriellen Entwicklungsstand eines Landes: A) Der Vergleich des Rohstoffeinsatzes von Aluminium, Stahl, Kupfer, Zink und Zinn in den BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien und China) spiegelt das enorme Wirtschaftswachstum in China wider. Der Rohstoffeinsatz ist als durchschnittlicher Anteil an der globalen Nachfrage angegeben.⁹¹ B) Der Stahleinsatz in China, relativiert gegenüber der weltweiten Entwicklung, zeigt in jüngerer Zeit eine sich abflachende Tendenz. Dies deutet darauf hin, dass für den Einsatz von Stahl das Maximum der Materialintensität in China bereits durchschritten worden ist.

Mit der fortschreitenden Industrialisierung in den Ländern der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und

Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) hatte seit den 1950er Jahren der Rohstoffbedarf stark zugenommen. Wie bereits schon in China ist diese Entwicklung heute

⁹¹ Stürmer/von Hagen 2012, S. 35.

in vielen aufstrebenden Entwicklungs- und Schwellenländern zu beobachten. So wurden in den vergangenen fünfzig Jahren weltweit mehr Rohstoffe verbraucht als in der gesamten Menschheitsgeschichte zuvor. In der ersten Dekade dieses Jahrtausends änderte sich jedoch die Struktur der globalen Rohstoffversorgung grundlegend: Fast bis zum Ende des letzten Jahrtausends benötigten etwa 25 Prozent der Weltbevölkerung – nämlich die der Industrieländer – rund 70 Prozent bis 80 Prozent der Weltrohstoffproduktion (mit Kohle als Ausnahme). Doch dann begann der rasante Anstieg des Rohstoffeinsatzes in der Volksrepublik China (Abbildung 3.9B). Betrug der chinesische Anteil am Weltstahleinsatz 1990 nur 8 Prozent, so waren es 2012 bereits knapp 46 Prozent. Auch der Bedarf an anderen Metallen nahm drastisch zu: Der Kupfereinsatz stieg von 6 Prozent auf 43 Prozent, bei Aluminium von 5 Prozent auf knapp 44 Prozent. China ist heute der größte Konsument aller wesentlichen Rohstoffe mit Ausnahme von Erdöl und Erdgas. Hier nimmt die Volksrepublik Platz zwei hinter dem Spitzenreiter USA ein.

Die Kurven, die die Zunahme des Metalleinsatzes zeigen (Abbildung 3.8), sind Lernkurven. So „lernt“ ein Land im Laufe der Zeit, mit derselben Rohstoffmenge immer wertvollere Produkte herzustellen. Zunächst steigt der Rohstoffbedarf mit der Industrialisierung stark an, weil der Ausbau der Infrastruktur und der Aufbau der Produktionsstrukturen für die verarbeitende Industrie besonders materialintensiv sind. Je besser die Infrastruktur ausgebaut ist, desto weniger neue Rohstoffe werden benötigt, sodass sich die Kurve ab einem gewissen Zeitpunkt stetig verflacht. Die Verflachung der Lernkurve beginnt mit dem Peak der Materialintensitäts-Glockenkurve, der in der Regel erreicht wird, wenn die Länder in das Stadium eines hohen Pro-Kopf-Einkommens eintreten. Es gibt weitere Gesetzmäßigkeiten: Während sich ein Land entwickelt,

benötigt es nacheinander verschiedene Rohstoffe. Die Reihenfolge des Erreichens der Maxima der Materialintensitäten war bei den wesentlichen Metallen in den großen Industrieländern bisher erstaunlich stabil: Zinn, Zink, Rohstahl, Kupfer und Aluminium. Das durchschnittliche Niveau der Materialintensität ist für Rohstahl am höchsten, dann folgen Aluminium, Kupfer, Zinn und Zink.⁹² Sinkt die Materialintensität wieder, stagniert der Rohstoffgebrauch, in einigen Fällen steigt er aber immer noch an – trotz aller Maßnahmen, die Ressourcenproduktivität zu erhöhen.

Aus diesen Gesetzmäßigkeiten lassen sich generelle Trendaussagen für die zukünftige Verfügbarkeit von Rohstoffen für die Energiesysteme der Zukunft ableiten:

Für China beobachtet man bereits jetzt, trotz des stark gestiegenen Rohstoffeinsatzes (Abbildung 3.9A), eine Verflachung der Einsatzkurve für einzelne Rohstoffe (Abbildung 3.9B). Wann es zu einer stabilen Situation wie in der EU oder den USA kommen wird (Abbildung 3.8), ist aber schwer vorherzusagen. Bis zum Jahre 2020 werden andere Entwicklungsländer kaum als große Nachfrager auftreten.⁹³ Danach aber werden andere bevölkerungsreiche Schwellen- und Entwicklungsländer, wie Indien, Indonesien oder Brasilien, dem Entwicklungspfad Chinas folgen. Auch hier ist der Zeitpunkt der starken Zunahme des Rohstoffbedarfs (der Tipping Point) kaum abzuschätzen. Bis zum Jahr 2050 wird dieser Prozess aber nicht abgeschlossen sein. Somit muss in den kommenden Jahrzehnten mit einer stetigen Rohstoffkonkurrenz durch sich industrialisierende Schwellen- und Entwicklungsländer gerechnet werden. Damit wird es künftig – wenn auch zyklisch – einen stetigen Nachfrage- und Preisdruck bei

⁹² Stürmer/von Hagen 2012.

⁹³ Stürmer/von Hagen 2012.

Gruppe nach IUPAC beziehungsweise CAS

	1/IA	2/IIA	3/IIIB	4/IVB	5/VB	6/VIB	7/VIIB	8/VIII	9/IX	10/VIII	11/IB	12/IIIB	13/IIIA	14/IVA	15/VA	16/VIA	17/VIIA	18/VIIIA	
1	H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo	
				57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
				89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

■ In Verwendung
■ Ohne Verwendung

Abbildung 3.10: Vielfalt der in Automobilen eingesetzten Elemente⁹⁴

Rohstoffen geben. Grundsätzlich sind die Entwicklungen in den einzelnen Ländern sowie technologische Änderungen kaum prognostizierbar. Daher lässt sich der künftige Rohstoffbedarf kaum prognostizieren. Szenarien zur Abschätzung/Identifizierung möglicher Versorgungsprobleme bei Rohstoffen sind deshalb auf jeden Fall sinnvoll.

3.3.2 Technologieentwicklung auf der Nachfrageseite

Deutschland ist neben den USA, China und Japan eines der Spitzenindustrie- und -handelsländer. Im Jahr 2012 hatte die industrielle Wertschöpfung (produzierendes Gewerbe, ohne Baugewerbe) in Deutschland einen Anteil von 25,8 Prozent am BIP. Im Vergleich mit den EU-28-Staaten ist das ein Spitzenwert. Nur in

Rumänien lag der Anteil mit 32,5 Prozent noch höher. Der EU-Durchschnitt hingegen lag bei 19,1 Prozent. Italien erreichte 18,4 Prozent, Großbritannien 14,5 Prozent und Frankreich 12,5 Prozent.⁹⁵ Da jede Wertschöpfung, insbesondere die industrielle Wertschöpfung, Rohstoffe benötigt, ist Deutschland damit auch einer der großen Rohstoffverbraucher. Bei Aluminium und Kupfer lag Deutschland im Jahr 2013 weltweit auf Platz drei, bei Nickel und Zinn auf Platz vier, bei Blei auf Platz fünf, bei Zink auf Platz sechs und bei Stahl auf Platz sieben.⁹⁶ Deutschland ist nach China und den USA die drittgrößte Exportnation, wobei die deutsche Stärke Hightech-Produkte sind, die ein immer größeres Spektrum an Rohstoffen erfordern. Daher strebt die Bundesregierung mit ihrer

94 BMW 2014.

95 Statistisches Bundesamt 2013.

96 BGR 2014-2.

	Bi	Co	Ga	Ge	In	Li	SEE	Re	Se	Si	Ta	Te	Ag	Au	Ir	Pd	Pt	Rh	Ru	
Photovoltaik			■	■	■				■	■		■	■							■
Batterien		■			■	■	■						■							
Brennstoffzellen						■										■	■	■	■	
Katalysatoren		■		■			■	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■
Magneten		■					■	■	■			■								
Nukleartechnologie					■	■	■													
Legierungen, Lötmetalle	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						■
Metallurgie*	■			■		■			■											
Glas, Keramik, Farbstoffe**	■	■			■	■			■			■	■			■	■	■	■	
Elektrik/Elektronik	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
optische Elektronik			■		■		■		■			■								
Medizin/Zahnmedizin, Pharmazeutika	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Schmiermittel			■			■														

*Zusätze zum Beispiel bei Schmelzen und Überzügen

**beinhaltet Indiumzinnoxid-Beschichtungen auf Glas

Abbildung 3.11: Rohstoffkonkurrenz zwischen Energietechnologien und anderen Anwendungen.⁹⁷ Dunkelblau bedeutet, dass dies ein wichtiger Rohstoff für dieses Einsatzgebiet ist; hellblau, dass der Rohstoff hier verwendet wird, und weiß, dass der Rohstoff keine Anwendung findet.

Hightech-Strategie⁹⁸ unter anderem an, durch Forschung, neue Technologien und die Verbreitung von Innovationen eine sparsame und effiziente Nutzung von Rohstoffen zu ermöglichen.

Wie unsere Produkte immer komplexer werden, lässt sich gut am Automobil zeigen. War das Auto um 1950 ein relativ einfaches Produkt aus Stahl, Kupfer, Blei, Zink, Aluminium, Gummi und Kunststoffen, so ist es heute ein Hightech-Produkt, ein Computer auf Rädern, für das viele Elemente benötigt werden (Abbildung 3.10). In einem Auto können heute bis zu 150 Mikroprozessoren mit bis zu 6.000 Halbleitern verbaut sein.⁹⁹ Der hohe Anteil an Elektronik im Auto und gerade auch die Entwicklung bei den Computerchips hat wesentlichen Anteil an dieser Elementvielfalt. Nach Angaben der Firma Intel steckten in einem Chip in den 1980er Jahren 12 und in den 1990er Jahren 16 verschiedene

Elemente. Seit den 2000er Jahren sind es mehr als 60 Elemente.¹⁰⁰ Neben dem Automobil und der Computertechnologie ist die für die Materialeffizienz so entscheidende Mess- und Regeltechnik ein weiteres zu nennendes Beispiel für die Nutzung einer zunehmenden Anzahl von Elementen. Grundsätzlich gilt, dass es kaum Elemente gibt, die ausschließlich nur in einem Hightech-Gebiet verwendet werden. Erneuerbare Energietechnologien und andere Technologien, die für die Energiewende benötigt werden, konkurrieren somit mit vielen anderen Einsatzgebieten um Elemente (Abbildung 3.11).

Nur selten sind Energiesysteme die wichtigsten Einsatzgebiete von Elementen. So werden zum Beispiel Permanentmagnete auf der Basis von Seltenerden-Elementen zwar in Windturbinen eingesetzt; das Hauptanwendungsgebiet dieser Permanentmagnete sind aber Festplatten (Hard Disk Drives) in Computern und anderen Geräten. Alles in

97 Modifiziert nach Hagelüken 2011.

98 BMBF 2010-1, S. 12-13; BMBF 2014, S. 18-21.

99 Pischetsrieder 2011.

100 NRC 2007, S. 38.

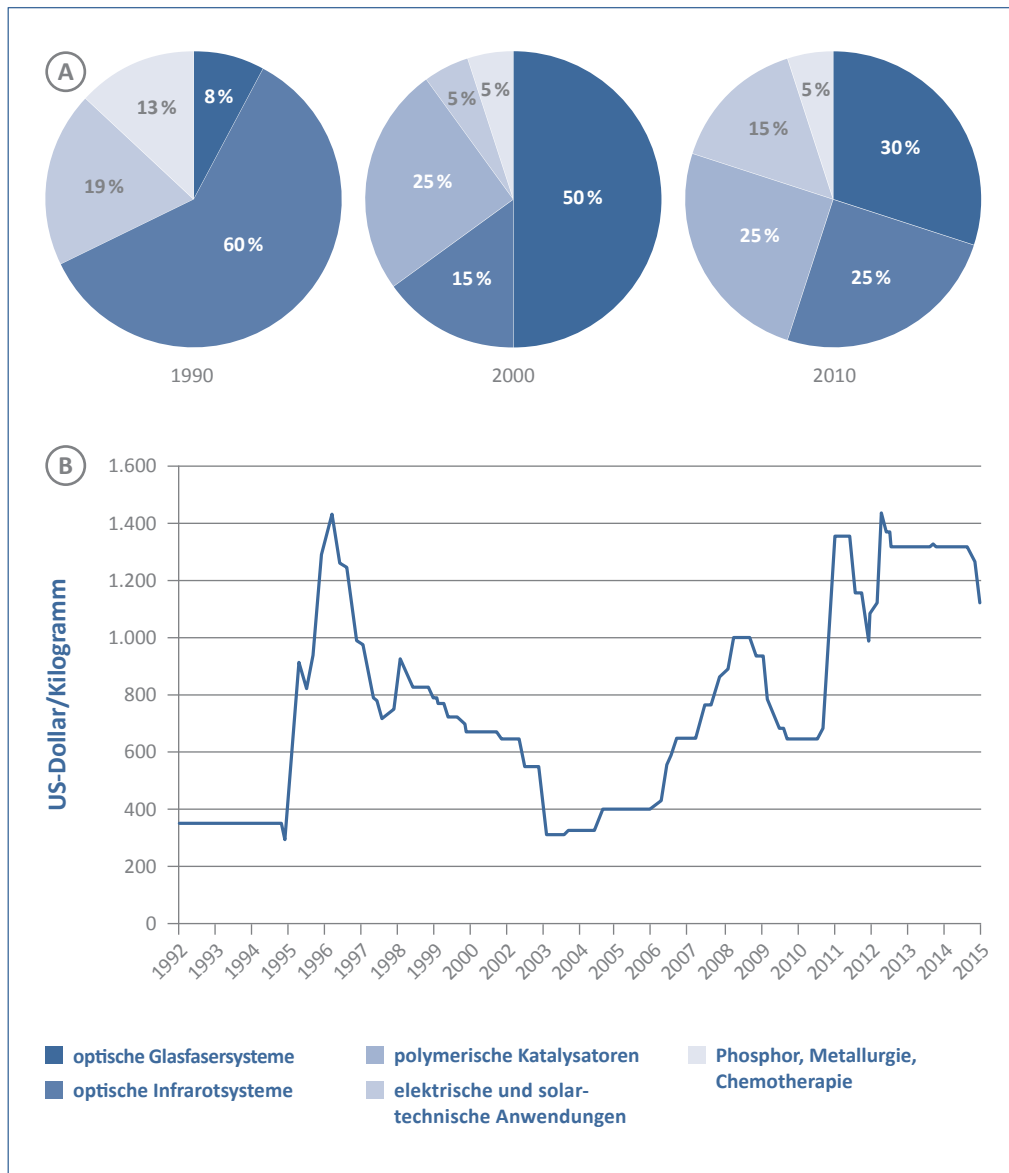


Abbildung 3.12: Einsatzgebiete und Preisentwicklung von Germanium: A) Das Beispiel Germanium zeigt, dass sich aufgrund technologischer Entwicklungen der Bedarf für einzelne Einsatzgebiete erheblich ändern können, vor allem, wenn man berücksichtigt, dass in diesem Zeitraum die weltweit bekannten Germaniumvorkommen angestiegen sind. So lag die Raffinadeproduktion (in Tonnen des Germanium-Inhalts) 1990 bei 55 Tonnen, 2000 bei 74 Tonnen, 2010 bei 120 Tonnen und 2012 bei 128 Tonnen.¹⁰¹ B) Die Preisentwicklung beim Germanium von 1992 bis 2015.¹⁰²

allen sind der Automobil- sowie der Elektronik-/Informations- und Kommunikationssektor die stärksten Rohstoffkonkurrenten der Energiesysteme der Zukunft.¹⁰³

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass man es oft mit schnellen Technologieänderungen zu tun hat, wodurch auch

die Rohstoffnachfrage und die Rohstoffpreise entsprechend beeinflusst werden. Das trifft vor allem auf den Wirtschaftszweig der Verbrauchs- und Unterhaltungselektronik zu, der wohl mit die schnellsten Produktwechsel aufweist. Wie stark sich Einsatzgebiete und Rohstoffpreise verändern können, wird beispielsweise am Germanium deutlich (Abbildung 3.12A). Die Preisentwicklung ist zum Teil an die Veränderungen der Einsatzgebiete gekoppelt (Abbildung 3.12B). Sie spiegelt aber auch allgemeine wirtschaftliche Entwicklungen

¹⁰¹ Melcher/Buchholz 2012.

¹⁰² Modifiziert nach Melcher/Buchholz 2012; aktualisiert nach MB 2015 und BGR 2015.

¹⁰³ Moss et al. 2013.

und politische Einflussnahmen wider: Der Anstieg in den späten 1990er Jahren entstand beispielsweise vornehmlich aufgrund des zunehmenden Einsatzes in Glasfasersystemen unter anderem für die Herstellung von Solarzellen. Der Abfall ab 2009 ist dagegen vor allem der Weltwirtschaftskrise geschuldet. Der jüngste Preisanstieg ab 2011 hat dagegen mehrere, zum Teil auch politische Ursachen. Auf der Angebotsseite trug dazu bei, dass seitens Chinas Exportsteuern auf Germaniumoxid erhoben wurden, eine Produktionsstätte in China aufgrund von Umweltbelangen heruntergefahren werden musste und China ankündigte, Germanium aus strategischen Gründen zu lagern. Letzteres führte vermutlich also zu vermehrter Spekulation in Bezug auf Germanium. Zeitgleich kam es zu einem Anstieg der Nachfrage unter anderem aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Germanium in Leuchtdioden (LED) und Solarzellen.

Die Fernsehindustrie zeigt beispielhaft, wie schnell sich eine ganze Industrie verändern kann. So fand 2006 und 2007 innerhalb von nur zwei Jahren der Wechsel von den Röhrenfernsehern (Kathodenstrahlröhre) zu LCD-Fernsehern statt.¹⁰⁴ Das Glas der klassischen Kathodenstrahlröhre enthielt zum Zweck der Abschirmung der Röntgenstrahlung Blei (im Hals- und Trichterteil), der Schirmteil Barium und Strontium. Mit der Einführung der heutigen LCD-Flachbildschirme wurden diese Elemente in der Glasherstellung nicht mehr benötigt. Heutige Glassubstrate für moderne Displayanwendungen bestehen aus Alumino-Borosilikatgläsern. Durch den Technologiewechsel zu modernen Displays hat sich allerdings eine Abhängigkeit von einem anderen kritischen Element ergeben: Indium und Zinn. Die beiden Elemente kommen in den transparenten und als Elektroden fungierenden ITO-Schichten (Indium Tin Oxide, Indiumzinnoxid) der Displays zum Einsatz.

Da die Rohstoffgewinnung in der Produktionshöhe im Allgemeinen, also sowohl bei eigenständig als auch beibehaltend auftretenden Elementen, weniger flexibel ist, als Nachfrageänderungen auftreten können, kommt es immer wieder zu schnellen Wechsels im Verhältnis zwischen Angebot und Nachfrage. Dies gilt insbesondere für Sondermetalle und Elemente für elektronische Produkte. Das ist der Grund für die häufigen Preissprünge oder gar Preispeaks, wie sie beispielhaft in Abbildung 3.12B für Germanium dargestellt sind. Diese Preispeaks sind aber notwendig, um den Regelkreis der Rohstoffversorgung anzustoßen, der in einer Marktwirtschaft für eine funktionierende Rohstoffwirtschaft entscheidend ist.

Ein Beispiel für eine Energietechnologie, die solche Rohstoffe benötigt, sind moderne Neodym-Eisen-Bor-Magnete für Elektromotoren. Mit der Entwicklung dieser starken Permanentmagnete wurde es möglich, kompaktere und weniger stör anfällige Elektromotoren zu bauen. Diese robusten Elektro-Synchronmotoren haben sich schnell ein breites Anwendungsfeld erschlossen. Sie werden als Traktionsmotoren für Fahrzeuge oder auch für elektrische Küchenkleingeräte benötigt. Für die Seltene-Erden-Elemente, zu denen Neodym zählt, besitzt China quasi immer noch ein Monopol. Durch die gestiegene Nachfrage nach Neodym oder auch dem verwandten Dysprosium ist die Versorgungslage angespannt. Die Herausforderung für die Industrie besteht also vor allem darin, zu lernen, beim Rohstoffeinsatz flexibler zu werden. Je flexibler die Industrie ist, umso weniger ist sie von bestimmten Rohstoffen abhängig. Und umso unwahrscheinlicher dürfte es sein, dass Preispeaks auftreten, die auch die Verfügbarkeit von Rohstoffen für die Energiesysteme der Zukunft beeinflussen.

Wie flexibel die Industrie tatsächlich reagieren kann, lässt sich am Beispiel eines Stahlwerks zeigen. So

¹⁰⁴ Displaysearch 2008.

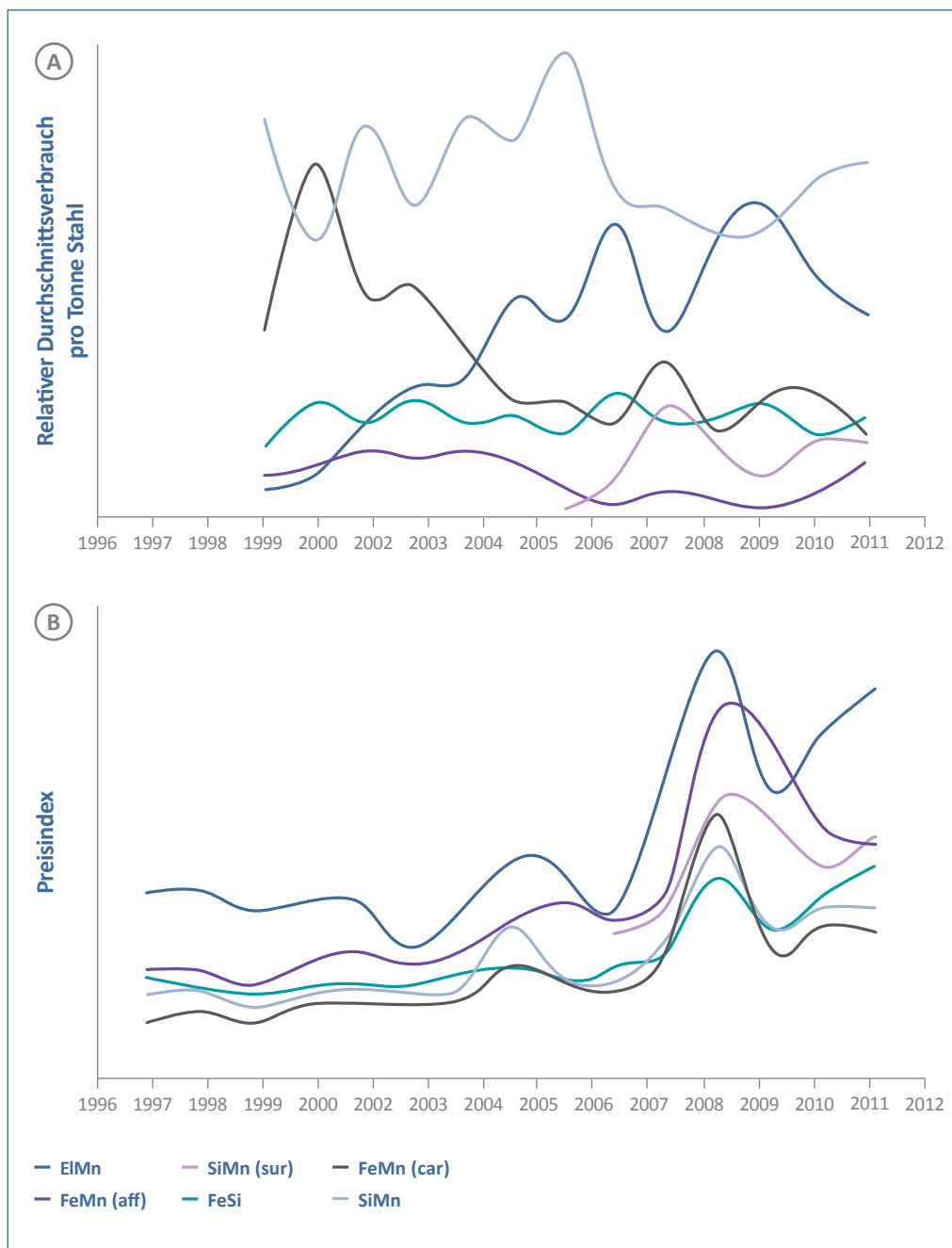


Abbildung 3.13: Industrielle Flexibilität auf Preisschwankungen – ein Beispiel aus der Stahlindustrie.¹⁰⁵ A) Einsatz verschiedener Legierungsmetalle. B) Preisentwicklung der Legierungsmetalle. Die Legierungszusätze sind im einzelnen FeSi: Ferrosilizium; FeMncar: Ferromangan carburé (relativ hoher Kohlenstoffgehalt); FeMnaff: Ferromangan affiné (relativ niedriger Kohlenstoffgehalt); SiMn: Silicomangan; SiMnsur: Silicomangan sur-affiné (sehr geringer Kohlenstoffgehalt); EIMn: Elektrolytmangan (entspricht mit etwa 99 Prozent Mangananteil fast reinem Mangan, dies hat den geringsten Kohlenstoffgehalt).

kann ein Stahlwerk Preisbewegungen bei Legierungsmetallen durch einen wechselnden Einsatz abfangen (Abbildungen 3.13A und 3.13B). Das ist vor allem auch für die Energiesysteme von Bedeutung, da hochwertige Stähle für jede Art von Energiesystemen benötigt werden.

Eine wichtige Grundlage für die systematische Erfassung der Rohstoffnachfrage aus Zukunftstechnologien hat das Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) mit dem Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie im Jahre

¹⁰⁵ Modifiziert nach Lachmund 2012.

2009 gelegt. Damals stellten die beiden Institute eine Studie¹⁰⁶ vor, in der sie die Versorgungslage und Kritikalität für verschiedene Rohstoffe im Detail analysiert hatten. Die regelmäßige Überprüfung der Nachfragetrends ist durch die Deutsche Rohstoffagentur geplant.

Darüber hinaus werden mit dem BMBF-Förderprogramm „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft“¹⁰⁷ (WING) im BMBF-Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“¹⁰⁸ (FONA) und im Rahmen der Hightech-Strategie der Bundesregierung, Forschungsprojekte gefördert, die sich mit der Erhöhung der Rohstoffeffizienz und auch der Flexibilität befassen. Dies sind insbesondere die Programme r² „Innovative Technologien

für Ressourceneffizienz rohstoffintensive Produktionsprozesse“¹⁰⁹, r³ „Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ sowie r⁴ „Wirtschaftsstrategische Rohstoffe“¹¹⁰. Aus diesen Betrachtungen über Technologieentwicklungen auf der Nachfrageseite kann man folgenden Schluss ziehen: Entwicklungen auf der Nachfrageseite werden zu einem gewissen Grade stets unvorhersehbar bleiben. Aus diesem Grund ist es notwendig, breite Lösungen für die Verfügbarkeit wirtschaftsstrategischer Rohstoffe für zukünftige Energiesysteme zu entwickeln. Ein Hilfsmittel für die Gestaltung der Zukunft sind dabei Szenarien, mit denen sich Technologieentwicklungen und mögliche Änderungen des Rohstoffbedarfs abschätzen lassen.

Die Nachfrageseite

Die Rohstoffwirtschaft ist heute fast vollständig globalisiert und quasi jede Gesellschaft und industrielle Entwicklungsphase ist von Rohstoffen abhängig. Dabei zeigt der Rohstoffeinsatz im Zuge des Industrialisierungsprozesses charakteristischerweise einen glockenförmigen Verlauf.

Der Rohstoffeinsatz für zukünftige Energiesysteme steht immer in Konkurrenz zur Rohstoffnachfrage in anderen Sektoren, die sich durch die Entwicklung der Weltwirtschaft und von Zukunftstechnologien ergibt. Diese zum Teil sehr schnellen Nachfrageänderungen sind schwer prognostizierbar. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass die Industrie Lösungen entwickelt, um beim Rohstoffeinsatz flexibel zu sein. Stetiges Monitoring des Rohstoffangebots und -bedarfs sowie Szenarien über deren jeweilige zukünftige Entwicklung ermöglichen es, Warnzeichen für Versorgungsrisiken frühzeitig zu erkennen.

¹⁰⁶ Angerer et al. 2009-2; Angerer et al. 2009-3.

¹⁰⁷ BMBF 2003.

¹⁰⁸ BMBF 2009.

¹⁰⁹ BMBF 2010-2.

¹¹⁰ BMBF 2012.

3.4 Die Angebotsseite

Beim Rohstoffangebot unterscheidet man heute zwischen den primären Rohstoffen, die aus Lagerstätten in der Erde (Geosphäre) gewonnen werden, und Rohstoffen, die durch Recycling oder andere Maßnahmen aus industriellen Produkten (Technosphäre) wiedergewonnen werden. Insofern ist es sinnvoll, das Rohstoffangebot getrennt für beide Kategorien zu betrachten – vor allem auch im Hinblick auf die technischen Entwicklungen, die es bei der primären und sekundären Rohstoffgewinnung beziehungsweise auf der Angebotsseite gibt. Da in Zukunft der Rohstoffbedarf bedingt durch eine wachsende Weltbevölkerung und einen steigenden Lebensstandard weiter zunehmen wird, müssen die Angebotsmöglichkeiten auch vor dem Hintergrund der steigenden Nachfrage gesehen werden.

3.4.1 Geologische und bergwirtschaftliche Einflüsse auf das Angebot von Primärrohstoffen

Was die Gewinnung primärer Rohstoffe betrifft, ist zu bedenken, dass Rohstoffe immer regional ungleich verteilt sind. So konzentrieren sich einige Rohstoffe besonders stark in wenigen Ländern. Oft verfügen nur einige Firmen über diese Rohstoffe. Aus politischer Sicht besteht dadurch die Gefahr, dass Rohstofflieferungen durch Maßnahmen Dritter, wie zum Beispiel Exportbeschränkungen, wie man sie 2011 und 2012 bei den Seltene-Erden-Elementen seitens Chinas erlebt hat, unterbrochen werden könnten und es zu Handels- und Wettbewerbsverzerrungen kommt.¹¹¹ Es sind im Wesentlichen fünf Faktoren, die einen Konzentrationseffekt bewirken:

1. **Regionale Verteilung von Vorkommen:** Die einzelnen Rohstoffe sind immer mit einer typischen Geologie verknüpft. Beispielsweise stammt

Erdöl, das aus Meeresorganismen entstanden ist, nur aus Sedimentgesteinen („Muttergestein“), nicht aus magmatischen Gesteinen. Nickellagerstätten hingegen sind an basische, das heißt magnesiumreiche, siliziumarme magmatische Gesteine oder deren Verwitterungsprodukte geknüpft. Darüber hinaus spielt das Alter der Lagerstättengesteine eine Rolle. Die reichsten Eisenerzlagerstätten zum Beispiel sind an gebänderte Eisenformationen (Banded Iron Formations) gebunden, die fast ausschließlich in den ältesten Gesteinsformationen der Erde, den sogenannten Schildgebieten der Kontinente, wie sie beispielsweise in Australien, Brasilien oder Kanada auftreten, nicht jedoch in den jüngeren Gesteinen Zentraleuropas. Da die Geologie ungleich über die Welt verteilt ist, sind auch die Rohstoffe ungleich verteilt. Weiterhin sind die Lagerstätten innerhalb der Regionen mit häufiger Geologie nach Zahl, Größe und Qualität wiederum höchst ungleich verteilt. Die Gründe dafür sind bis heute nur teilweise bekannt (Abbildung 3.14).

2. **Selektion von Lagerstätten:** Es kommt zu einer weiteren Ungleichverteilung, da sich in einer globalen, offenen Weltbergbauwirtschaft ohne lokale Märkte, was heute weitgehend gilt, die großen Bergbauunternehmen auf die besten Lagerstätten konzentrieren. Das hat zur Folge, dass nicht alle bekannten Lagerstätten ausgebeutet werden, sondern nur die lukrativsten. Es gibt die sogenannte Lower Third Rule; das heißt, die großen Bergbauunternehmen versuchen, um sich gegen Preisschwankungen zu schützen, bei Neuinvestitionen generell nur in Projekte zu investieren, die im weltweiten Projektvergleich möglichst im unteren Drittel der Kosten liegen. In fast allen Lagerstätten sind die Gehalte ungleich verteilt. Man versucht die Wirtschaftlichkeit zu maximieren, indem der Abbau in den höherhaltigen Lagerstattenteilen begonnen wird. Im

¹¹¹ BDI 2015, S. 21f.

Laufe der Zeit sinken in der Regel die Durchschnittsgehalte. Kann dieser Effekt nicht durch Rationalisierungsmaßnahmen kompensiert werden, entsteht durch den Zugang der neuen Produzenten im unteren Kostendrittel oder zumindest in der unteren Kostenhälfte immer der Effekt, dass die weniger wirtschaftlichen Lagerstätten aus dem Markt gedrängt werden. Es findet also ein kontinuierlicher wirtschaftlicher Selektionsprozess statt, der dann in der Regel zu weiterer regionaler Konzentration führt.

3. **Wirtschaftliche Konzentration beim Bergbau:** Wie in der ganzen Weltwirtschaft beobachtet man auch in der Bergwirtschaft den Trend, dass Firmen von Konkurrenten übernommen werden. In der Bergwirtschaft gibt es noch einen besonderen Effekt. Die anfängliche Rohstoffsuche ist vergleichsweise kostengünstig und es kommt initial auf eine „gute Idee“ für die Exploration an, also wo am erfolgversprechendsten gesucht werden könnte. Bei der Suche nach neuen Vorkommen, der Prospektion und Exploration, hat daher zunächst jede Firma, jeder Newcomer oder kleine Prospektor, die gleichen Chancen. So entwickeln sich immer wieder neue Bergbauunternehmen, die oft besonders innovativ sind. Es wird geschätzt, dass diese Firmen etwa die Hälfte aller neuen Vorkommen weltweit entdecken. Da sie besonders innovativ und wendig sind, arbeiten sie oftmals kosteneffizienter als die großen Unternehmen, die Majors. Beispielsweise wurden alle kanadischen Diamantengruben von kleinen Prospektoren oder kleinen Explorationsfirmen entdeckt. Gleiches gilt für die Technologieentwicklung bei der Schiefergas- und -ölproduktion, die ebenfalls von kleinen Unternehmen angestoßen wurde. Allerdings wurden diese kleinen Pioniergesellschaften später von den Majors übernommen. Große Bergbauunternehmen wachsen also oft dadurch, dass sie die erfolgreichen kleinen Firmen
- übernehmen. Die Diamantengruben in Kanada etwa gehören heute den beiden größten australischen Bergbauunternehmen. Firmenübernahmen sind vor allem dort erfolgreich, wo Rohstoffe regional konzentriert sind. Firmen, die vor Ort bereits erfolgreich aktiv sind, haben gute Voraussetzungen zur Übernahme kleinerer Firmen. Hinzu kommt, dass sie vor Ort bereits über notwendige Infrastrukturen verfügen. Aufgrund dieser Vorleistungen im Infrastrukturbereich können sie schließlich schneller neue Bergwerke entwickeln. Regionale Konzentration kann demnach längerfristig auch zu einer Firmenkonzentration führen.
3. **Kostenvorteile:** Länder mit einem niedrigen Kostenniveau können Konkurrenten in anderen Ländern aus dem Markt drängen, weil sie Rohstoffe deutlich billiger abbauen können. Ein solches Beispiel ist die Seltene-Erden-Produktion in China. Dieses niedrigere Kostenniveau lässt sich unter anderem durch geringere Löhne oder geringere Kosten für Umwelt- und Sozialmaßnahmen erreichen. Es gibt allerdings diesen Konzentrationseffekt auch in Ländern mit in etwa gleichem Kostenniveau und Umwelt- und Sozialstandards. Wie in Kapitel 3.1 ausgeführt, konzentrieren sich große Bergbauunternehmen mehr und mehr auf große, langlebige Projekte mit niedrigen Kosten und hohen Geldflüssen (Cashflows), die sogenannten Tier-One-Projekte¹¹². Kommt es zu längerzeitigen Preiseinbrüchen, und sind diese Firmen nicht willens, die Produktion zurückzuführen, um die Preise zu stabilisieren, können sie Konkurrenten mit höheren Kosten aus dem Markt drängen. Dies konnte 2015 auf dem Eisenerzmarkt in Australien beobachtet werden.
 4. **Konzentration bei der Verhüttung:** Bei der Rohstoffversorgung spielen im Hinblick auf die Energiesysteme der Zukunft nicht nur

¹¹² Crowson 2012.

Konzentrationseffekte im Bergbau eine Rolle. Ebenso bedeutsam sind Konzentrationseffekte bei der Verhüttung der Erze. Das gilt vor allem für beibehaltene Elemente und die Herstellung von Zwischenprodukten. Meistens beziehen deutsche Firmen nicht Rohstoffe, sondern Zwischenprodukte, um daraus Hightech-Produkte zu fertigen.

Im Hinblick auf die Versorgungssicherheit ist es also wichtig, Konzentrations-trends, die einen freien globalen Rohstofffluss gefährden könnten, zu beobachten. So ist es nur konsequent, wenn es im Koalitionsvertrag der Bundesregierung vom Dezember 2013¹¹³ unter der Überschrift „Monitoring ausbauen“ heißt: „Wir werden die Deutsche Rohstoffagentur beauftragen, ein Monitoring kritischer Rohstoffe durchzuführen und regelmäßig über die Verfügbarkeit der für die deutsche Wirtschaft kritischen Rohstoffe zu berichten.“

Bei einem Ausblick auf das Jahr 2050 und einem potenziell sich vielfach ändernden Rohstoffprofil der deutschen Volkswirtschaft wird es immer wieder Situationen geben, in denen ein Land plötzlich eine dominierende Versorgungsposition einnimmt und versucht sein wird, in Handelsströme einzugreifen und Rohstoffe, trotz aller internationalen Handelsabkommen, politisch zu seinem Vorteil zu nutzen. Es ist aus den genannten Gründen auch in Zukunft davon auszugehen, dass es tendenziell weiterhin eher zu Konzentrationen als zur Diversifizierung in der Rohstoffwirtschaft kommen wird.

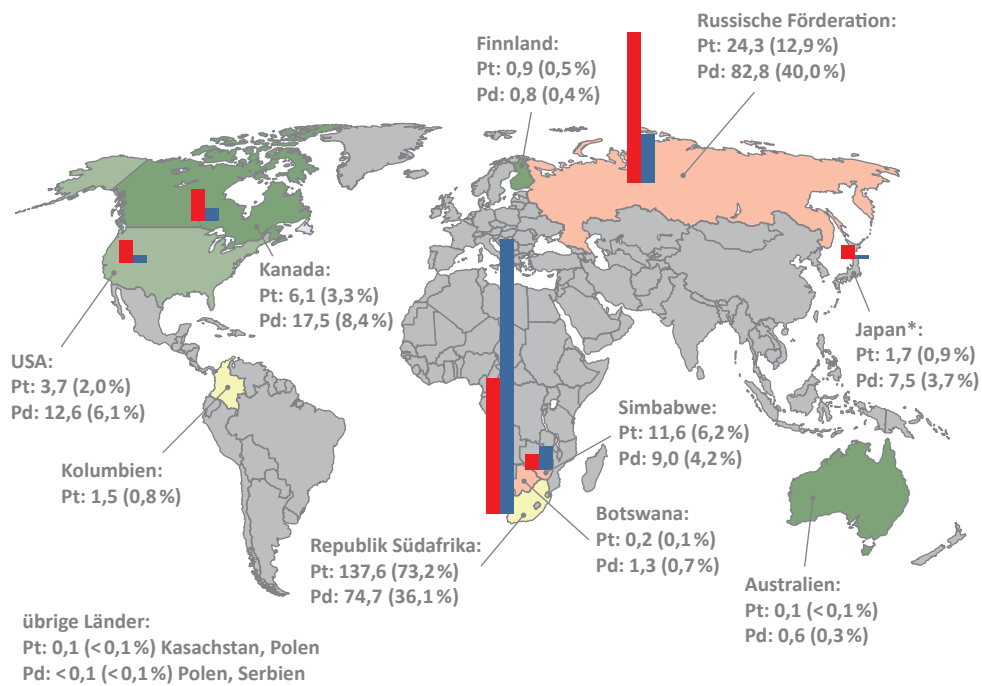
113 CDU/CSU/SPD 2013.

BOX IV: Konzentrationen und Länderrisiken

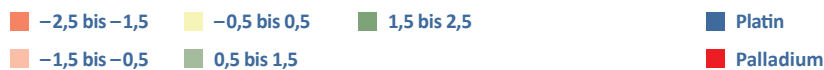
Geologisch bedingte Konzentrationen von Rohstoffvorkommen, insbesondere seltener Rohstoffe, oder auch Konzentrationstrends in der Produktion erleichtern die Oligopolbildung und machen es möglich, dass Länder oder Unternehmen den Rohstoffmarkt beeinflussen, beispielsweise durch Exportrestriktionen. Damit kann sich auch die Versorgungssicherheit verschlechtern. Dies zeigt sich etwa bei den Platinelementen Platin und Palladium: Betrachtet man die potenziellen Lieferländer, verfügen oftmals Staaten mit höherem Länderrisiko wie etwa Südafrika oder Russland über gute Lagerstätten und besonders große Produktionsanteile (Abbildung 3.14).

**Weltbergwerksförderung Platin (Pt) und Palladium (Pd) 2013
(in Tonnen beziehungsweise Prozent der Weltproduktion)**

Anteil der fünf größten Förderländer Pt: 183,3 t (ca. 97,6%)
Anteil der fünf größten Förderländer Pd: 196,6 t (ca. 94,8%)



Länderrisiko 2013 (Weltbank-Klassifikation, WGI)



*Die Pt/Pd-Produktion Japans erfolgt als Beiprodukt aus Nickelerzen, die aus Australien importiert werden

Abbildung 3.14: Ursachen von Rohstoff-Lieferrisiken am Beispiel der Platinelemente Platin und Palladium.¹¹⁴ Die potenziellen Lieferländer sind hier nach ihrem vom World Governance Index abgeleiteten Länderrisiko klassifiziert.

114 Nach Schmidt 2015, S. 72ff.

Um Konzentrationstrends zu beurteilen, hat die Deutsche Rohstoffagentur ein Diagramm entwickelt (Abbildung 3.15). Dieses stellt die regionalen Konzentrationen und Firmen-Konzentrationen mithilfe des sogenannten Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI) dar und setzt diese Konzentrationswerte zum sogenannten gewichteten Länderrisiko ins Verhältnis. Das gewichtete Länderrisiko für einen Rohstoff oder ein Zwischenprodukt ergibt sich aus den individuellen Risikoeinschätzungen für die einzelnen Lieferländer, die auf Basis des World Governance Index bestimmt werden. Diese Risikobewertung wird schließlich mit dem jeweiligen Anteil an der Weltproduktion gewichtet. Dabei wird unter anderem berücksichtigt, inwieweit ein Produzentenland politisch instabil ist oder wieviel Korruption es gibt. Je höher der HHI-Wert und/oder das Länderrisiko sind, desto unsicherer ist der Rohstoffbezug.

Ein interessantes Beispiel ist China. Einerseits ist die Rohstoffnachfrage in China seit der Jahrtausendwende enorm gestiegen. Andererseits ist China ein dominierender Rohstoffanbieter. Bei vielen Rohstoffen ist das Land der weltgrößte Bergbauproduzent, beispielsweise bei den Buntmetallen Blei, Zink, Zinn, den Stahlveredlern Mangan und Molybdän oder dem Düngemittelrohstoff Phosphat. Allein bei neun der von der EU als kritisch eingestuft Rohstoffe, den EU-14 beziehungsweise EU-20, konzentriert sich derzeit die Produktion stark in China, bei Antimon, Fluorapat (Fluorit), Gallium, Graphit, Germanium, Indium, Magnesium und den Seltene-Erden-Elementen.

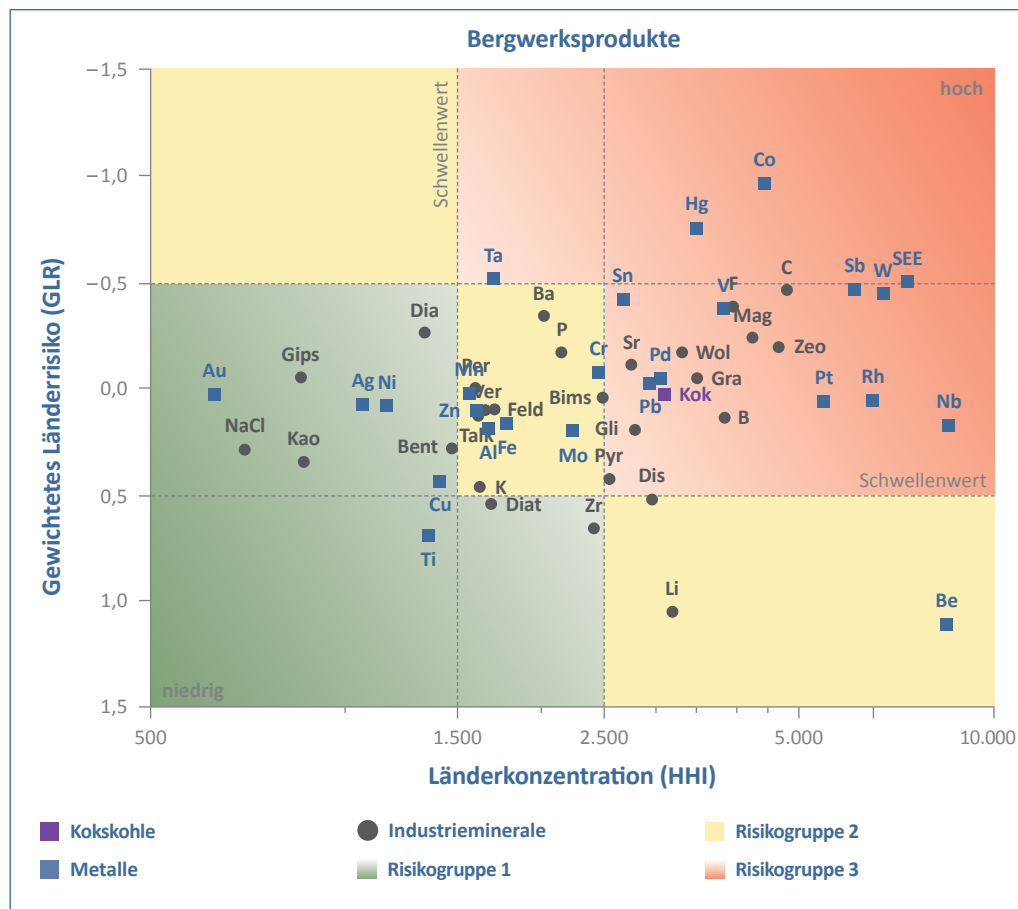


Abbildung 3.15: Versorgungssicherheit bei Rohstoffen.¹¹⁵ Die hier aufgeführten Rohstoffe lassen sich in drei Risikoklassen unterteilen: Grün entspricht einem geringen, gelb einem moderaten und rot einem hohen Versorgungsrisiko.

Rohstoffversorgung aus primären und sekundären Quellen

Das Rohstoffangebot besteht aus der primären Bereitstellung von Rohstoffen aus der Geosphäre durch Bergbau und der sekundären Gewinnung aus der Technosphäre durch Recycling. Die sekundäre Gewinnung bietet große, heute noch nicht ausgeschöpfte Rohstoffpotenziale, kann aber die Nachfrage allein nicht decken, weil der Bedarf weiter steigt. Daher muss der Bergbau derzeit und mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in Zukunft den wesentlichen Teil unseres Rohstoffbedarfs decken.

Die Lage der primären Lagerstätten hängt vor allem von den geologischen Bedingungen ab, daher konzentrieren sie sich in bestimmten Regionen. Sekundäre Lagerstätten entstehen hingegen vor allem in Metropolregionen, da dort die meisten Altmaterialien anfallen.

Bei den Bergbauunternehmen gibt es jeweils, wie in der Wirtschaft insgesamt, die Tendenz, sich durch Übernahmen zu vergrößern und Kostensynergien zu nutzen, also positive Skaleneffekte (Economies of Scale) zu erzielen. Junior-Explorationsfirmen leisten oft die Vorarbeit. Vor allem der Bau neuer Bergwerke ist sehr kostenintensiv. Dadurch konzentriert sich die globale Produktion auf wenige Firmen. Die Recyclingwirtschaft hat hingegen eine pyramidenförmige Struktur. Während am Sammeln von Altmaterialien mehrere tausend Akteure beteiligt sind, werden es mit zunehmendem Verarbeitungsgrad immer weniger. In der letzten Stufe, der Verhüttung (metallurgische Extraktion und Feindarstellung der Metalle), gibt es bei komplexen Recyclingmaterialien wie Elektronikkomponenten, Akkumulatoren oder Katalysatoren weltweit nur eine gute Handvoll Akteure, mit allerdings ausreichend großen metallurgischen Kapazitäten. Bei den höheren Verarbeitungsstufen gibt es in der Recyclingwirtschaft also ähnliche Konzentrationstrends wie im Bergbau.

Rohstoffe haben geostrategische Relevanz. Eine zu starke Konzentration kann den freien globalen Rohstofffluss gefährden. Beispielsweise können Produzentenländer durch Exportsteuern eine Angebotsverknappung hervorrufen, die Preisschläge nach sich zieht. Zu geringe Löhne oder Sozial- und Umweltstandards in bestimmten Ländern können den Wettbewerb verzerren.

Im Hinblick auf die Versorgungssicherheit ist es wichtig, solche Konzentrationstrends, die einen freien globalen Rohstofffluss gefährden könnten, zu beobachten. Zu diesem Zweck hat die Bundesregierung die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) eingerichtet und beauftragt, ein Monitoring kritischer Rohstoffe durchzuführen und regelmäßig über die Verfügbarkeit der für die deutsche Wirtschaft kritischen Rohstoffe zu berichten.

Die Industrie ist schließlich gefordert, ihre Versorgung mit Rohstoffen abzusichern, indem sie auf Warnsignale unter Berücksichtigung der notwendigen Zeitskalen in Form von Ausweichbeziehungsweise Flexibilisierungsstrategien und Schutzkonzepten reagiert. Ausweichstrategien sind beispielsweise der Einsatz alternativer Rohstoffe (direkte Substitution) oder Technologien (technologische Substitution), die Erhöhung der Materialeffizienz und Recycling, die Diversifizierung von Bezugsquellen oder eine ausreichende Lagerhaltung. Die Politik kann hierbei durch Rahmenbedingungen oder flankierende Maßnahmen beispielsweise in Form von Handelsabkommen, Forschungsförderung oder Finanzierungsabsicherungen unterstützend tätig werden. Auch eine aktive Rolle des Staates, wie sie zum Beispiel in Form der staatlichen Rohölreserve in Deutschland und anderen OECD-Ländern wahrgenommen wird, ist eine Option.

3.4.2 Politische und soziale Einflüsse auf das Angebot von Primärrohstoffen

Die ideale Rohstoffwelt wäre im Hinblick auf die Rohstoffversorgung¹¹⁶ eine Welt, in der Rohstoffe überall nach den gleichen Umwelt- und Sozialstandards produziert werden und ungehindert den Weg von den Produzenten zu den Märkten finden können – in welcher Veredlungsstufe auch immer. Von einer solchen idealen Rohstoffwelt ist man heute trotz aller Bemühungen der Politik, Standards zu harmonisieren, und insbesondere der Welthandelsorganisation, Handelshemmnisse zu beseitigen, weit entfernt und werden es voraussichtlich in Zukunft auch bleiben.

Politische Einflüsse

Die politische Einflussnahme ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass aufstrebende Entwicklungs- und Schwellenländer die Wertschöpfung in ihrem Lande erhöhen wollen und als Hilfsmittel Exportquoten und Exportzölle auf unveredelte Rohstoffe erheben.¹¹⁷ Das Beispiel Chinas und der Seltene-Erden-Elemente illustriert eine derartige Wettbewerbsverzerrung (Abbildung 3.16): Durch niedrige Preise der Seltene-Erden-Elemente wurde die bestehende Konkurrenz von 1993 an verstärkt vom Markt verdrängt. Als praktisch ein Monopol herrschte, verfügte China ab 2006 Exportquoten, die die Preise auf dem Weltmarkt 2011 im Einzelfall um den Faktor 100 emporschnellen ließen. Etwa 75 Prozent des Marktes für Fertigprodukte aus Seltene-Erden-Elementen, wie zum Beispiel Permanentmagnete, wird heute von China kontrolliert.¹¹⁸

Eine solche Verdrängung von primärer oder sekundärer Produktion kann aber auch durch unterschiedliche Niveaus bei Umwelt- und Sozialstandards in der Rohstoffgewinnung bedingt sein. Bei der Gewinnung von Metallen aus primären und sekundären Rohstoffquellen sollten Produzenten vor allem darauf achten, schädliche Emissionen, wie beispielsweise von Schwefeldioxid, Schwermetallen oder auch von radioaktiven Elementen, die zusammen mit den Seltene-Erden-Elementen auftreten, zu minimieren. Dies gilt insbesondere dann, wenn diese Rohstoffe für die „grüne“ Energieerzeugung eingesetzt werden sollen. Denn Umweltgefährdungen und Verschmutzungen am Anfang der Produktionskette würden die Glaubwürdigkeit der Green Economy aufs Spiel setzen. Nimmt man jedoch hohe Schadstoffemissionen und niedrige Sozialstandards in Kauf, lassen sich Wertstoffe deutlich günstiger produzieren. So war die Schließung der kalifornischen Seltene-Erden-Mine Mountain Pass im Jahr 2002 auch durch gestiegene Umweltauflagen bedingt. In Kalifornien ließen sich damals aufgrund des Preisdumpings in China die Seltene-Erden-Elemente nicht mehr wirtschaftlich abbauen. Zu einem Teil ist der derzeitige hohe Preis für Seltene-Erden-Elemente damit auch auf die Unterschiede bei den Umweltstandards in verschiedenen Ländern zurückzuführen. In ähnlicher Weise kommt es heute bei der Sekundärgewinnung von Rohstoffen auch häufig zu einem verzerrten Wettbewerb, da viele Recyclingbetriebe in Entwicklungs- und Schwellenländern nicht die für europäische Betriebe geltenden Umwelt- und Sozialstandards einhalten. Solche Standards aber sind wichtig. Die Beseitigung von Handelshemmnissen darf deshalb nicht zu Lasten einer umwelt- und sozialverträglichen Rohstoffproduktion gehen. Eine wirklich nachhaltige Energiewende lässt sich nur dann erreichen, wenn die Abnehmer der Rohstoffe entlang der Wertschöpfungskette

¹¹⁶ „Ideale Rohstoffwelt“ kann natürlich viel breiter gesehen werden, zum Beispiel gemäß der Forderung der Bundestags-Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ von 1998: „Nicht-erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren sowie der nicht-erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird.“. Wie diese Forderung in einer Marktwirtschaft umgesetzt werden kann, wird zum Beispiel von Wagner/Wellmer (2009) diskutiert.

¹¹⁷ BDI 2015, S. 21f.

¹¹⁸ Fischer 2014.

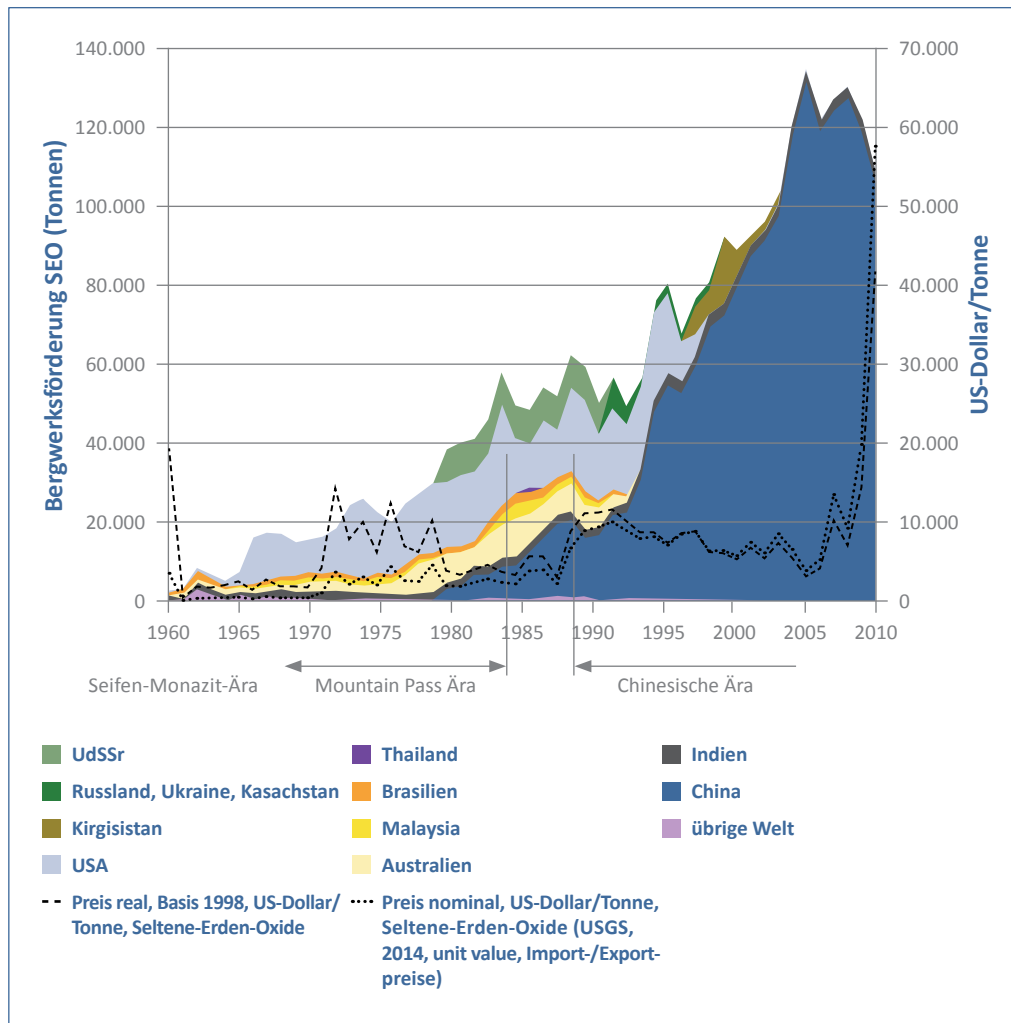


Abbildung 3.16: Länderverteilung der Bergwerksförderung (linke Skala) und Preisentwicklung (rechte Skala) bei den Seltene-Erden-Oxiden (SEO).¹¹⁹ Bezogen auf die rechte Skala gibt die gelbe Linie den realen Preis auf Basis des Jahres 1998 und die schwarze Linie den nominalen Preis jeweils in US-Dollar pro Tonne an. Die Dominanz bei der Produktion von Seltene-Erden-Elementen wechselte mit der Zeit. Ab Mitte der 1980er Jahre begann China die führende Rolle zu übernehmen. Zu Beginn waren weltweit Lagerstätten auf Basis des Minerals Monazit und später vor allem die USA auf Basis des Minerals Bastnäsit aus der kalifornischen Mountain Pass Mine die Hauptproduzenten. Seit Mitte der 1990er Jahre hat China quasi eine Monopolposition für den Seltene-Erden-Markt.¹²⁰

bis hin zum Verbraucher darauf drängen, dass diese Standards weltweit eingehalten werden.

Preisanalyse der Zwischenprodukte

Bei einer Risikoanalyse in Bezug auf Versorgungssicherheit mit akzeptablem Preisniveau dürfen nicht die Rohstoffe allein betrachtet werden. Ebenso wichtig ist es, die Preise und Versorgungsrisiken der Zwischenprodukte zu analysie-

ren. Das zeigt das Beispiel Wolfram, für das die Deutsche Rohstoffagentur eine Risikoanalyse durchgeführt hat (Abbildung 3.17). Für niedrig veredelte Stufen von Wolframerzen beziehungsweise für Wolframerzkonzentrate gibt es in China überhaupt keine Exportquoten mehr. Die höchsten Veredelungsstufen (zum Beispiel Ferrowolfram) beziehungsweise Zwischenprodukte mit entsprechendem Anstieg im Reinheitsgrad (Wolframoxide/-hydroxide) hingegen zeigen zum Teil starke Konzentrationstrends. Sie weisen also einen hohen HHI-Wert auf. Zudem

¹¹⁹ Liedtke/Elsner 2009; aktualisiert nach BGR 2014-1.
¹²⁰ Da sich die Produktionsphasen zum Teil erheblich überlappen, spiegeln die markierten Bereiche die jeweilige Hochphase wider.

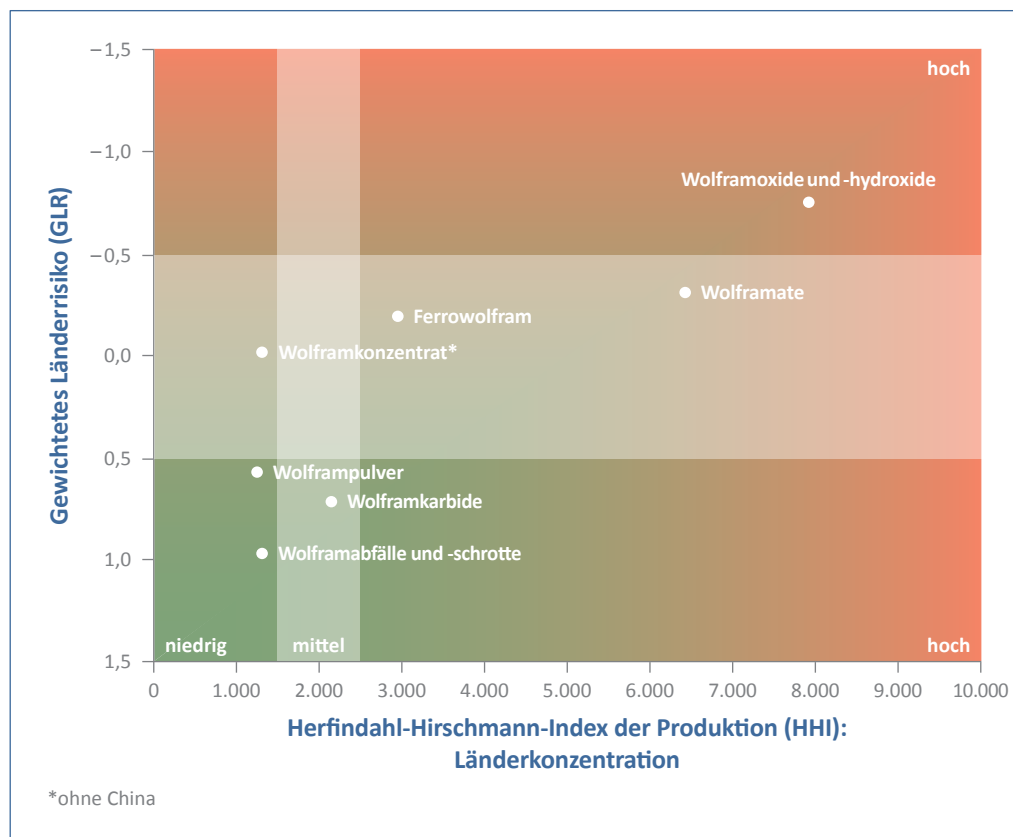


Abbildung 3.17: Differenzierung des Versorgungsrisikos entlang der Wertschöpfungskette am Beispiel von Wolfram.¹²¹ Berücksichtigt man bei der Produktion von Wolfram die unterschiedlichen Veredelungsstufen, ergeben sich für die globalen Wolframexporte verschiedene Werte bei der Länderkonzentration und dem gewichteten Länderrisiko. Tendenziell sind in Bezug auf die Rohstoffversorgung vor allem die höheren Veredelungsstufen mit höheren Risiken behaftet.

stammen sie zum großen Teil aus Ländern mit hoher Risikobewertung, also niedrigen beziehungsweise negativen Werten des gewichteten Länderrisikos. Entsprechend ergeben sich teilweise hohe Preis- und Lieferrisiken: Wolframate werden beispielsweise zu 91 Prozent in China hergestellt, Wolframoxide stammen dagegen zu 52 Prozent aus Taiwan und 47 Prozent aus China.¹²²

Zu betonen ist, dass die Versorgungsrisiken bei einigen metallischen Rohstoffen beispielsweise im Vergleich zu fossilen Energieträgern wie Erdöl oder Erdgas oftmals deutlich größer sind: Der Herfindahl-Hirschman-Index für Erdöl liegt bei knapp 2.000 (mittlere Angebots-

konzentration¹²³), bei vielen potenziell kritischen mineralischen Rohstoffen für die Energiewende liegt dieser Wert bei weit über 2.500 (ab hier wird die Angebotskonzentration als hoch eingestuft; vergleiche Abbildung 3.17). Dies bedeutet also eine viel höhere Angebotskonzentration der Produktion als bei Erdöl.

Eine betroffene Industrie kann sich gegen Wettbewerbsverzerrungen der hier beschriebenen Art nur schützen, indem sie Schutzkonzepte und Ausweichstrategien entwickelt. Dazu zählen beispielsweise eine ausreichende Lagerhaltung, eine Diversifizierung der Bezugsquellen und Flexibilisierungsstrategien, wie die Schaffung von Substitutionsmöglichkeiten, sodass die Industrie ohne den Rohstoff oder mit geringeren Mengen auskommen

¹²¹ Modifiziert und aktualisiert nach Liedtke/Schmidt 2014, S. 59.

¹²² Buchholz et al. 2015.

¹²³ Die OPEC wird in die Berechnung dabei als ein Land agierend einbezogen.

BOX V: Borat – in Zukunft ein kritischer Rohstoff?

Wie sich eine Substanz künftig zu einem kritischen Rohstoff entwickeln könnte, lässt sich in einem Gedankenexperiment am Beispiel von Borat verdeutlichen. Derzeit ist Borat ein Rohstoff ohne politische Bedeutung. Dennoch ist Borat interessant, weil es zum Beispiel Antimon als Flammschutzmittel ablösen könnte. Antimon gehört derzeit aufgrund der hohen Konzentration in China, zu den EU-14/EU-20-kritischen Rohstoffen. Die Industrie sucht deshalb nach Substitutionsmöglichkeiten für Antimon. Dazu könnten auch Borate zählen.¹²⁴ Die zwei mit Abstand größten Boratproduzenten sind die Türkei (über fünfzig Prozent) und die USA. Die Regierung der Türkei sieht Borat als strategischen Rohstoff an und kontrolliert es entsprechend. In diesem Gedankenexperiment wird angenommen, dass bis 2050 eine Energietechnologie entwickelt wird, bei der Borate von kritischer Bedeutung sind. Damit würden die Borate, ganz anders als heute, eine politische Bedeutung bekommen. Für ein Produzentenland ergäben sich damit ganz andere wirtschaftspolitische Möglichkeiten als heute. Dieses Beispiel ist keineswegs unrealistisch. So nimmt derzeit der Einsatz von Permanentmagneten (Eisen-Bor-Neodym-Magnete) für erneuerbare Energietechnologien¹²⁵ und die damit verbundene Nachfrage nach Borat zu, sodass sich künftig möglicherweise Borat zu einem kritischen Rohstoff entwickeln könnte.

kann. In Deutschland und den anderen OECD-Ländern wird beispielsweise in der Vorhaltung von ausreichend Rohöl (nicht aber beim Erdgas) eine staatliche Aufgabe gesehen (staatliche Rohölreserve, die nicht nur Rohöl, sondern auch Produkte einschließt).

Wenn auch politische Gegenmaßnahmen auf nationaler oder multinationaler Ebene (EU; WTO) unter Umständen erfolgreich sein mögen, um Wettbewerbsverzerrungen zu beseitigen, kurzfristig und schnell sind sie es in der Regel nie.¹²⁶ In einer Analyse für die US-amerikanische Energieindustrie, die zum Ziel hatte, Flexibilisierungs- und Ausweichstrategi-

en für kritische Rohstoffe zu untersuchen, konnten hinsichtlich des Einsatzes von Seltene-Erden-Elementen in Katalysatoren für die Erdölverarbeitung exemplarisch Lösungen aufgezeigt werden.¹²⁷

Soziale Einflüsse

Neben diesen politischen Unwägbarkeiten, die sich aus den für Rohstoffe typischen Konzentrationstendenzen ergeben, gibt es weitere Unsicherheiten bei der zukünftigen Rohstoffversorgung. Dazu zählen vor allem auch sozioökologische Aspekte.

Ein wesentlicher Aspekt ist die Tatsache, dass die Bevölkerung in Deutschland und auch in anderen Ländern immer weniger Verständnis für die Notwendigkeit der Rohstoffgewinnung aufbringt. Das liegt vor allem daran, dass der Bezug zur Rohstoffgewinnung verloren geht, weil viele mineralische Rohstoffe nur noch im Ausland abgebaut werden. Zudem sind die Anwendungsgebiete einzelner Rohstoffe heute nicht mehr so klar wie früher. Wo einzelne Rohstoffe benötigt oder verarbeitet werden, ist für

¹²⁴ Firebreak 2013.

¹²⁵ Siemens 2014.

¹²⁶ Zu erwähnen sind hier beispielsweise die durch die WTO in jüngster Zeit beigelegten Beschwerden hinsichtlich von Handelsbeschränkungen auf verschiedene Rohstoffe seitens Chinas. Zum einen war dies ein Schlichtungsverfahren bezüglich Seltener-Erden-Elemente, Wolfram und Molybdän, das sich von März 2012 bis Mai 2015 erstreckte (WTO 2014 Beilegungsverfahren - Dispute Settlements DS431, DS432, DS433). Zum anderen ein Verfahren von Juni 2009 bis Dezember 2012, welches viele Rohstoffe (zum Beispiel gelben Phosphor, Magnesium, Mangan und Zink) betraf, bei denen China der Hauptproduzent ist (WTO 2012 Dispute Settlement DS394, DS395, DS398).

¹²⁷ DOE 2011-1.

Außenstehende kaum mehr ersichtlich. Zu kleinteilig und komplex ist der Einsatz von Produktkomponenten heute. Von den industriellen Produkten, wie Fernseher, Autos oder Smartphones, hat jeder Mensch einer technischen Gesellschaft eine Vorstellung. Aber nur wenige werden wissen, wofür man Zink, Wolfram oder Antimon braucht und in welchen Produkten wieviel von diesen Rohstoffen steckt. Die Rohstoffgewinnung ist für viele Menschen, insbesondere in industriell hoch entwickelten Nationen wie Deutschland, oftmals eine abstrakte und scheinbar selbstverständliche Dienstleistung, die mit dem angestrebten gesellschaftlichen Wohlstand und dem technologischen Fortschritt nicht mehr in Verbindung gebracht wird.

In den rohstoffreichen Ländern wiederum, in denen Rohstoffe abgebaut werden, sind die Auswirkungen des Bergbaus kaum vermittelbar. So sind vom Abbau oftmals indigene Bevölkerungsgruppen betroffen, die die Rohstoffe meist gar nicht selbst nutzen. In der Mongolei zum Beispiel gibt es noch nomadisch lebende Bevölkerungsgruppen, in deren Kultur die Verehrung der Natur einen hohen Stellenwert hat. In Australien wiederum ist das Leben der Aborigines durch den Uranabbau berührt – und das, obwohl die Australier keine Kernkraftwerke besitzen, um das Uran selbst zu nutzen. Es wird also nur für den Export gewonnen.

Wie stark eine Bevölkerung den Bergbau im eigenen Land akzeptiert oder ablehnt, hängt von vielerlei Faktoren ab: vom Entwicklungsstadium des Landes und der wirtschaftlichen Abhängigkeit von der Rohstoffproduktion, von Devisen- und Steuereinnahmen, Arbeitsplätzen und Infrastrukturentwicklung, die der Bergbau generiert. Für die Bevölkerung eines rohstoffreichen Landes kann die Rohstoffgewinnung also diverse Vor- und Nachteile haben. Die mit dem Bergbau oftmals einhergehenden Interessenkonflikte

sind von Land zu Land verschieden und meist sehr komplex. Eine nachhaltige und sozioökologisch akzeptable Rohstoffgewinnung lässt sich nur etablieren, indem die verschiedenen Interessen berücksichtigt werden. Auf der Suche nach möglichst allgemeinverträglichen Lösungen, sind die Aspekte in einem offenen und objektiven Entscheidungsprozess zu diskutieren und gegebenenfalls abzuwägen.

Vom Rohstoffland zur Dienstleistungsgesellschaft

Alle heutigen Industrienationen waren einst auch Rohstoffproduzentenländer (Abbildung 3.18). Wichtige Industrieländer, wie Deutschland, Frankreich oder Großbritannien, waren in der Vergangenheit bedeutende Bergbauländer. Im Laufe der Industrialisierung verschoben sich dann die Produktionsfaktoren von der Primärproduktion (Bergbau, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei) immer mehr in den sekundären industriellen Sektor und weiter in den tertiären Dienstleistungssektor. Dies spiegelt sich in den Materialintensitäten wider (siehe Kapitel 3.3.1): Der Anteil des Bergbaus am Bruttoinlandsprodukt nimmt immer weiter ab.

Zugleich verliert die Rohstoffindustrie an Bedeutung. Bezeichnenderweise gibt es in Deutschland und anderen Verbraucherländern kein eigenständiges Bergbauministerium mehr. Stattdessen liegt die Rohstoffgewinnung in der Zuständigkeit des Wirtschaftsressorts. In Bergbauländern wie Kasachstan, Namibia oder Bolivien sowie selbst in Kanada, als einem bedeutenden, rohstoffreichen Industrieland, gibt es heute hingegen eigene Ministerien für Natural Resources.

Der gleiche Trend ist beim Rohstoffverständnis in der Gesellschaft zu verfolgen: In Kanada oder Australien ist das Wissen um die Bedeutung von Rohstoffen sehr viel weiter verbreitet als in Europa. Regelmäßig wird in der Presse über Bergbauunternehmen und Rohstoffprobleme

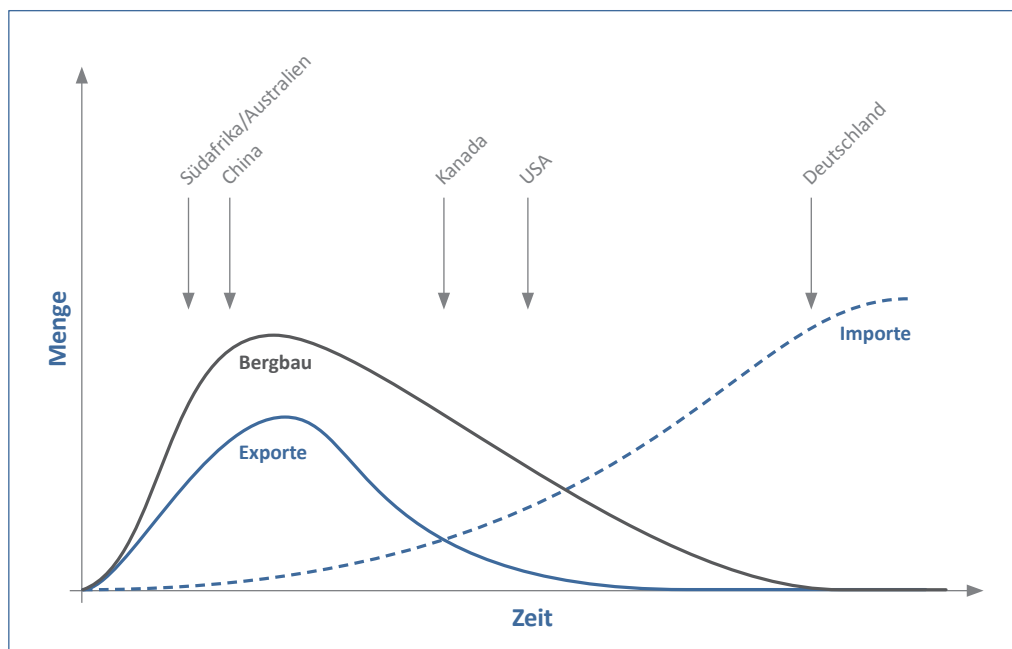


Abbildung 3.18: Entwicklung vom Rohstoffproduzenten zum importabhängigen Industrieland.¹²⁸ Beispielhaft sind hier den verschiedenen Stadien Länder zugeordnet.

berichtet. Die wöchentlich erscheinende kanadische Fachzeitschrift *The Northern Miner*, die über Bergbau- und Explorationsfirmen informiert, genießt im Alltagsgeschehen insbesondere im nördlichen Kanada einige Popularität. Die Spekulation mit den sogenannten Penny Stocks der kleinen Explorationsgesellschaften ist in Kanada, mit der Toronto Stock Exchange als größter Bergbau- und Explorationsaktienbörse der Welt, und Australien ein Volkssport, der mit unserem Toto und Lotto vergleichbar ist. Die Menschen hoffen dabei auf eine große Entdeckung und damit auf extreme Kurssteigerungen der Aktien. Viele Menschen verfolgen daher die Aktivitäten dieser Gesellschaften Tag für Tag in der Presse sehr genau.

Rohstoffe – eine Selbstverständlichkeit?

In Deutschland hingegen herrscht, abgesehen vielleicht vom Erdöl, allgemein wenig Interesse an Rohstoffthemen. Andererseits erregen hierzulande Bücher und Zeitungsartikel über Rohstoffknappheiten immer wieder große Aufmerksamkeit.

Nach den Exportbeschränkungen für Seltene-Erden-Elemente aus China, die die Preise 2011 emporschnellen ließen, kannten selbst Laien in Deutschland die Namen der Seltene-Erden-Elemente Neodym oder Dysprosium, die zum Beispiel in den Permanentmagneten von Windkraftanlagen eingesetzt werden. Auch plötzliche Änderungen in der Weltrohölversorgung durch Importembargos oder kriegerische Ereignisse, die sich in schnellen Benzinspreiserhöhungen niederschlugen, führen zu kurzzeitigen öffentlichen Diskussionen. Letztlich sind die erzeugten diffusen Ängste über bevorstehende Rohstoffknappheiten aber eher ein Hinweis darauf, wie entfernt die Menschen in Deutschland und anderen Verbraucherländern von den tatsächlichen Problemen der Rohstoffgewinnung und -versorgung sind. In diesem Kontext werden an erster Stelle meist nur die Risiken und Umwelteingriffe gesehen. Dabei wird kaum realisiert, dass es durchaus notwendig und sinnvoll sein könnte, im eigenen Land unter Einhaltung höchster Umweltstandards selber Primärrohstoffe zu gewinnen. Immerhin ließe sich dadurch eine Diversifizierung bei der Rohstoffversorgung erreichen. Dies hätte

¹²⁸ Modifiziert nach Skinner 1979.

den positiven Nebeneffekt, dass Deutschland mit gutem Beispiel vorangehen und hohe Umweltstandards für ausländische Betriebe setzen würde.

Mit Bergbau assoziieren viele Menschen die drei „Ds“ – „dark, dirty, dangerous“.¹²⁹ Man kann sagen, dass dem Bergbau ein allgemeingültiges Negativimage angeheftet wird.¹³⁰ Viele verbinden damit nicht nur Umweltzerstörung, sondern auch ein Image der Gefährlichkeit für die Bergleute. So wird das Image in weiten Kreisen der Bevölkerung bestimmt durch spektakuläre Grubenunfälle. Bis heute erinnern sich viele zum Beispiel an den Einbruch eines Schlamnteiches in das Grubengebäude der Eisenerzgrube Lengede im Oktober 1963. Als „Wunder von Lengede“ wurde vor wenigen Jahren die anschließende Rettung von elf Bergleuten nach 14 Tagen über ein Großbohrloch verfilmt. Zu den wohl bekanntesten Grubenunglücken der jüngeren Zeit, zählt der Bergschlag, der sich im August 2010 in St. José im nördlichen Chile ereignetet. Dabei wurden 33 Bergleute eingeschlossen und erst nach 69 Tagen ebenfalls über ein Großbohrloch gerettet. Diese Ereignisse sollten jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass statistisch gesehen die Arbeit in den Bergbaubetrieben der westlichen Industrieländer relativ sicher ist: Die Unfallhäufigkeit in der deutschen rohstoffgewinnenden Industrie ist niedriger als im Durchschnitt die der gewerblichen Wirtschaft.¹³¹ Die hohe Priorität der Unfallvermeidung gilt allerdings sicherlich nicht überall auf der Welt, insbesondere nicht im mittleren, kleinen oder insbesondere dem artisanalen¹³² Bergbau vieler Entwicklungsländer.

129 Goskowski 2011, S. 109.

130 So urteilt zum Beispiel Moody 2015, S.11: „Bergbau hat immer nachteilige Folgen für lokale Gemeinschaften, ihren Lebensunterhalt und die Biosphäre.“

131 DGUV 2000-2012; DGUV 2014.

132 Artisanaler Bergbau ist Kleinbergbau ohne industrielle Methoden. Der Bergbau und die Erzaufbereitung finden manuell und meist nur mit einfachsten mechanischen Techniken und seltener unter Verwendung von Maschinen statt.

Neben dem stereotypen Image der Gefährlichkeit trägt insbesondere die intensive Berichterstattung der Medien über Umweltschäden zum Negativimage der Rohstoffgewinnung bei – vor allem in Deutschland. Entsprechend dominieren Berichte über Umweltkatastrophen wie den Dambruch eines Teiches mit Aufbereitungsabgängen in der Blei-Zinkgrube von Los Frailes (Aznalcollar/Spanien) im April 1998. Intensiv berichtet wurde auch über die Cyanidkontamination durch das Goldbergbauprojekt Baia Mare in Rumänien im Januar 2000. Und die aktuelle Debatte um das Fracking zeigt exemplarisch, wie beispielsweise durch Öl- und Gasbohrungen latent Ängste erzeugt werden, weil viele Menschen nur wenig darüber wissen, was im Untergrund passiert. Doch anders als durch die Berichterstattung suggeriert, führt nur ein Bruchteil der Bergbauprojekte zu Umweltschäden größeren Ausmaßes.

Eingriff in die Landschaft

Obwohl Deutschland der größte Braunkohleförderer weltweit und quasi selbstversorgend bei Baurohstoffen ist, ist der Landschaftsverbrauch durch die Rohstoffgewinnung hierzulande gering: Insgesamt wird der für die mittel- und langfristige Rohstoffsicherung erforderliche Flächenbedarf in Deutschland auf weniger als ein Prozent der Gesamtfläche geschätzt. Das Flächenäquivalent für die im Jahr 2013 genutzte Rohstoffmenge betrug circa 25,2 Quadratkilometer, das heißt circa 0,007 Prozent der Gesamtfläche als wirkliche Abbaufäche. Die meisten Flächen werden im Gegensatz zum Siedlungs- und Verkehrswegebau jedoch nicht auf Dauer in Anspruch genommen, das heißt sie stehen der Gesellschaft nach wenigen Jahrzehnten für andere Nutzungszwecke wieder zur Verfügung.¹³³

Natürlich ist jedes Bergbauprojekt mit einem Eingriff in die Landschaft verbunden, selbst wenn der Rohstoff, wie beim Erdöl oder Erdgas, mit Bohrungen

133 BGR 2014-2.

unter sehr geringem Landschaftsverbrauch gewonnen wird. Doch die großen Umweltschäden bei der Rohstoffgewinnung bleiben eine Ausnahme. Um das Wesen des Bergbaus besser zu verstehen, muss man zwischen dem Tiefbau und dem Tagebau unterscheiden. Beim Tagebau werden die Rohstoffe direkt an der Erdoberfläche abgebaut, beim Tiefbau hingegen baut man die Rohstoffe unter der Erde, also untertage, ab.

Der Untertagebau verbraucht vergleichsweise sehr wenig Landschaftsfläche. Er benötigt aber auch technische Anlagen, wie Schacht- und Aufbereitungsanlagen oder die Teiche für Aufbereitungsabgänge, an der Erdoberfläche. Diese sind in der Erscheinung vergleichbar mit anderen Industrieanlagen. Darüber hinaus ergeben sich beim Tiefbau im Laufe der Zeit keine Änderungen mehr an der Erdoberfläche, die für den Laien sichtbar wären. Es gibt hervorragende Beispiele für eine sensible Anpassung von Bergbauanlagen an die Landschaft, die bei der lokalen Bevölkerung hohe Akzeptanz genießen.¹³⁴ Beispiele wären der Wolframabbau im Gebiet der Hohen Tauern in Österreich oder die Flussspat/Schwerspat-Grube Clara im Schwarzwald bei Wolfach, die beweisen, wie mit minimalem Umwelteingriff in sensiblen Landschaften Bergbau betrieben werden kann. Auch bei der Aufbereitung von Rohstoffen wird heute in vielen Fällen die Landschaft geschützt, beispielsweise, indem die Rohstoffe nicht direkt in der Bergbauregion, sondern in etablierten Industrierevieren aufbereitet werden.

Ganz anders beim Tagebau: Für die Menschen ist täglich sichtbar, wie der Tagebau, etwa bei der Braunkohle, die Landschaft verändert. Dörfer müssen umgesiedelt werden. Die Flächen stehen Jahrzehnte lang nicht für eine Nutzung zur Verfügung. Die Spätfolgen des Tagebaus, wie zum Beispiel der Einfluss auf die

Gewässerstruktur, sind teilweise schwer abschätzbar, sodass diese Eingriffe von der Bevölkerung oft nicht toleriert werden, vor allem auch wegen des empfundenen „Heimatverlustes“. Hinzu kommt beim Braunkohlenbergbau, dass viele Menschen die Kohleverstromung aus Gründen des Klimaschutzes ablehnen. Zwar hat das Bundesverfassungsgericht mit seinem Urteil zum Braunkohlentagebau vom Dezember 2013¹³⁵ die Bedeutung der Versorgungssicherheit und damit die Bedeutung eines heimischen Bergbaus in Deutschland hervorgehoben und die Bergbauindustrie gestärkt, aber der weltweite Trend, Rohstoffabbau abzulehnen, ist eindeutig. Zwar müssen die Braunkohletagebauflächen wieder renaturiert werden, wodurch oft attraktive Landschaften mit neu geschaffenen Seen entstehen. Doch der Eingriff in die Umwelt und in lokale Gesellschaftsstrukturen ist durch die zeitweilige Nutzung der Flächen in Summe erheblich.

Die ablehnende Haltung ist nicht nur in dicht besiedelten Ländern wie Deutschland und anderen Staaten in Zentral- und Westeuropa zu spüren. Selbst in Bergbauländern wie Kanada und Australien gibt es immer häufiger Widerstände gegen Bergbauentwicklungen. In manchen Fällen machen sich diese bereits bei der Rohstoffsuche bemerkbar, sogar in den klassischen Rohstoffländern. Zum Beispiel war in den 1970er Jahren in der kanadischen Provinz Quebec, in der der größte Teil der Bevölkerung im Süden entlang des Sankt Lorenz-Stroms lebt und der Norden größtenteils menschenleer ist, etwa ein Prozent der Landesfläche von Explorationsberechtigungen ausgeschlossen. Im Jahr 2011 waren es aus unterschiedlichen Gründen knapp 18 Prozent.¹³⁶

Zu Widerständen kommt es allerdings am meisten, wenn es sich um Tagebauprojekte handelt – besonders in

¹³⁴ Nelles 2008; Werner 2012; Wellmer 2012-1.

¹³⁵ BVerfG 2013.

¹³⁶ Gauthier 2012.

Gebieten der indigenen Bevölkerung. So stellt sich die Frage, ob der in der Bergbauplanung zu beobachtende Trend, Tiefbaue in immer größere Tagebaue umzuwandeln, um in den Genuss der Economies of Scale¹³⁷ zu gelangen, nicht langfristig ein Irrweg ist. Wie bereits beschrieben, hängt die Akzeptanz für Bergbauprojekte von verschiedenen Faktoren ab und ist von Ort zu Ort unterschiedlich. Dies zeigen auch die folgenden Beispiele für den Trend, „Tiefbau in Tagebau“ zu verwandeln. Im westaustralischen Goldbergbaubezirk von Kalgoorlie sind verschiedene Tiefbaugruben zum Tagebau, der sogenannten Super-Pit-Goldmine, umgewandelt worden. Die lokale Bevölkerung ist hier zwar alteingesessen, lebt aber seit jeher nur vom Bergbau. Sie besitzt daher eine große Akzeptanz für den Bergbau. Eine Umwandlung der südaustralischen Kupfer-Gold-Urangrube Olympic Dam in einen Riesentagebau, wo die Gegend vor dem Bergbau praktisch menschenleer war, ist derzeit auf Eis gelegt. Hieran zeigt sich, dass es in großen Bergbaunationen zu einem Umdenken kommt.¹³⁸ Dass neue Grubenprojekte aber selbst im klassischen Bergbauland Australiens längst nicht immer willkommen geheißen werden, zeigt sich bei Protesten zum Beispiel gegen Kohletagebaue und für den Kohleexport notwendige Hafenentwicklungen in Queensland, Australien. Vor diesem Hintergrund erscheint die Entwicklung in Österreich, wo aus Umweltgesichtspunkten teilweise von Tagebauen in Tiefbaue übergegangen wird, als eine interessante Alternative. Derartige Bestrebungen können dazu beitragen, Rohstoffe selektiv zu gewinnen, ohne die Landschaft zu zerstören. Dies könnte einem negativen Umweltimage entgegenwirken und die gesellschaftliche Akzeptanz für den

Bergbau erhalten beziehungsweise steigern. Der Übergang zu mehr Tiefbau statt Tagebau könnte durch die Entwicklung von hochleistungsfähigen Untertagemaschinen unterstützt werden.

Grundsätzlich gilt, dass sich die Akzeptanz für den Bergbau durch Aufklärungsmaßnahmen, die Einbeziehung der Bevölkerung und Innovationen steigern lässt. Wer der Bevölkerung glaubhaft wieder vermittelt, dass Rohstoffe eine wesentliche Grundlage für jede Gesellschaft sind, kann eine ablehnende Haltung aufbrechen.

Widerstand in Entwicklungs- und Schwellenländern

Bisher wurde die Akzeptanzfrage zu wenig berücksichtigt und es regen sich auch in den rohstoffreichen Schwellen- und Entwicklungsländern, die wirtschaftlich oftmals stark von der Rohstoffgewinnung abhängig sind, Widerstände. Zu offensichtlich sind die Sünden des Bergbaus der Vergangenheit. Oft hat der Bergbau zerrüttete Sozialstrukturen und Altlasten hinterlassen, wie sich in den klassischen Bergbauländern Südamerikas (Bolivien, Chile und Peru) an vielen Stellen beobachten lässt.¹³⁹ Für die Philippinen wiederum weist das katholische Hilfswerk Misereor schon jetzt auf die absehbaren Probleme der geplanten Kupfer-Gold-Grube Tampakan hin.¹⁴⁰ Hierfür müssen rund 5.000 Menschen umgesiedelt werden, meist aus der indigenen Bevölkerung. Schon heute, während des Explorationsstadiums, gibt es daher soziale Konflikte. Von der Exploration bis zur Rekultivierung des Landes nach der Stilllegung eines Bergwerks – in allen Phasen des Bergbaus können Menschenrechtsverletzungen auftreten.¹⁴¹

In vielen Fällen schafft der Bergbau in Entwicklungs- und Schwellenländern Inseln wirtschaftlicher Aktivität, die

¹³⁷ Mit „Economies of Scale“ wird ein Effekt der profitorientierten Wirtschaftsentwicklung bezeichnet: Durch die Bearbeitung immer größerer Einheiten lassen sich die Fixkosten und damit die Gesamtbetriebskosten reduzieren. Da die Maschinen für den Tagebau sehr schnell immer leistungsfähiger geworden sind (es werden heute LKWs mit bis zu 400 Tonnen Traglast eingesetzt, vor dreißig Jahren hatten die größten LKWs eine Kapazität von 150 Tonnen) bieten sich Tagebaue für diesen Weg besonders an.

¹³⁸ Rankin 2015.

¹³⁹ Misereor 2013.

¹⁴⁰ Hamm et al. 2013.

¹⁴¹ BGR 2016-1.

die sozialen Unterschiede in der Bevölkerung zementieren oder vergrößern, ohne auf die Gesamtentwicklung einer Region oder eines Landes auszustrahlen.¹⁴² Angesichts dieser Missstände haben sich heute die großen internationalen Bergbaufirmen in der Regel zur Corporate Social Responsibility (CSR, heute besser als Social Investment (SI) bezeichnet) und zu Umweltstandards verpflichtet. Sie arbeiten nach international anerkannten Standards¹⁴³, wie zum Beispiel dem International Council of Mining & Metals (ICMM)¹⁴⁴, einer internationalen Initiative von Firmen und Bergbaugesellschaften verschiedener Staaten. Nach Information des ICMM werden 30 bis 40 Prozent der Weltproduktion von den hier angeschlossenen Firmen gefördert.¹⁴⁵ Hinzu kommt ein international etablierter Standard zur Berichtspflicht von Unternehmen, der Global Reporting Initiative¹⁴⁶. Die GRI ist eine unabhängige, internationale Organisation, die 1997 unter Beteiligung des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet wurde. Ihre Bestrebung ist, wirtschaftliche Prozesse nachhaltiger zu gestalten, indem durch Evaluierungskampagnen von Wirtschaftsprozessen Aufklärungsarbeit geleistet wird. Die GRI unterhält für den Bergbau einen eigenen Berichtssektor, den Mining and Metals Sector Supplement. Trotz dieser Bemühungen gibt es nach wie vor Probleme. So werden überproportional große Umweltschäden oft von mittelgroßen oder kleinen Bergbauunternehmen verursacht, die nur einen geringen Anteil an der Weltproduktion haben. Diese halten sich oftmals nicht an CSR- oder ICMM-Vorgaben.

142 Misereor 2013.

143 commdev.org 2015: Übersicht über im Bergbau relevante soziale Standards, die international anerkannt sind, wie zum Beispiel International Finance Corporation (IFC), International Labor Organisation (ILO).

144 ICMM 2015.

145 Um diesen Anteil an der Weltproduktion zu werten, gilt zu beachten, dass China heute der weltweit größte Bergbauproduzent ist. Zum ICMM gehören keine chinesischen Firmen.

146 GRI 2014.

Hohe Standards für den künftigen Bergbau

ICMM wurde 2001 gegründet, um die Umwelt- und Sozialstandards im Bergbausektor weiter zu erhöhen. In diesem Kontext ist auch das Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development (IGF)¹⁴⁷ zu nennen, das von Südafrika und Kanada ko-finanziert wird. Es hat das Ziel, einen „Globalen Dialog“ anzuregen, mit dem die für den Bergbau relevanten Forderungen des Weltnachhaltigkeitsgipfels von Johannesburg umgesetzt werden sollen. Ein weiteres Ziel des IGF ist es, weltweit Sozial- und Umweltstandards umzusetzen. Seit der Gründung des IGF im Jahr 2005 ist die Anzahl der Mitgliedsstaaten von 25 auf derzeit 52 gewachsen.

Angesichts der beim Bergbau nun einmal notwendigen Landschaftseingriffe und der Vorbehalte gegen den Rohstoffabbau ist es eine Herausforderung, in der Bevölkerung eine Akzeptanz für den Bergbau, die sogenannte „Social Licence to Operate“¹⁴⁸, zu erhalten und aufzubauen – und somit gesellschaftlich legitimiert primäre und sekundäre Rohstoffgewinnung betreiben zu können. Die dafür notwendige Verbesserung von Umwelt- und Sozialstandards im Bergbausektor dürfte für die rohstoffgewinnende Industrie im internationalen Kontext eine große, wenn nicht die größte Zukunftsaufgabe sein. Das gilt im besonderen Maße auch für die Rohstoffversorgung für die Energiesysteme der Zukunft. Weltweit zertifizierte Handelsketten (Certified Trading Chains, CTC) auf der Basis von transparenten, nachvollziehbaren und ethisch akzeptablen Produktionen und Handelsketten sind

147 Globaldialogue 2015.

148 Prno 2013: Der Begriff „Social Licence to Operate“ wurde in den späten 1990er Jahren erstmalig durch den Kanadier Jim Cooney, eine Führungskraft in der Bergbauindustrie, ins Leben gerufen. EY 2015: In ihrer jährlichen Risikoanalyse für die Rohstoffindustrie stuft die Beratungsfirma EY (früher Ernst & Young) die Social Licence to Operate in den letzten beiden Jahren immer unter den fünf größten Risiken für die nächsten zwei Jahre ein.

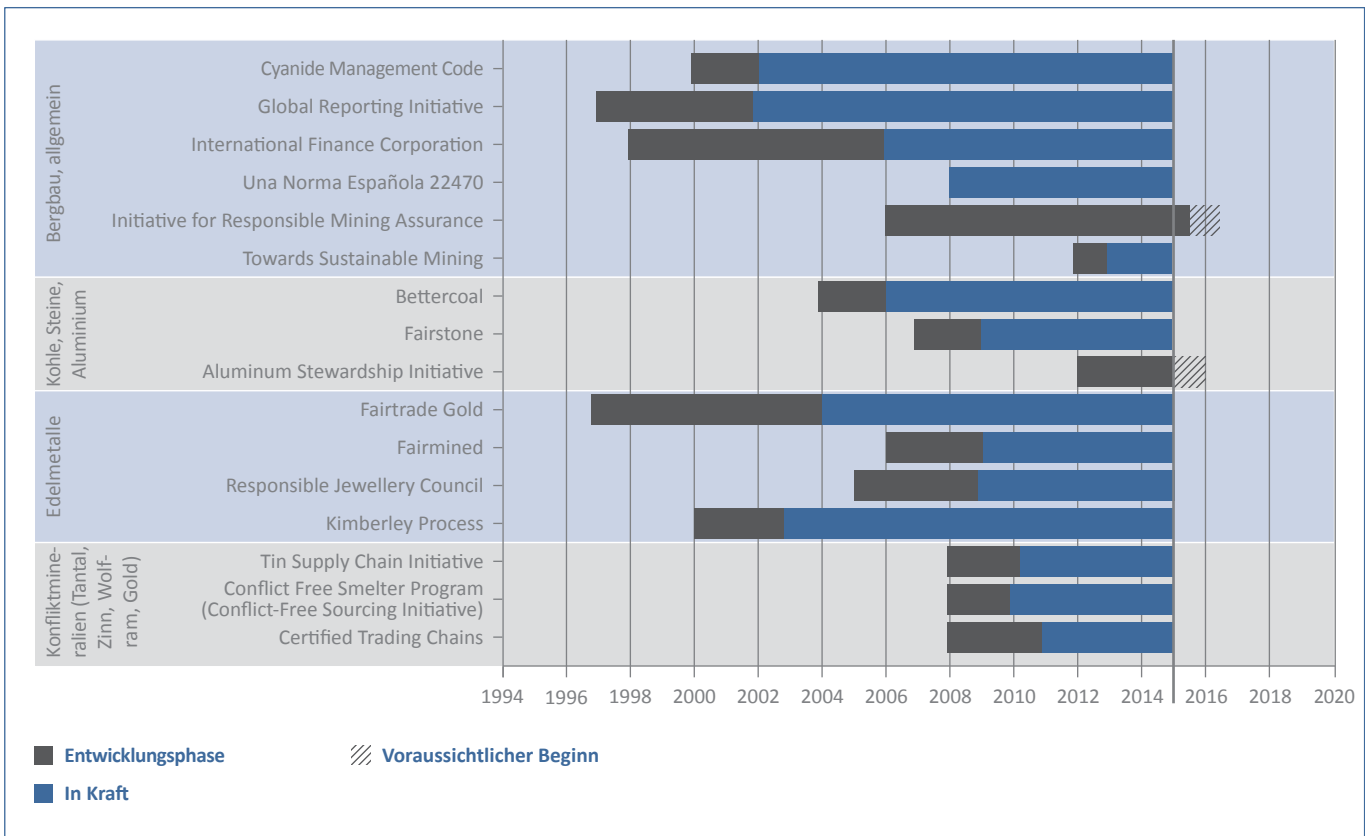


Abbildung 3.19: Verantwortung in den Lieferketten.¹⁴⁹ Innerhalb der Rohstofflieferketten wird durch Zertifizierungen und Selbstverpflichtungen der Wirtschaft zunehmend für eine nachhaltige sowie sozial- und umweltverträgliche Gewinnung Sorge getragen.

ein Beispiel für die Praktizierung solcher Standards, wobei den Hütten aufgrund ihrer Flaschenhalposition hierbei eine besondere Rolle zukommt:¹⁵⁰ Im Vergleich bestehen die Lieferketten meist aus vielen Bergbautreibenden und viele Rohstoffabnehmern, aber nur wenigen Hütten (Abbildung 3.19).¹⁵¹ Die Initiierung und Etablierung derartiger Zertifizierungssysteme erstreckt sich über vielerlei Bereiche der bergbaulichen Rohstoffgewinnung und dauert oftmals viele Jahre. Die Schaffung von Transparenz ist ein elementarer Baustein zur Erlangung der gesellschaftlichen Akzeptanz.

Bei der Durchsetzung solcher Standards spielen auch internationale Banken eine bedeutende Rolle, da sie durch eine entsprechende Steuerung der

Bergbaufinanzierung Standards erzwingen können. In der Regel werden Bergbaugroßprojekte zu etwa einem Drittel mit Eigenkapital und zwei Drittel mit Fremdkapital, in der Regel von Bankenkonsortien, finanziert. Um das Länderrisiko zu reduzieren, wird bei Bergbauprojekten in Entwicklungs- und Schwellenländern oft versucht, zum Beispiel die International Finance Corporation (IFC) der Weltbankgruppe in das Finanzierungskonsortium mit einzubeziehen. Hier sind die Equator Principles¹⁵² zu nennen, ein internationales Rahmenwerk zur Erfassung und Verringerung von Kreditrisiken. Sie setzen Umwelt- und Sozialstandards für Projektfinanzierungen voraus, die auf den Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitsstandards der Weltbank sowie den nachhaltigen Leistungsstandards der IFC basieren.

Dass trotz solcher Bemühungen manche Bergbauprojekte zu Problemen

¹⁴⁹ Steinbach 2015.

¹⁵⁰ Steinbach 2015.

¹⁵¹ Franken et al. 2012.

¹⁵² Equator principles 2014.

führen, liegt auch daran, dass sich in vielen Ländern durch hohe Erlöse aus dem Rohstoffexport das Lohn- und Wechselkursniveau deutlich hebt. Daraus ergeben sich dann für andere Industriezweige Handelshemmnisse. Dieses Phänomen wird als „Holländische Krankheit“ (BOX VI) bezeichnet. Probleme gibt es darüber hinaus in jenen rohstoffreichen Ländern, in denen Korruption in staatlichen Institutionen an der Tagesordnung ist. So kommen in vielen Fällen Steuereinnahmen aus dem Bergbausektor insbesondere in den bergbaulich betroffenen Gebieten nicht bei der Bevölkerung an. Entsprechend schneiden viele Rohstoffländer auf dem Corruption Perceptions Index CPI von Transparency International schlecht ab.¹⁵³ Hier versucht die internationale Extractive Industries Transparency Initiative (EITI), die auf dem Welt-nachhaltigkeitsgipfel von Johannesburg 2002 vom Vereinigten Königreich initiiert wurde, unter dem Aspekt Good Governance (vereinfacht als „gute Regierungsführung“ übersetzt)¹⁵⁴ gegenzusteuern. Hier kann auch die CONNEX-Initiative der G7-Länder¹⁵⁵ von 2014 erwähnt werden, deren Ziel es ist, Entwicklungsländern bei komplexen Rohstoffverträgen zu helfen.¹⁵⁶

Das Konzept „Social Licence to Operate“ wird zum Teil aus sozialwissenschaftlicher Sicht kritisch diskutiert.¹⁵⁷ Der Vorwurf, der erhoben wird, ist der,

dass die „Social Licence to Operate“ sich als Antwort der Industrie gegen Bergbauoppositionen und als ein Mechanismus, die Überlebensfähigkeit des Bergbausektors zu sichern, entwickelt hat. Es ist keine konkrete Lizenz, die vergeben wird; sie ist vage und nicht greifbar. Es ist daher schwierig zu beweisen, dass diese Lizenz nicht vorhanden ist, beziehungsweise einfach zu behaupten, dass sie vorhanden ist.¹⁵⁸ Vorgeschlagen wird daher zum Beispiel, dass Bergbaugesellschaften beim Beginn von Projektplanungen davon ausgehen sollten, dass sie nicht vorhanden ist, sondern im Dialog mit gesellschaftlichen Gruppen errungen werden muss.¹⁵⁹ Letztendlich wird eine soziale Akzeptanz für die Rohstoffgewinnung nur erreicht werden können, wenn die Bevölkerung überzeugt werden kann, dass ihre Werte geachtet, die Umwelteingriffe minimiert sowie wirtschaftliche Vorteile für sie durch Arbeitsplätze und bessere Infrastruktur geschaffen werden.

Good Governance

Große Rohstoffvorkommen und eine entsprechend große Bergbauindustrie ziehen also längst nicht immer Wohlstand und Wirtschaftswachstum nach sich – im Gegenteil: In einer Studie des Fraser Instituts¹⁶⁰, einer auf Wirtschaftsaspekte spezialisierten gemeinnützigen Organisation im kanadischen Vancouver, wurden die Wirtschaftswachstumsraten von 77 Ländern miteinander verglichen. Die Wirtschaftswachstumsraten betragen zwischen 1970 und 2006 im Durchschnitt 1,52 Prozent. In 26 Ländern, die in hohem Maße von Rohstoffen beziehungsweise Bergbau abhängig sind, betrug die durchschnittliche Wachstumsrate jedoch nur 1,23 Prozent, in 51 Ländern, die von Rohstoffen nur wenig abhängig waren, dagegen 1,66 Prozent. 26 Länder mit starker Rohstoffabhän-

153 Transparency Deutschland 2014: Corruptions Perception Index für 2013, tabellarisches-Ranking.

154 BMZ 2015.

155 G7 steht für Gruppe der Sieben, die ein Zusammenschluss der sieben bedeutendsten Industrienationen der Welt ist. Die Staats- und Regierungschefs halten regelmäßig Gipfeltreffen ab, bei denen vielerlei politische, vor allem aktuelle und außenpolitische, Themen besprochen werden. Die Gruppe besteht aus Frankreich, Italien, Japan, den USA, Kanada, dem Vereinigten Königreich und Deutschland. Die Gruppe wurde 1998 durch Aufnahme Russlands zur G8 erweitert. Aufgrund des Ukraine-Konflikts ist Russland aus dieser Gruppe seit dem Frühjahr 2014 bis auf weiteres ausgeschlossen worden.

156 G7 2014: Im G7 Summit Communiqué vom 5. Juni 2014 heißt es unter Punkt 18: „a new initiative of Strengthening Assistance for Complex Contract Negotiations (CONNEX) to provide developing country partners with extended and concrete expertise for negotiating complex commercial contracts, focusing initially on the extractives sector“.

157 Zum Beispiel Owen/Kemp 2013; Parsons/Moffat 2014.

158 Parsons/Moffat 2014.

159 Parsons/Moffat 2014.

160 Béland/Tiagi 2009.

BOX VI: „Holländische Krankheit“

Die sogenannte Holländische Krankheit ist ein Effekt, für den es bisher keine zufriedenstellende Lösung gibt. Sie tritt in rohstoffreichen Ländern, besonders häufig in Entwicklungsländern, auf.¹⁶¹ Der Ausdruck wurde 1977 von der englischen Zeitung „The Economist“¹⁶² geprägt und beschreibt den Effekt des Abschwungs der verarbeitenden Industrie, wenn eine hervorragende Lagerstätte, in diesem Fall das Riesenerdgasfeld Groningen in den Niederlanden, entwickelt wird. Hier können höhere Löhne als in anderen Branchen gezahlt werden. Dadurch werden hochqualifizierte Arbeitskräfte angezogen und durch die Exporte hohe Außenhandelsüberschüsse erzielt. Damit kommt es aber auch zu großen Wechselkursunterschieden, da die eigene Währung stark aufgewertet wird. Daraus ergeben sich aber letztlich Konkurrenz Nachteile für die eigene verarbeitende Industrie, weil die für den Export bestimmten Güter für die Kunden im Ausland sehr teuer werden. Heute ist dieser Effekt in Australien, dem weltführenden Exporteur von Eisenerz und anderen Rohstoffen, zu beobachten. In Australien schließt derzeit die gesamte Autoindustrie wegen Konkurrenzunfähigkeit. Die Löhne und Produktionskosten sind im internationalen Vergleich einfach zu hoch. Diese Verschiebung in der Wirtschaftsstruktur ist insbesondere deswegen problematisch, weil die Rohstoffpreise großen Schwankungen unterliegen. Wenn auf einen Rohstoffboom eine Phase niedriger Preise folgt, trifft dies solche Länder besonders hart, die keine breite verarbeitende Industrie aufweisen. In Industrieländern gibt es gute Beispiele, wie dieser Effekt abgefedert werden kann. In der ersten Stufe wird verstärkt in Bildung und nationale Infrastruktur investiert. Im zweiten Schritt werden Sovereign Wealth Funds gebildet, zum Beispiel in Norwegen aus den Erdöleinnahmen in Form des Norwegischen Pensionsfonds oder in Alberta, Kanada, mit dem Alberta Heritage Savings Trust Fund aus Kohlenwasserstoffeinnahmen. Dagegen gibt es bisher nur wenige überzeugende Beispiele in Schwellen- und Entwicklungsländern: Botsuana und Chile können hier erwähnt werden.

gigkeit wurden nach der Regierungsführung über den Economic Freedom Indicator¹⁶³ in drei Klassen untergliedert. Das obere Drittel (gute Regierungsführung) hatte ein überproportionales Wachstum von 2,62 Prozent, das untere Drittel (schlechte Regierungsführung) ein negatives Wachstum von -0,38 Prozent. Damit sich eine exportorientierte Rohstoffproduktion in der Summe positiv für ein Land auswirkt, müssen also Good-Governance-Strukturen vorhanden sein. Entsprechende Standards im Bergbau und in der Rohstoffpolitik eines Landes könnten beispielsweise im Zuge der

Finanzierung durch die internationalen Bankenkonsortien erzwungen werden. Den internationalen Banken und privaten Geldgebern kommt also eine besondere sozioökologische Verantwortung zu.

¹⁶¹ van der Ploeg 2011.

¹⁶² The Economist 1977.

¹⁶³ Gwartney et al. 2014, aktuelle Daten des Fraser-Instituts.

Politische und soziale Einflüsse auf das Angebot von Primärrohstoffen

Trotz aller Bemühungen der Politik, Standards zu harmonisieren und Handelshemmnisse zu beseitigen – bei Letzterem spielt insbesondere die WTO eine wichtige Rolle – ist man heute von ungehinderten Rohstoffflüssen weit entfernt. Gerade in Industrieländern wie Deutschland, in denen nur noch wenig Bergbau betrieben wird, lässt das Bewusstsein für die Notwendigkeit der Rohstoffgewinnung in der Bevölkerung nach. Mit Bergbau assoziieren viele Menschen die drei Ds – „dark, dirty, dangerous“. Damit geht ein politischer Bedeutungsverlust der Rohstoffindustrie einher.

Mit dem Bergbau sind oft schwerwiegende Folgen für die ansässige Bevölkerung verbunden, bis hin zu Umsiedlung und Enteignung. Die Interessenkonflikte sind von Fall zu Fall unterschiedlich und oft sehr komplex. Der wirtschaftliche Nutzen für die betroffene Bevölkerung, Natur- und Umweltschutz, Unternehmensziele – hierfür eine allgemeinverträgliche Lösung zu finden, trägt insgesamt dazu bei, für die Zukunft eine nachhaltige und sozioökologisch akzeptable Rohstoffgewinnung zu gewährleisten.

Angesichts des beim Bergbau notwendigen Landschaftseingriffes und der Vorbehalte der Bevölkerung gegen den primären Rohstoffabbau ist es heute eine Herausforderung, Akzeptanz für den Bergbau zu erreichen beziehungsweise wieder aufzubauen, also die sogenannte „Social Licence to Operate“ zu erlangen – und somit gesellschaftlich legitimiert primäre und sekundäre Rohstoffgewinnung betreiben zu können. Die Verbesserung von Umwelt- und Sozialstandards im Bergbausektor dürfte für die rohstoffgewinnende Industrie im internationalen Kontext eine große, wenn nicht die größte Zukunftsaufgabe sein.

Damit sich eine exportorientierte Rohstoffproduktion in der Summe positiv für ein Land auswirkt, müssen Good-Governance-Strukturen vorhanden sein. Entsprechend notwendige Standards im Bergbau und in der Rohstoffpolitik eines Landes können beispielsweise im Zuge der Finanzierung durch internationale Bankenkonzerne erzwungen werden. Internationalen Banken und privaten Geldgebern kommt somit eine besondere sozioökologische Verantwortung zu.

Die Beseitigung von Handelshemmnissen darf daher nicht zu Lasten einer umwelt- und sozialverträglichen Rohstoffproduktion gehen. Auch eine wirklich nachhaltige Energiewende lässt sich nur dann erreichen, wenn die Abnehmer von Rohstoffen entlang der Wertschöpfungskette bis hin zum Verbraucher darauf drängen, dass Sozial- und Umweltstandards weltweit etabliert und eingehalten werden.

3.4.3 Technologien für die Rohstoffexploration und -gewinnung

Bisher ist es stets gelungen, genügend neue Reserven zu erschließen, um den Verbrauch, auch bei steigender Nachfrage, zu decken. Für die Zukunft stellt sich die Frage, ob sich der Rohstoffbedarf auch weiterhin derart befriedigen lässt. Fachleute diskutieren daher immer wieder, ob die Explorationseffektivität nachlässt –

also das Verhältnis aus Explorationsaufwand zu neu entdeckten Lagerstätten. Manche Fachleute¹⁶⁴ schließen aus dem Ansteigen der Explorationsausgaben ab 2003 bei gleichzeitiger Abnahme der Anzahl der neu entdeckten Lagerstätten auf ein Nachlassen der Effektivität (Abbildung 3.20A).

¹⁶⁴ Large 2014.

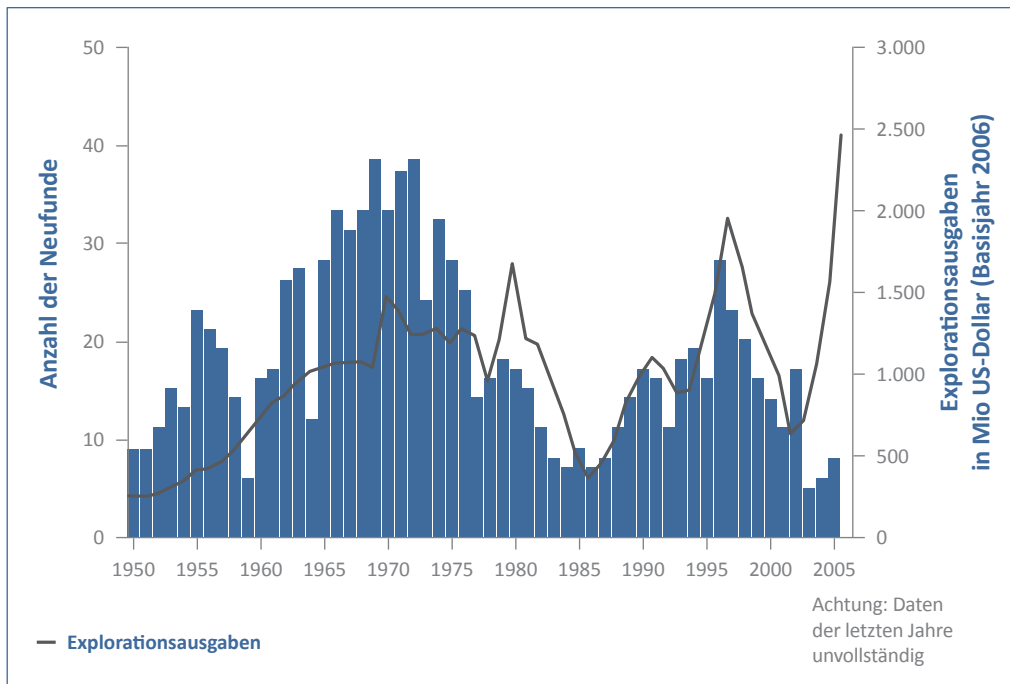


Abbildung 3.20: A) Entwicklung der Explorationsausgaben und der Anzahl von Buntmetallneufunde (Kupfer, Nickel, Zink, Blei) im Zeitraum von 1950 bis 2005.¹⁶⁵ Die Explorationsausgaben (Linie) sind inflationsbereinigt. Die Buntmetallentdeckungen (Säulen) berücksichtigen Neufunde mit jeweils mehr als 100.000 Tonnen Rohstoffgehalt, umgerechnet in Kupfer-Äquivalente (siehe Abbildung 3.20B).

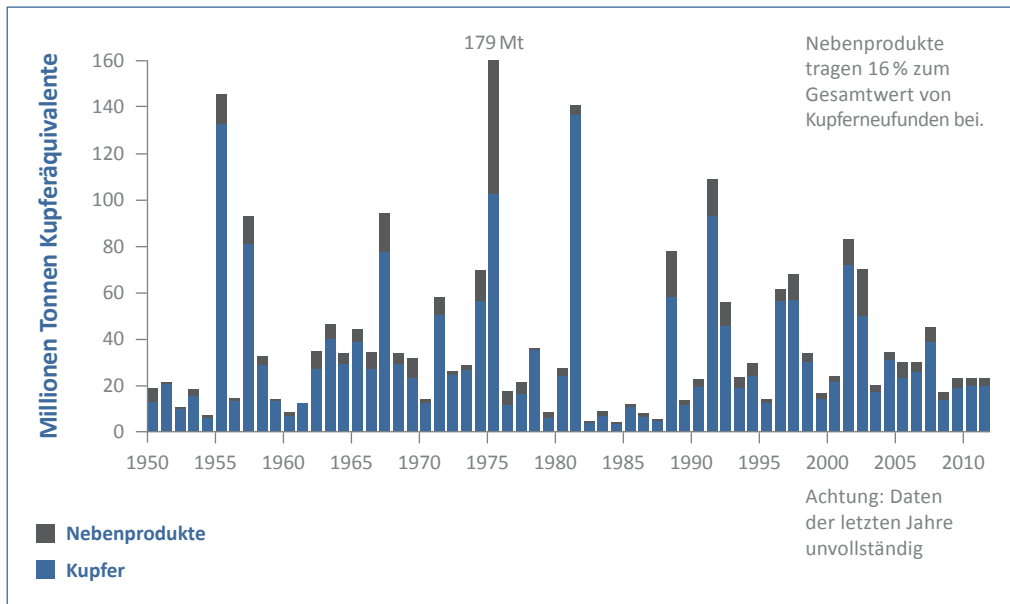


Abbildung 3.20: B) Tonnage von Kupfer und Beiprodukten in Vorkommen mit mehr als 0,1 Megatonnen Kupfer, die im Zeitraum von 1950 bis 2011 weltweit exploriert wurde (dargestellt in Millionen Tonnen Kupfer-Äquivalent, Cu-eq).¹⁶⁶ Da die Datenlage unvollständig ist, enthält die Abschätzung Berichtigungen für möglicherweise fehlende Vorkommen oder Lagerstätten ohne konkretes Entdeckungsjahr. Der Anteil an Beiprodukten wurde nach folgendem Schlüssel abgeschätzt: Der monetäre Wert einer Tonne Erz mit 1 Prozent Kupfer entspricht jeweils dem Wert einer Tonne Erz mit 3,26 Prozent Zink, 4,76 Prozent Blei, 0,3 Prozent Nickel, 0,25 Prozent Molybdän, 0,43 Prozent Kobalt, 0,94 lbs Uranoxid (U_3O_8), 0,44 Tonnen Magnetit, 3 Gramm Gold oder 156 Gramm Silber.

¹⁶⁵ Modifiziert aus Large 2014; übersetzt nach Bizzi 2007.

¹⁶⁶ Schodde 2012-1.

Andere Wissenschaftler¹⁶⁷ sehen keinen Grund zum Pessimismus, da hier auch die Mengen an Beiprodukten eine wichtige wirtschaftliche Rolle spielen. Zieht man die Beiprodukte in die Betrachtung mit ein, zeigt sich kein Nachlassen der Effektivität (Abbildung 3.20B). Die Schwierigkeit bei der Extrapolation besteht darin, dass die Entdeckungen neuer Vorkommen zyklisch anfallen und oft phasenverschoben zum Auf und Ab der Explorationsausgaben sind. Aufgrund der massiv gestiegenen Explorationsausgaben und der Anzahl an Neufunden in den vergangenen zehn Jahren sehen viele Experten bei zahlreichen Rohstoffen eine starke Zunahme geplanter neuer Förderkapazitäten für die kommenden fünf bis zehn Jahre voraus.¹⁶⁸

Was die Energiesysteme der Zukunft betrifft, sind insbesondere folgende Aspekte der Exploration zu beachten:

Seit den 1980er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden weltweit die Anstrengungen auf dem Gebiet der Lagerstättenforschung zurückgefahren. Lehrstühle für Lagerstättenforschung wurden nicht nur in Deutschland, sondern selbst in klassischen Rohstoffländern wie Kanada oder Australien personell reduziert. Diese Entwicklung wurde vor allem durch ein langanhaltendes Überangebot an Rohstoffen, also einen klassischen Käufermarkt, verursacht. Dieser Trend kehrt sich, angetrieben durch den chinesischen Nachfrageschub, derzeit um. Auf dem Gebiet der Exploration wird die Rohstoffforschung heute wieder weltweit ausgebaut. Ein Beispiel dafür ist die Gründung des Helmholtz-Institutes Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF). Auch das Forschungsprogramm r^4 – Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland¹⁶⁹ des BMBF be-

schäftigt sich unter anderem wieder mit der Entwicklung von Methoden für die Rohstoffsuche.

Die klassische Exploration beginnt mit einer oberflächennahen Erkundung. Auch wenn die wesentlichen Methoden der oberflächennahen Erkundung weitgehend bekannt sind, werden sie laufend verfeinert. Einen besonders innovativen Durchbruch könnte es in den nächsten Jahren im Bereich der satellitengestützten Hyperspektralanalyse geben, dabei wird die Erdoberfläche kartiert, indem viele verschiedene Frequenzbänder des vom Boden reflektierten Lichts analysiert werden. Diese Daten können Hinweise auf bestimmte im Boden enthaltene Mineralien oder Elemente liefern. Es ist damit bereits gelungen, wasserreiche Minerale zu kartieren, die Hinweise auf Lagerstätten oder für Seltene-Erden-Elemente liefern. Besonders effektiv ist diese Methode in ariden und semiariden Gebieten. Da sich die Auflösung der Messinstrumente immer weiter verbessert hat, können heute große, wenig erkundete Gebiete vom Satelliten aus untersucht werden. Ab 2018 soll im Rahmen der deutschen EnMAP-Mission (Environmental Mapping and Analysis Program) ein neuer Satellit diese ausschließlich in Deutschland entwickelten Systeme in die Erdumlaufbahn bringen. Die Projektleitung hat das Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), die wissenschaftliche Leitung liegt beim Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. Neben weiteren wissenschaftlichen Einrichtungen sind ferner das Institut für die Methodik der Fernerkundung (IMF), das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) und das Raumfahrt-Kontrollzentrum des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, die OHB-System AG, die Firma Kayser-Threde und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe beteiligt.

167 Schodde 2012-1.

168 Buchholz et al. 2012-2; Dorner et al. 2013.

169 BMBF 2012.

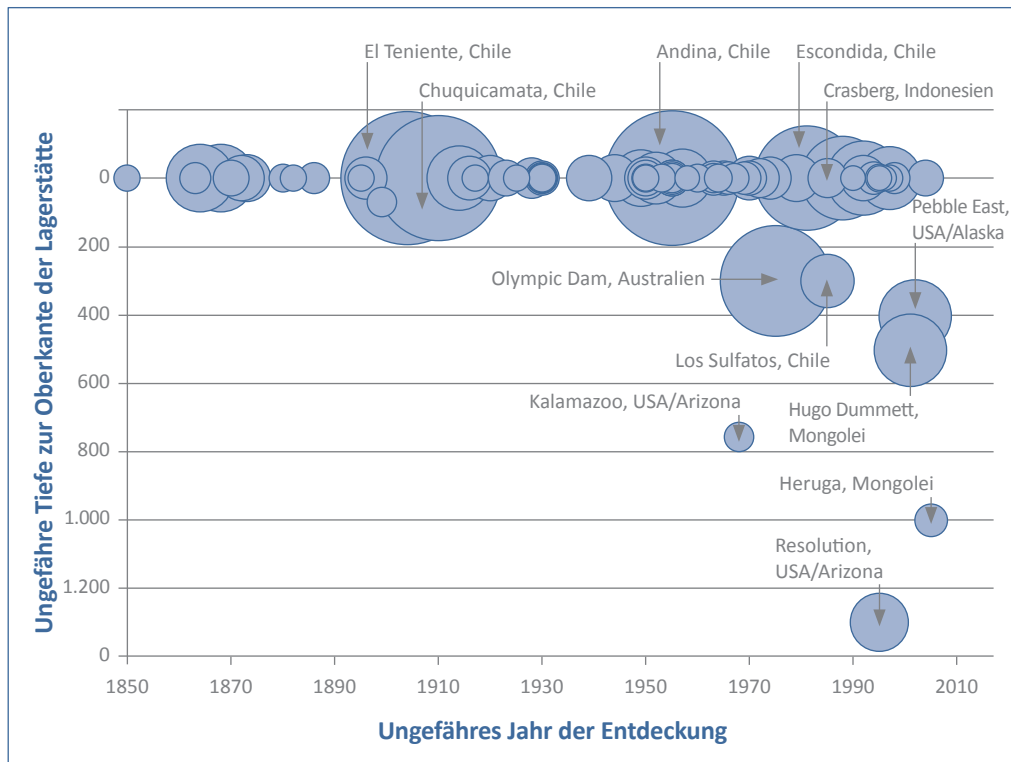


Abbildung 3.21: Tiefenlage von Kupferlagerstätten, die im Zeitraum von 1850 bis 2010 entdeckt wurden.¹⁷⁰

Berücksichtigt sind Lagerstätten mit einem Gehalt von jeweils mehr als vier Millionen Tonnen Kupfer.

Die größten Potenziale, neue Lagerstätten zu entdecken, liegen in der Tiefe: Die bisherigen Entdeckungen (Abbildung 3.21) waren oberflächennah. Seit etwa 1990 aber wurden immer öfter tiefliegende Erzkörper entdeckt. Dazu hat beigetragen, dass sich in den letzten 30 bis 40 Jahren die elektromagnetischen Explorationsverfahren verbessert haben. So dringen die elektromagnetischen Signale beim Flugzeug- oder Helikoptereinsatz, die in den 1970er Jahren etwa 100 bis 200 Meter tief in den Erdboden reichten, heute dreimal tiefer in den Boden ein. So radikale und erfolgreiche Durchbrüche wie der Einsatz von Flugmagnetometern in der Erzexploration, die im Zweiten Weltkrieg für die U-Boot-Jagd entwickelt wurden, oder der erste Einsatz von flugelektromagnetischen Geräten, mit denen in Kanada von 1950 bis 1976 fast jedes Jahr eine neue Buntmetall-Lagerstätte entdeckt wurde, gab es in den vergangenen Jahrzehnten kaum mehr.¹⁷¹ Derzeit

aber sieht es so aus, als sei dem Leibniz-Institut für Photonische Energien in Jena in Zusammenarbeit mit einer südafrikanischen Bergbaufirma mit dem SQUID-Magnetometer (Magnetometer auf Basis von Supraleitung) ein neuer Durchbruch gelungen. Wie erste Untersuchungen zeigen, können mit dem Gerät, das mit Supraleitertechnik arbeitet, noch einmal deutlich tiefere Strukturen erkundet werden.¹⁷² Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover arbeitet darüber hinaus daran, sogenannte AFMAG-Systeme (Audiofrequenzmagnetik) in Helikopter-Flugsonden einzusetzen, um Eindringtiefen bis zu 1.000 Meter zu erreichen. Eine besondere Rolle dürfte künftig auch die Geochemie spielen, bei der Rohstoffvorkommen anhand chemischer Spuren in deren Umgebung nachgewiesen werden. Dafür ist eine besonders genaue und empfindliche Analysetechnik notwendig, damit die oft sehr schwach konzentrierten chemischen Spuren zuverlässig entdeckt werden können.

¹⁷⁰ Modifiziert aus Large 2014; übersetzt nach Finlayson 2009.

¹⁷¹ Wagner 1999.

¹⁷² Le Roux/Macnae 2007.

Die Exploration tiefliegender Lagerstätten ist teuer. Kleine Explorationsgesellschaften, die besonders kreativ und oft kosteneffektiver als die großen Bergbaugesellschaften arbeiten, können die dafür benötigten Finanzmittel in der Regel nicht aufbringen. Sie werden daher an Bedeutung verlieren.

Die Exploration ist ein Element des Regelkreises der Rohstoffversorgung. Hinkt die Rate der Neuentdeckungen über längere Zeit der Abbaurate hinterher, wird der Markt dies als Gefahr einer kommenden physischen Knappheit des spezifischen Rohstoffes erkennen. Damit werden die Preise für diesen Rohstoff steigen. Dies wird die Explora-

tionsindustrie dazu bewegen, sich verstärkt mit diesem Rohstoff zu beschäftigen und neue Explorationskonzepte zu entwickeln. Die Uranexploration in den 1970er Jahren ist ein gutes Beispiel: Die spezifischen Explorationskosten stiegen über Jahre an; der Preis reagierte und stieg von 10 US-Dollar pro Pfund (USD/lbs) für Uranoxid (U_3O_8) auf 40 USD/lbs. Neue Methoden wurden entwickelt, die tiefer in den Boden eindringen, um insbesondere für reiche Uranlagerstätten besonders hoffige Situationen in Kanada zu erkennen. Die Folge waren zahlreiche neue Entdeckungen reicher Lagerstätten. Dies führte zu einem Preisrückgang, wodurch die ärmeren Lagerstätten aus dem Markt gedrängt wurden.

BOX VII: Rationalisierungseffekte – Beispiel Kupfer

Der Erste Weltkrieg und seine Folgen verursachten Umstrukturierungen in der weltweiten Bergwerksproduktion. Technische Weiterentwicklungen und parallel erfolgende Rationalisierungsschübe etwa durch die Entwicklung von Großtagebauen (Economies of Scale), machten den Rohstoffabbau kostengünstiger. Hierdurch erklärt sich der Bruch in der Preisentwicklung nach Ende des Ersten Weltkriegs. Die realen Kupferpreise zum Beispiel sind in den vergangenen hundert Jahren nicht gestiegen, obwohl die Kupfergehalte in den in Abbau stehenden Lagerstätten zum Teil deutlich gesunken sind (Abbildung 3.22).¹⁷³ Da mit der Zeit die Abbauleistungen in den Tagebauen durch größere Geräte und zudem die Verfahren für die Aufbereitung von Kupfer immer besser wurden, können heute sogar Lagerstätten mit Kupfer-Gehalten von nur 0,27 Prozent, wie in der Grube Aitik in Schweden, erfolgreich abgebaut werden.¹⁷⁴

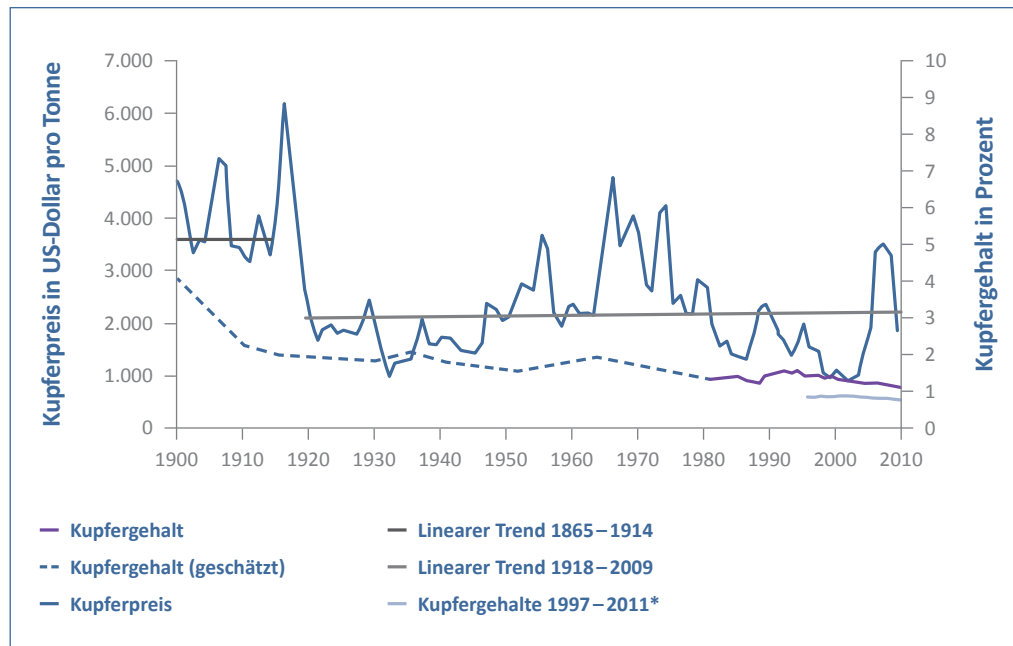
Die durchschnittliche Anzahl der neu entdeckten Lagerstätten ist über die Jahre seit 1950 immer in etwa konstant geblieben.¹⁷⁵ Da aber nicht alle neuen Vorkommen zum Zeitpunkt ihrer Entdeckungen bauwürdig sind beziehungsweise waren, verbleibt ein großer Teil als Ressourcen. Vor allem durch Technologieverbesserungen wandeln sie sich schließlich in Reserven. Zum Beispiel werden mit dem heute bei niedrighaltigen Kupfererzen angewandten SX/EW-Verfahren (Solvent Extraction/Electrowinning)¹⁷⁶ zurzeit rund zwanzig Prozent der weltweiten primären Kupferproduktion gewonnen. Die Technologie wird auch erfolgreich bei Kobalt, Nickel, Zink und Uran angewendet. Allerdings haben die Laugungsmethoden oft den Nachteil, dass beibrechende Elemente, wie Edelmetalle oder Tellur (ein Technologieelement), in Kupferlagerstätten meist nicht mitgewonnen werden.

¹⁷³ Wellmer et al. 2008.

¹⁷⁴ Weihed 2011.

¹⁷⁵ Schodde 2012-1.

¹⁷⁶ Das Verfahren ist ein zweistufiger hydrometallurgischer Erzaufbereitungsprozess mittels Extraktion des Rohstoffs (hier Kupfer) durch Laugung (Solvent Extraction) und anschließender Elektrolyse (Electrowinning).



*Ergänzende Daten für den Zeitraum 1997 bis 2011, die auch die Laugung sehr geringhaltiger Abraumhalden mitbilanzieren¹⁷⁷

Abbildung 3.22: Entwicklung der weltweiten durchschnittlichen Kupfergehalte¹⁷⁸ und der realen Kupferpreise von 1900 bis 2010.¹⁷⁹ Weltweite Folgewirkungen des Ersten Weltkriegs und Rationalisierungen bewirkten Kostensenkungen in der Bergwerksproduktion, die auch zum Bruch in der Preisentwicklung nach Kriegsende führten. Die beiden linearen Trend-Plateaus entsprechen dem jeweiligen durchschnittlichen Preisniveau.

Zugang zu Rohstoffen durch technische Innovation

Die Verfügbarkeit von Rohstoffen wird auch durch technische Verbesserungen bei der Gewinnung und Verarbeitung beeinflusst. Dank neuer Technologien können sich Ressourcen, also bekannte Rohstoffvorkommen, deren Abbau bislang nicht wirtschaftlich war, in wirtschaftlich abbaubare Reserven wandeln. Zudem können verstärkt nun auch unbekannte Vorkommen mit geringeren Rohstoffgehalten direkt in den Fokus von Explorationsmaßnahmen rücken. Da durch die neuen

Technologien die Schwelle für die Abbauwürdigkeit von Vorkommen sinkt, kann die Menge der wirtschaftlich gewinnbaren Reserven überproportional ansteigen. Preisanreize entsprechend dem Regelkreis der Rohstoffversorgung sind auch hier von entscheidendem Einfluss:

Wirtschaftliche Rationalisierungseffekte im Bergbau werden durch größere Einheiten (Economies of Scale) und durch technische Rationalisierungseffekte erreicht (BOX VII und VIII). Die Entwicklung von ferngesteuerten Bergbaumaschinen spielt eine große Rolle. Entsprechendes gilt für Aufbereitungsmethoden. Hier gewinnen energiesparende Zerkleinerungs- und Mahlverfahren sowie Laugungsmethoden, auch mithilfe von Bakterien (Bioleaching), eine wachsende Bedeutung (BOX VII). Dies könnte auch die Wirtschaftlichkeit der Wiederaufbereitung von Reststoffhalden wie beispielsweise Aufbereitungsrückstände, Schlackenhalde und Kraftwerksaschen positiv beeinflussen und die Reservensituation insbesondere

¹⁷⁷ Schodde 2012-2 betrachtet zudem Kupfer aus Abraumlaugungen, die typischerweise nur 0,1 bis 0,3 Prozent Erzgehalt aufweisen und somit den Erzgehaltsdurchschnitt nach unten verzerren, da dies für die Entwicklung neuer Minenprojekte keine Rolle spielt; dieser Nachnutzungsprozess des Abraums (also dem eigentlichen „Abfall“ des Minenabbaus) ist auf die Vollkosten eines Minenprojektes bezogen nicht wirtschaftlich, bietet aber die Möglichkeit zusätzlicher Erträge, da der Prozess abstrakt betrachtet auch bei derartig niedrigen Gehalten wirtschaftlich ist. Dies impliziert, dass es aktuell keine Notwendigkeit darstellt, derartig geringhaltige Erze zu nutzen, weil es keine höherhaltigeren Erze mehr gibt, sondern dies wird getan, da es technisch und wirtschaftlich möglich ist; somit spiegelt dies den technischen Fortschritt bei den Gewinnungsprozessen wider (persönliche Mitteilung Schodde 2015).

¹⁷⁸ Schodde 2010: anhand der Primärgewinnung von Kupfer durch Mahl- oder Laugungsprozesse.

¹⁷⁹ Scholz/Wellmer 2013; Stürmer 2013-1; 2013-2.

BOX VIII: Technologische Innovationen – Beispiel unkonventionelle Kohlenwasserstoffe

Wie radikal neue Innovationen die Rohstoffversorgung beeinflussen können, kann sehr gut am Beispiel der Entwicklung von Schiefergas und Schieferöl, also unkonventioneller Öl- und Gasressourcen, in den USA beobachtet werden. Gemeint sind hier die Fracking-Technologien, mit denen bislang ungenutzte primäre Kohlenwasserstofflagerstätten erschlossen werden. Beim Fracking, einer mittlerweile standardisierten hydraulischen Stimulationsmethode (Hydraulic Fracturing), werden wenig durchlässige Gesteine im Untergrund unter hohem Flüssigkeitsdruck aufgebrochen, um dadurch die in abgeschlossenen Gesteinszwischenräumen (Porenräume) befindlichen Kohlenwasserstoffe gewinnen zu können. Anders als bei konventionellen Lagerstätten, aus denen Kohlenwasserstoffe mit vergleichsweise geringem technischen Aufwand gefördert werden können, ist hier der Einsatz besonderer Fracking-Methoden notwendig. Auch wenn manche Prognosen bei Weitem zu optimistisch sein dürfen, ist es durchaus möglich, dass die USA bald Selbstversorger auf dem Gasmarkt sind. Die Gaspreise in den USA betragen schon jetzt nur circa dreißig Prozent von denen in Europa.

Dem amerikanischen Schiefergasboom sind erhebliche technische Fortschritte vorausgegangen, die es heute ermöglichen, Schiefergas in diesen Mengen wirtschaftlich gewinnen zu können. Mit einer fast zwanzigjährigen Vorlaufzeit zeigt das Beispiel der hydraulischen Gesteinsbehandlung (Fracking) in Abbildung 3.23 eine für Durchbrüche im Rohstoffsektor typische lange Lernkurve: Nach der ersten Entwicklung des Fracking-Verfahrens, wurde diese Methodik verfeinert (Re-Fracking= erneutes Fracking in einer bereits bestehenden Bohrung) und durch weitere technische Maßnahmen erweitert (horizontale Bohrverfahren und gleichzeitiges Fracking von mehreren parallelen Bohrsträngen – Simo-Fracking). Die Produktion im Fayetteville-Shale, einer geologischen Formation im US-Bundesstaat Arkansas, profitiert von der Lernkurve im texanischen Barnett-Shale, wo die Fracking-Technologie schon sehr viel früher erprobt wurde.

von Elektronikmetallen oder den Seltenen-Erden-Elementen zumindest zeitweise verbessern.

Der Energieaufwand zur Gewinnung und Verarbeitung mineralischer Rohstoffe ist aber auch aus Umweltsicht relevant: Abbau aus größeren Teufen sowie ärmere und komplexere Erze erfordern tendenziell einen immer höheren Energieaufwand (pro Tonne Metallausbringen). Bereits heute werden circa acht Prozent des Weltenergiebedarfs beziehungsweise CO₂-Ausstoßes durch den Bergbau verursacht.¹⁸⁰ Kostenseitig mag das bei entsprechend steigenden Rohstoffpreisen zu verkraften sein, aber im ungünstigen Fall steigt am Ende der Eigenenergieverbrauch der Erzeugung von erneuerbaren Energien

durch überproportionalen Aufwand am Anfang der Produktionskette deutlich an. Ein Teil des Vorteils würde also wieder aufgezehrt, sofern es nicht gelingt, im globalen Bergbau verstärkt erneuerbare Energien einzusetzen.

Bei der zukünftigen Verfügbarkeit von Rohstoffen für die Energiesysteme der Zukunft dürften längerfristig auch die marinen Rohstoffe eine Rolle spielen. Die Bundesregierung hat sich über die BGR Konzessionen im Pazifik für polymetallische Knollen (früher als Manganknollen bezeichnet) gesichert, die insbesondere Kupfer, Nickel und Kobalt enthalten, sowie eine Konzession für Buntmetall-führende Massivsulfide, Erzablagerungen an erkalteten magmatischen Quellen, im Indischen Ozean. Die Massivsulfide führen als beibrechende Elemente auch viele der elektronischen

¹⁸⁰ Harris 2013.

und anderen Hightech-Elemente. Die Technologien für die Erkundung dieser Lagerstätten sind zwar weit fortgeschritten, die Technologien für die Gewinnung in der Tiefsee und die Verarbeitung stehen jedoch noch am Anfang ihrer

Entwicklung. Das gilt insbesondere für die polymetallischen Manganknollen. Die Genehmigungen von Abbaulizenzen und die Technologieentwicklung werden sich vermutlich noch mindestens zehn Jahre hinziehen.

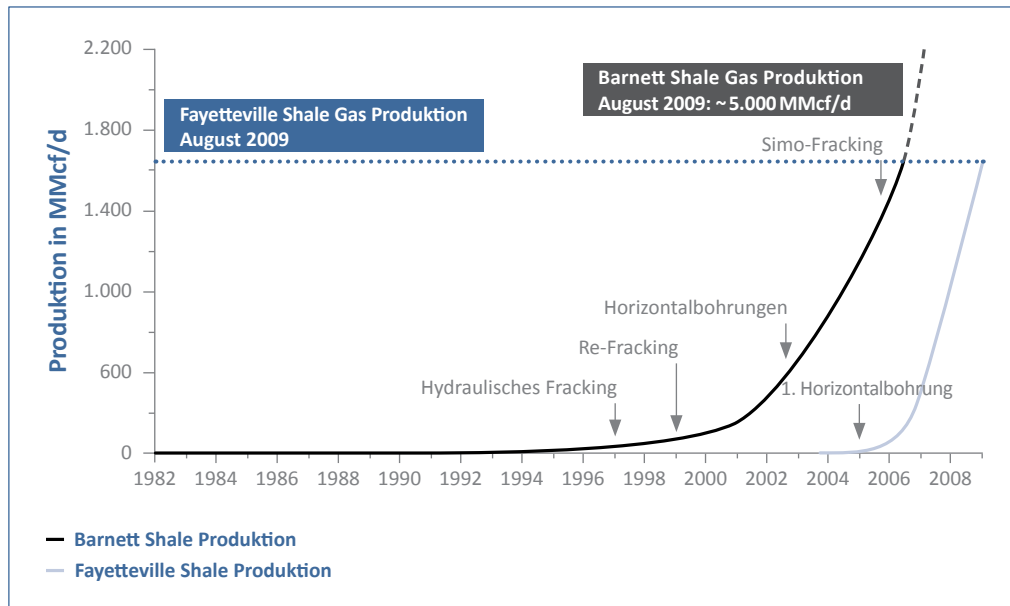


Abbildung 3.23: Lernkurve der Exploration und Technologieentwicklung am Beispiel der Gewinnung von Schiefergas in den USA.¹⁸¹ MMcf/d ist die für die Erdgasförderung gebräuchliche Maßeinheit eine Million Kubikfuß pro Tag.¹⁸²

Entwicklung von Technologien für die Suche nach Primärrohstoffen und die Rohstoffgewinnung

In Deutschland ist die Expertise für die Rohstofferkundung mit der Verringerung der Bergbauaktivitäten weitgehend verlorengegangen. Das betrifft wissenschaftliche, industrielle und finanzielle Aspekte. Effizienzsteigerungen bei Exploration, Gewinnung und Aufbereitung führen zu einer höheren Rohstoffverfügbarkeit. Für Forschung und Entwicklung ergeben sich daher folgende Herausforderungen: Durch technische Neuentwicklungen und die optimale Kombination von Methoden aus der Geologie, Geophysik und Geochemie sollten die Eindringtiefe, Präzision und Flächenabdeckung bei der Exploration verbessert werden, sodass künftig auch „blinde“ Lagerstätten ohne Oberflächenanzeichen in der Tiefe entdeckt und unerforschte Gebiete systematisch erfasst werden können. Rohstoffvorkommen mit abnehmenden Gehalten und komplexeren Lagerstättenverhältnissen sollten durch technologische Verbesserung zukünftig wirtschaftlich abbauwürdig werden. Dabei sollte der Gewinnungsprozess dennoch eine nachhaltigere Energiebilanz aufweisen. Auch marine Lagerstätten und Reststoffhalden aus Bergbau und Aufbereitung werden langfristig hierbei eine Rolle spielen.

¹⁸¹ Andruleit et al. 2010.

¹⁸² Ein Kubikfuß entspricht etwa 0,02832 Kubikmeter.

3.4.4 Das Angebot von Sekundärrohstoffen

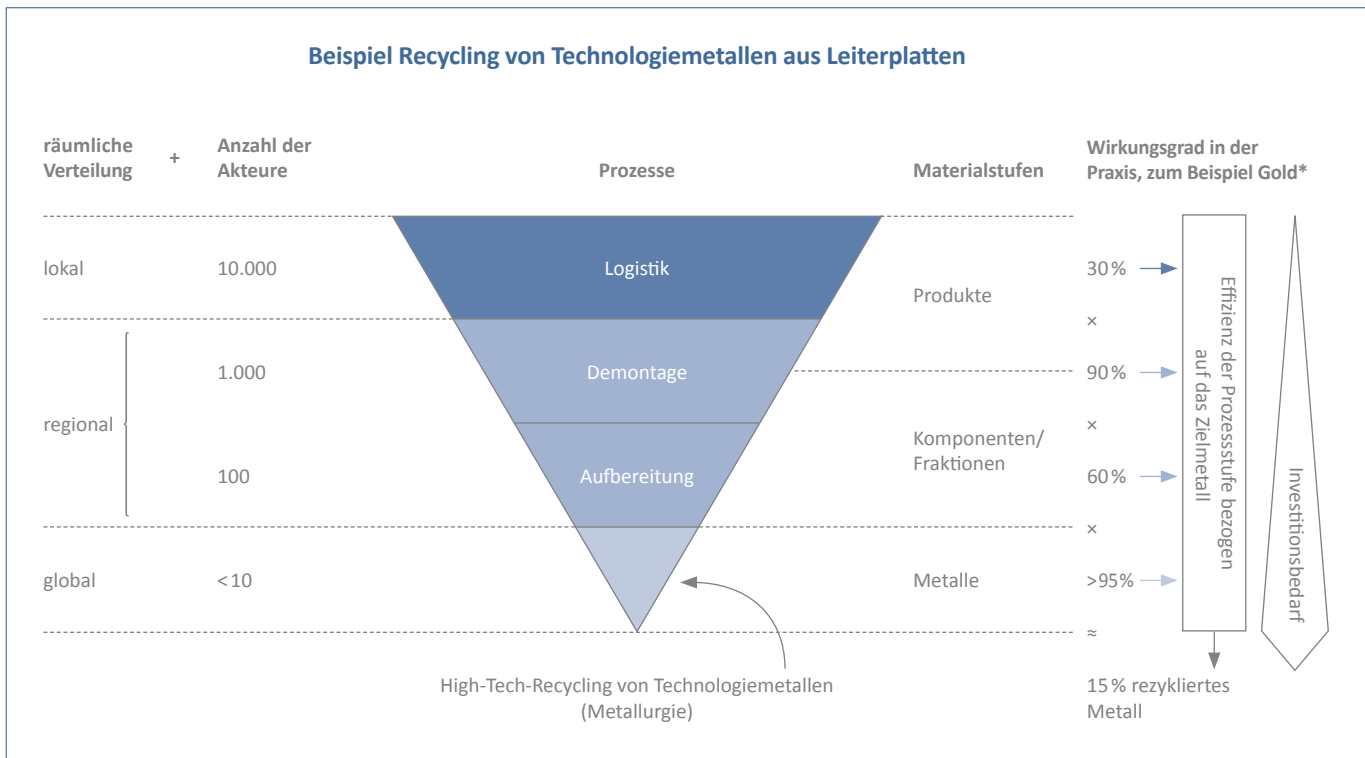
Die in den rohstoffreichen Weltregionen abgebauten (metallischen) Rohstoffe werden überwiegend in den reichen Industrieländern in Produkten eingesetzt. Sofern Wertstoffe dem Recycling zugeführt werden, stellen die Produkte zum Ende ihrer Lebenszeit eine bedeutende potenzielle sekundäre Rohstofflagerstätte dar. Zu dieser potenziellen Sekundärlagerstätte zählen nicht nur Produkte wie zum Beispiel Autos oder Computer, sondern auch die Infrastruktur, also beispielsweise Gebäude oder Stromleitungen. Diese sekundären Rohstoffe konzentrieren sich vor allem in städtischen Ballungsräumen. Nutzt man die sekundären Lagerstätten der Technosphäre intensiv, lässt sich die Rohstoffbasis einer Volkswirtschaft deutlich erweitern. Das Recycling ist also grundsätzlich eine gute Möglichkeit, um sich von der Versorgung mit kritischen Primärrohstoffen unabhängiger zu machen. Auch in technischer Hinsicht steht dem nichts im Wege, denn grundsätzlich können mit modernen metallurgischen Prozessen Metalle aus Sekundärmaterialien in der gleichen Qualität, also Reinheit und chemisch-physikalischen Eigenschaften, gewonnen werden wie aus Primärquellen.¹⁸³

Technologiemetalle müssen meist aus komplexen Fraktionen metallurgisch extrahiert werden; also aus Erzen und sekundären Rohstoffen, die oft eine Mischung verschiedener Elemente enthalten. Die Aufbereitung erfolgt meist (über) regional. Die Verhüttung konzentriert sich dagegen auf einige wenige großtechnische

metallurgische Anlagen in oder auch außerhalb von Europa (Abbildung 3.24). Hütten in Europa verarbeiten gleichzeitig Konzentrate, die sowohl aus primären als auch sekundären Rohstoffen gewonnen werden. Die durch die Verhüttung jeweils ausgebrachten Reinmetalle werden an den gleichen Rohstoffbörsen zu gleichen Preisen gehandelt und finden in den gleichen Produkten Verwendung. Da bei der Nutzung von sekundären Rohstoffen ein kontinuierlicher Materialzulauf aus dem aktiven Wirtschaftskreislauf und der Technosphäre erfolgt, können die Vorräte gut geschätzt werden. Die Größe der sekundären Rohstofflagerstätte ergibt sich durch die Anzahl der verkauften Produkte beziehungsweise errichteten Infrastruktur und ihrer Lebens- beziehungsweise Nutzungsdauer (siehe BOX IX). Im Gegensatz zu geologischen Lagerstätten haben diese Altprodukte und Schrotte aber eine völlig andere Zusammensetzung. Da der Mensch Rohstoffe in Produkten miteinander verbindet, die aus völlig verschiedenen geologischen Lagerstättentypen stammen, entstehen in der Technosphäre sehr viel komplexer zusammengesetzte „Schrott-Lagerstätten“. Sie enthalten eine sehr viel größere Bandbreite an Elementen und Elementkombinationen, die in der Natur nicht vorkommen. Allein ein Mobiltelefon enthält zum Beispiel mehr als vierzig verschiedene Elemente. Zudem werden die verwendeten Elemente in Form von anorganischen und organischen Materialien, wie beispielsweise in Leiterplatten oder Elektrokabeln Kunststoffe mit Metallen oder im Stahlbeton Stahllegierungen mit Baurohstoffen, fest miteinander verbunden.

In einer bestimmten geografischen Region fällt je nach Lebensstandard täglich eine Vielzahl ganz verschiedener Produkte an, die sich hinsichtlich Größe, Komplexität und Verbreitung unterscheiden – beispielsweise Schiffe, Züge, Autos, Kühlschränke, Computer, Handys oder USB-Sticks. Manche Produkte wie etwa Schiffe sind

¹⁸³ Einzig bei einigen im elektrochemischen Sinne besonders unedlen Metallen, wie Aluminium und Magnesium, kann es einen gewissen Downgrading-Effekt geben. Wenn zum Beispiel unterschiedliche Aluminiumlegierungen miteinander vermischt werden, dann können hieraus einzelne Legierungselemente nur unter sehr großem energetischen Aufwand wieder abgetrennt werden. Das führt dazu, dass bei gleichzeitigem metallurgischem Recycling verschiedener Aluminiumlegierungen die resultierende Legierung in der Regel nicht mehr für die Anwendung in einem niedriger legierten Werkstoff eingesetzt werden kann („niedriglegiert“ heißt, dass ein Metall nur geringe Mengen an Legierungselementen enthält). Entsprechend wichtig ist die Vermeidung solcher Vermischungen vor dem Einschmelzen durch Schrottaufbereitung und -sortierung.



*Die effektive Recyclingrate (Recyclingeffizienz) für ein Metall ergibt sich aus dem Produkt der Wirkungsgrade der einzelnen Stufen.¹⁸⁴ Im Beispiel werden 30 Prozent der relevanten Altgeräte gesammelt (Sammelleffizienz), bei der Aufbereitung gehen 40 Prozent des Goldes in „falschen“ Fraktionen (Stahl, Kunststoff, Stäube etc.) verloren. Die Zahlen sind realistisch für die Gewinnung von Gold aus Consumer-Elektronik in Deutschland und Europa.

Abbildung 3.24: Recyclingprozesskette für Konsumgüter – Beispiel Recycling von Technologiemetallen aus Leiterplatten.¹⁸⁵ Der Überblick zeigt die Komplexität der Prozesskette und die damit verbundenen wirtschaftlichen Herausforderungen: Die logistische Ebene, die zeigt, wo Sekundärrohstoffe anfallen und verarbeitet werden und wie viele Akteure jeweils involviert sind, ist der technischen Ebene der Verarbeitungsstufen gegenübergestellt.

aufgrund ihrer großen Masse eine wichtige metallische Rohstoffquelle. Andere Produkte, wie zum Beispiel Smartphones, sind aufgrund der großen Stückzahl von Bedeutung. Die extreme Heterogenität oder auch die schnellen Änderungen durch kurze Produktlebenszyklen bewirken, dass die Verarbeitung dieser Lagerstätten aus sekundären Rohstoffen mit völlig anderen Herausforderungen verbunden ist und starken Änderungen über Raum und Zeit unterliegt. Beispiele für diese starken Veränderungen sind die erwähnte Entwicklung vom Röhrenfernseher zum Flachbild-TV oder vom Festplattenspeicher zum Flash Memory. Für ein wirkungsvolles Recycling und eine umfassende Nutzung sekundärer Rohstoffe ist es also besonders wichtig, diese zu identifizieren („explorieren“), zu

erfassen und vorzusortieren. Genauso bedeutend ist dabei der Aufbau einer entsprechenden Logistik. Dazu gehört auch, die einzelnen Stufen in der Prozesskette, die Logistik, die Demontage und die Aufbereitung aufeinander abzustimmen. Denn davon hängt letztlich die Höhe der erzielbaren Recyclingraten ab (Abbildung 3.24).

Recyclingraten

Hohe Recyclingraten von mehr als 50 Prozent werden bisher im Wesentlichen nur für die Haupt- und Edelmetalle erreicht (Abbildung 3.25). Neben der Weiterentwicklung der metallurgischen Verfahren gilt es hier auch, durch angepasstes Produktdesign womöglich inkompatible Elementverbindungen zu vermeiden. Die Versorgung mit Sekundärrohstoffen und eine ausreichende Schrottqualität (unter anderem Rohstoffgehalt und Kleinteiligkeit) stellen für europäische Hütten eine Herausforderung für

¹⁸⁴ Übernommen nach Hagelüken 2014-2, S. 165.

¹⁸⁵ Hagelüken 2014-1.

Früher klassische Materialien für Kupferrecycling	
Kupferschrott	94 – 99 % Kupferinhalt
Legierungsschrott	50 – 90 % Kupferinhalt
Rückstände (Schlacken, Krätzen, Stäube)	15 – 60 % Kupferinhalt
Heute steigender Einsatz von „modernen“ Recyclingmaterialien	
Schreddermaterial	25 – 60 % Kupferinhalt
Leiterplatten, unberaubt	12 – 16 % Kupferinhalt
Elektro- und Elektronikgeräte-Abfall (Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE)	4 – 20 % Kupferinhalt
Industriekatalysatoren, Industrieschlämme etc.	1 – 50 % Kupferinhalt
Aufbereitete Landfill-Mining-Rohstoffe (Deponien)	> 10 % Kupferinhalt

Tabelle 3.1: Einsatz von Materialien für das Kupferrecycling in Westeuropa und deren Kupfergehalte¹⁸⁶

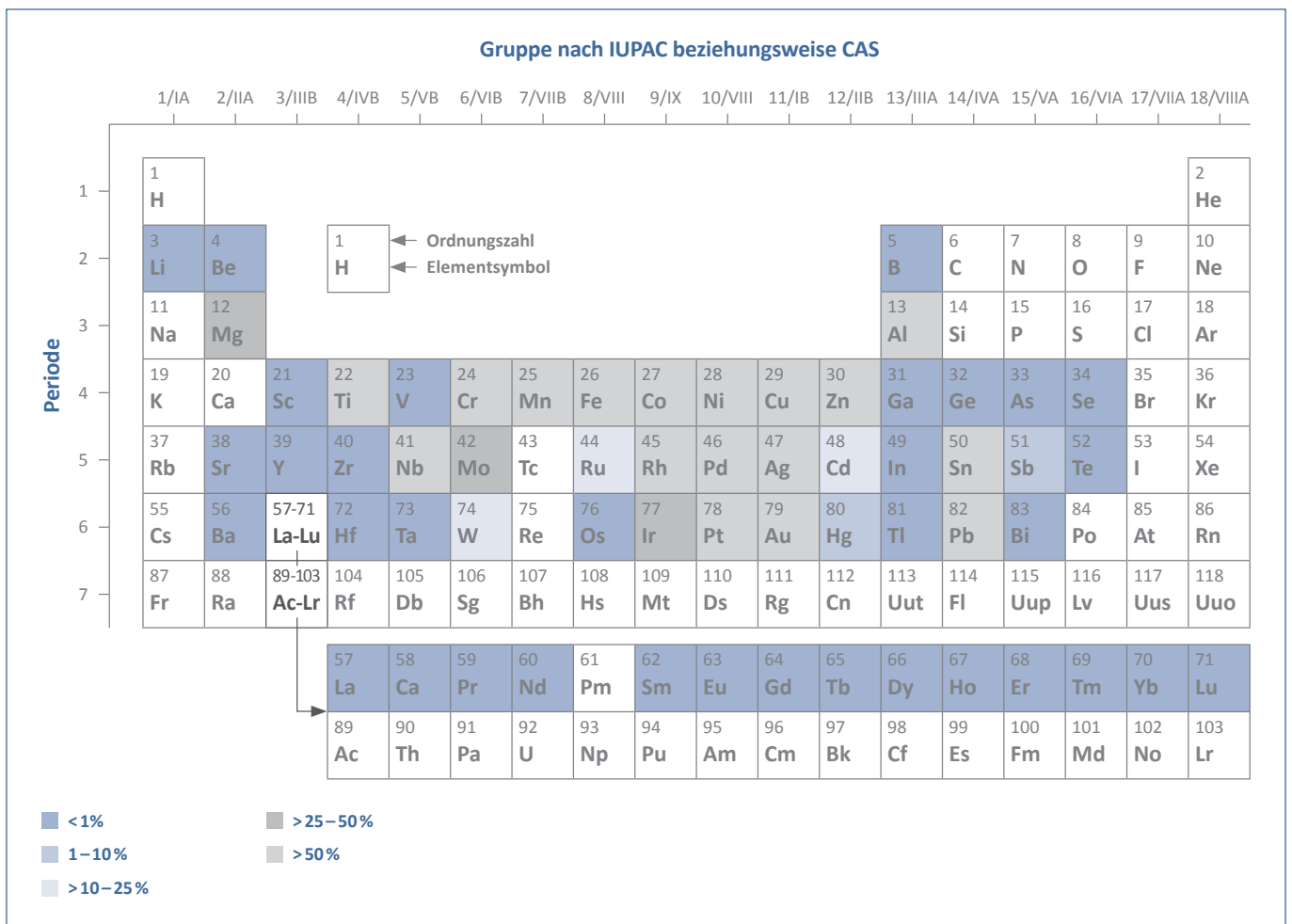


Abbildung 3.25: Durchschnittliche globale Raten eines funktionalen End-of-Life-Recyclings für sechzig Metalle (also am Ende ihres Produktlebenszyklus).¹⁸⁷ Funktionales Recycling meint dabei, dass die Materialeigenschaften – gleich dem Primärrohstoff – für weitere Verwendungen erhalten bleiben. Für farblich nicht kodierte Elemente sind entweder keine Daten vorhanden beziehungsweise keine Abschätzungen möglich oder diese wurden in der Studie nicht analysiert. Metall-emissionen von Kohlekraftwerken wurden nicht berücksichtigt.

¹⁸⁶ Kawohl 2011.
¹⁸⁷ Nach UNEP 2011.

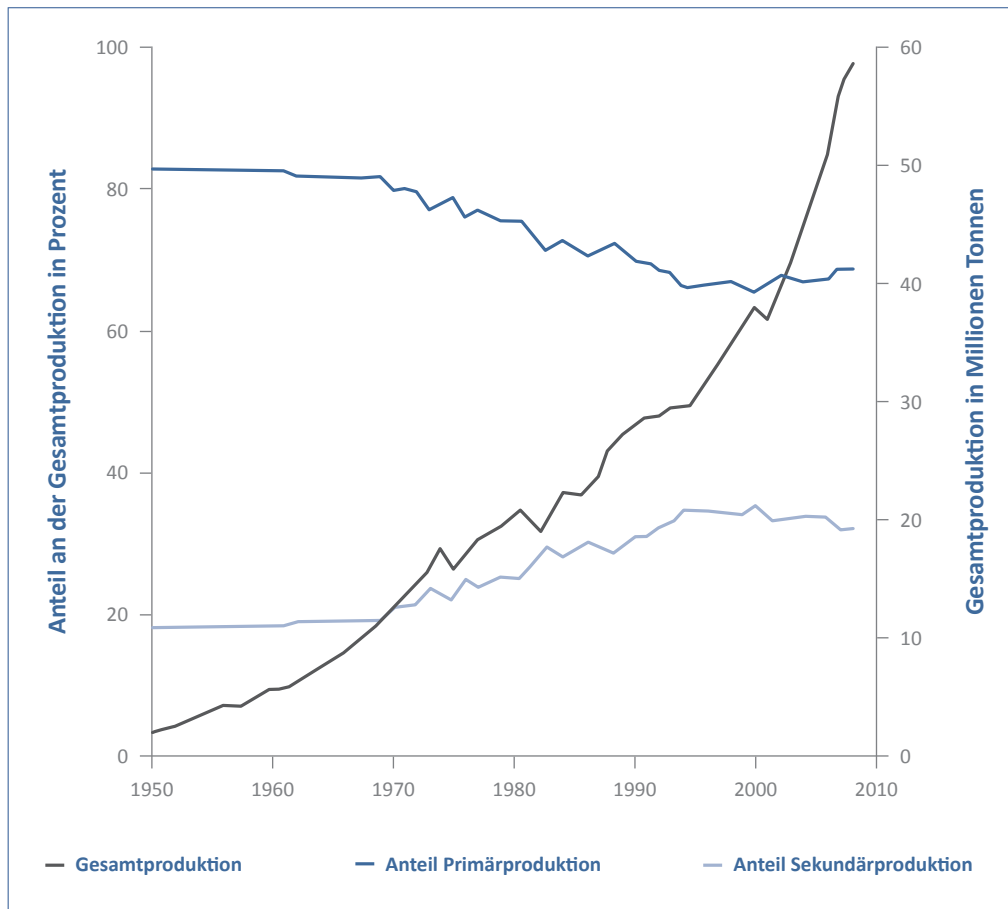


Abbildung 3.26: Entwicklung der weltweiten Aluminiumproduktion aus primären und sekundären Rohstoffquellen¹⁸⁸

die Rohstoffrückgewinnung dar, an die sie sich fortlaufend anpassen müssen (Tabelle 3.1). Auch die Entwicklung neuer Aufschluss- und Sortierverfahren ist wichtig, mit denen vor der Metallurgie inkompatible Baugruppen oder Materialien aussortiert werden können, ohne dass dabei andere wertvolle Metalle verloren gehen. Prä-metallurgische Vorsortierungen, wie zum Beispiel die Abtrennung von Magneten aus Elektronikprodukten, ermöglichen beispielsweise die Rückgewinnung der Seltene-Erden-Elemente. Ohne diese Sortierung würden die Seltene-Erden-Elemente in der Kupfermetallurgie verloren gehen. Auf der anderen Seite dürfte die kostengünstige Abtrennung von kleinen Tantalkondensatoren aus Leiterplatten kaum möglich

sein, ohne dass dadurch der Verlust des in den gleichen Leiterplatten und Kondensatoren enthaltenen Palladiums und Silbers hinzunehmen ist.

Da die Rohstoffdepots in der menschlichen Technosphäre immer größer werden (Metalle werden gebraucht und nicht verbraucht), wird die Menge der aus Sekundärmaterialien gewonnenen Rohstoffe mit dem Aufbau leistungsfähiger Recyclingkreisläufe zunehmen. Das zeigt das Beispiel des Aluminiums (Abbildung 3.26): Nach Informationen des International Aluminium Institutes in Paris betrug der Anteil aus Sekundärrohstoffen an der weltweiten Aluminiumproduktion 1960 17 Prozent. Im Jahr 2009 lag er trotz deutlich gesteigener Gesamtproduktion bei 30 Prozent. Für das Jahr 2020 wird mit 37 Prozent gerechnet. Beim Stahlverbrauch kamen 2013 in Deutschland 46 Prozent aus

¹⁸⁸ Modifiziert und übersetzt nach IAI 2014: Mit freundlicher Genehmigung des International Aluminium Institute (IAI, <http://www.world-aluminium.org>).

dem Sekundärkreislauf, beim Aluminium waren es sogar 55 Prozent, beim Kupfer 44 Prozent, beim Blei 31 Prozent (2012) und beim Zink 16 Prozent.¹⁸⁹ Je nach Metall gibt es andere Recyclingwerte. Allen Metallen aber ist gemein, dass der Recyclinganteil nicht ausreicht, um den gesamten Bedarf zu decken.

BOX IX: Einfluss der Verweilzeit auf das sekundäre Rohstoffpotenzial – Beispiel Kupfer

Bei der Gewinnung von Rohstoffen und insbesondere Metallen aus den sekundären Rohstofflagerstätten der Technosphäre, ist zu beachten, dass die Metalle alle eine Verweilzeit im aktiven Wirtschaftskreislauf haben. Erst wenn ein Produkt sein Lebensende erreicht und aus diesem aktiven Kreislauf ausscheidet, steht es für die Wiedergewinnung zur Verfügung. Stagniert der Rohstoffgebrauch über diese Verweilzeit nicht, sondern steigt er, so ist der für das Recycling zur Verfügung stehende Anteil immer geringer als der benötigte Bedarf. Die Idee, eine Volkswirtschaft könne bei steigenden Rohstoffverbräuchen allein von ihren Sekundärrohstoffen leben, ist in diesem Falle nicht umsetzbar (Abbildung 3.27).

Am Beispiel Kupfer lässt sich dieser Zusammenhang in einem Gedankenexperiment noch einmal verdeutlichen: Die Lebensdauer von Produkten und Infrastruktur ist in den einzelnen Sektoren sehr unterschiedlich, im Elektronikbereich beträgt sie wenige Jahre, im Baubereich 40 bis 50 Jahre. Für das Gedankenexperiment wird eine durchschnittlich gewichtete Lebensdauer über alle Sektoren von 30 Jahren angenommen.

1982 betrug der weltweite Kupfereinsatz 9,1 Millionen Tonnen, 2012 waren es 20,6 Millionen Tonnen. Geht man optimistisch von einer weltweiten Sammeleffizienz von 90 Prozent (Effektivität der ersten Recyclingprozessstufe) aus, so standen, bei einer Produkt-Lebensdauer von 30 Jahren, 2012 überhaupt nur 8,2 Millionen Tonnen des 1982 weltweit eingesetzten Kupfers zur Verfügung. Das entspräche etwa 40 Prozent des weltweiten Kupferverbrauchs 2012.

Die deutschen Zahlen sehen etwas besser aus, da hier im betrachteten Zeitraum der Gesamtbedarf weniger stark gestiegen ist: Der Verbrauch lag 1982 (Bundesrepublik und DDR) bei 880.000 Tonnen und ist bis 2012 auf gut 1,1 Millionen Tonnen pro Jahr gestiegen. Bei einer Sammeleffizienz von 90 Prozent, die für Deutschland sogar realistisch erscheint, standen 2012 aus dem Recycling theoretisch 790.000 Tonnen Kupfer zur Verfügung, also etwa 70 Prozent des in Deutschland benötigten Kupfers. Die tatsächlichen Recyclingquoten (Recyclingeffizienz) beim Kupfer lagen in Deutschland zwischen 2000 und 2009 zwischen 50 Prozent und 60 Prozent.

¹⁸⁹ BGR 2014-2.

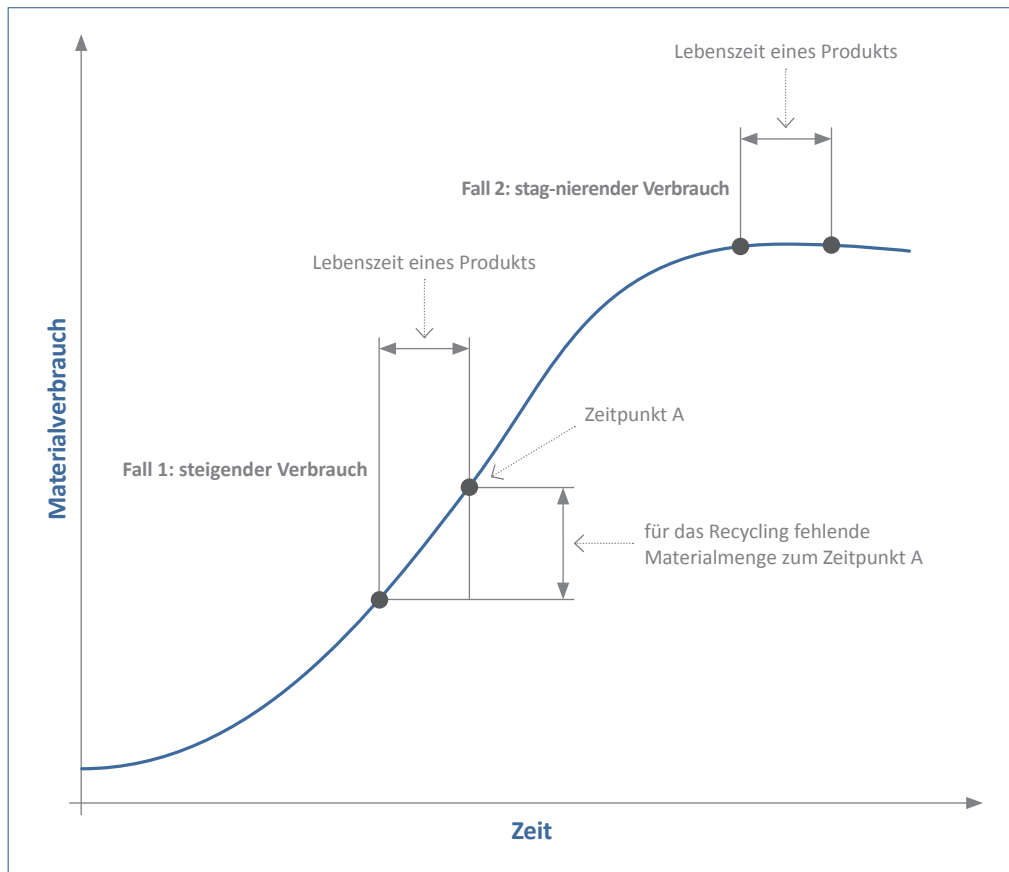


Abbildung 3.27: Idealisierte Wachstumskurve für Rohstoffe.¹⁹⁰ Die Recyclingmöglichkeiten sind beschränkt. Fall 1 zeigt, dass Zeiten des Wachstums immer ein Defizit des theoretisch verfügbaren Sekundäranteils für einen späteren Zeitpunkt bedingen. Nur im Fall 2, bei konstantem Verbrauch, ist theoretisch dieselbe Menge Sekundärmaterial auch zu einem späteren Zeitpunkt verfügbar.

Recycling komplexer Gemische

Das Ideal einer Wiederverwertung von hundert Prozent eines Rohstoffs ist nicht nur wegen der Produktlebenszeit beziehungsweise der Verweilzeit schwer zu erreichen. Ein weiterer limitierender Faktor, der zurzeit einer Optimierung der Recyclingraten entgegensteht, ist die Komplexität der Metallgemische. Ein „100-Prozent-Recycling“ aller Elemente ist bei komplexen Stoffgemischen nicht möglich. Je nach eingeschlagener Verfahrensrouten beim Recyclingprozess wird es, wie oben am Beispiel von Tantal-kondensatoren auf Leiterplatten dargestellt, zwangsläufig zu Verlusten bestimmter Stoffe kommen. Hierbei spielt auch eine Rolle, dass Rohstoffe in Produkten – oft Technologiemetalle – gegenüber den primären Rohstoffen zuweilen nicht konzentriert,

sondern in sehr geringen Konzentrationen enthalten sind. So ist der Indiumgehalt im Fernsehglas niedriger als der Indiumgehalt in der Zinkblende, dem wesentlichen Erz des beibrechenden Indiums.

In diesem Zusammenhang ist auch der Energieeinsatz zu berücksichtigen, sofern das Recycling auch das Ziel hat, den Energieeinsatz und damit die Umweltbelastung insgesamt zu reduzieren. Dies ist ein weiterer limitierender Faktor hinsichtlich des utopischen Ideals, hundert Prozent der gebrauchten Rohstoffe zu recyceln: In den Diagrammen der Abbildung 3.28 ist der Energiebedarf pro Tonne Metall gegen inkrementelle Mengen Metall aufgetragen. Diese sind dabei ansteigend von links nach rechts nach dem notwendigen Energiebedarf für ihre jeweilige Gewinnung gerankt: Links

¹⁹⁰ Übersetzt und modifiziert nach Steinbach/Wellmer 2010.

ist der Energieaufwand für Primär- und Sekundärrohstoffe getrennt dargestellt, rechts für ein Gemisch aus Primär- und Sekundärrohstoffen. Um einen Jahresbedarf an metallischen Rohstoffen decken zu können, müssen sukzessive auch Quellen verwendet werden, die einen höheren Energiebedarf aufweisen, zum Beispiel aufgrund geringerer Rohstoffkonzentrationen oder komplexerer Stoffmischungen. Dies ist in beiden Grafiken am Anstieg der jeweiligen Kurven zu erkennen. Bei Sekundärrohstoffen ist dieser Effekt allerdings ausgeprägter. Während sich im Vergleich zur Primärgewinnung ein großer Teil mit geringerem Energieaufwand gewinnen lässt, kann im ungünstigsten Fall etwa sehr komplexer Materialmischungen der Energiebedarf sehr viel höher sein. Dadurch ergibt sich in der rechten Darstellung ein energetisches Optimum bei einem Mischungsverhältnis von etwa 65 Prozent Sekundär- zu 35 Prozent Primärrohstoffen. Solange Sekundärrohstoffe verfügbar sind, die energetisch günstiger zu gewinnen sind als Primärrohstoffe, sinkt der Energiebedarf mit steigendem Sekundäranteil. Will man jedoch einen sehr hohen Sekundäranteil erreichen, so muss zunehmend auf Sekundärrohstoffe zurückgegriffen werden, deren Gewinnung aufwändig ist. In diesem Fall kann ein steigender Sekundäranteil zu einem höheren Energiebedarf führen.

Bei reinem Metall ist die Sekundär-gewinnung immer energie günstiger.¹⁹¹ So ergeben sich bei der Verwendung von sekundärem Aluminium Energieersparnisse von etwa 95 Prozent, beim Kupfer von etwa 85 Prozent, beim Blei von etwa 65 Prozent. Dabei ist Kupfer auch ein idealer Sammler¹⁹² für Edel- und Nebenmetalle, wie Selen, Tellur oder Nickel. Doch je komplexer die Sekundärrohstoffe werden, desto energieaufwendiger wird das Recycling, sofern

es nicht verfahrensseitig gelingt, mehrere Metalle energieeffizient gleichzeitig aus solch komplexen Materialien zu gewinnen. Wenn – wie zum Beispiel in Leiterplatten – Edelmetalle enthalten sind, ist das Recycling in der Regel auch bei niedrigen Konzentrationen und komplexen Materialien energetisch positiv, da in primären Lagerstätten die Konzentrationen oft noch deutlich geringer sind. Wie oben am Beispiel von Indium in Fernsehglas beschrieben, kann die Konzentration in Sekundärlagerstätten allerdings auch geringer sein als in Primärlagerstätten. Auch die Energiebilanz ist bei den Sekundärrohstoffen damit nicht in jedem Fall günstiger. Unter dem Gesichtspunkt der Minimierung des Energieverbrauchs ist bei der Rohstoffgewinnung durch eine Mischung aus Sekundär- und Primärmaterialien das Optimum zu erreichen (Abbildung 3.28 rechts).

Für eine sehr wahrscheinliche zukünftige Entwicklung kann man davon ausgehen, dass sich zwar der Energieaufwand für Sekundärmaterialien auch in Zukunft wenig ändern wird, dass aber der Energieaufwand für die Gewinnung von Primärmaterialien aufgrund voraussichtlich schwieriger werdender Lagerstättenverhältnisse steigen wird. Anzunehmende Gründe hierfür können sein, dass die Rohstoffgehalte in zukünftigen Primärlagerstätten geringer sind, die Erzkörper tiefer liegen und schwieriger aufzubereiten sind. Somit ist zu erwarten, dass sich das theoretische Energieoptimum bei der metallischen Rohstoffgewinnung, wie in Abbildung 3,28 dargestellt, hin zu noch größeren Anteilen an Sekundärmaterialien und weniger Primärmaterialien verschieben wird. Allerdings gibt es noch ein großes Potenzial im Bergbau, energieeffektiver zu produzieren, wie eine Studie des US Department of Energy (DOE)¹⁹³ über den gesamten amerikanischen Bergbau (außer Öl und Gas) im Jahre 2007 zeigte, in der ein Energieeinsparpotenzial von 53 Prozent aufgezeigt wurde.

191 Steinbach/Wellmer 2010.

192 Mit Sammler ist gemeint, dass sich in der Metallschmelze auch andere Metalle sammeln. Diese müssen dann durch andere Verfahren abgetrennt werden.

193 DOE 2007.

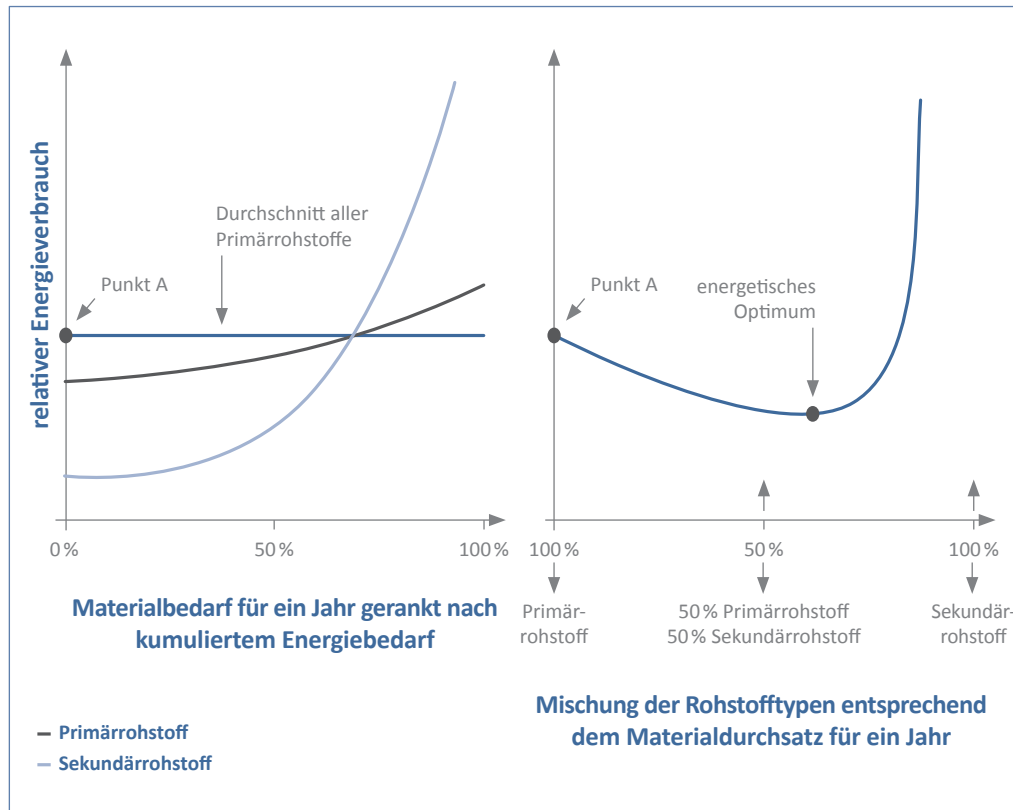


Abbildung 3.28: Energieaufwand für die Metallerzeugung aus Primär- und Sekundärrohstoffen.¹⁹⁴ Punkt A dient in beiden Grafiken als Vergleichspunkt und zeigt den durchschnittlichen Energieverbrauch für die Gewinnung aus Primärquellen.

Recycling optimieren

Vermeidbare Rohstoffverluste entstehen auch dadurch, dass außerhalb Europas in vielen Fällen kein oder nur ein minderwertiges Recycling stattfindet. Dies verschlechtert zudem insgesamt die Energiebilanz. Durch eine Verbesserung des Stoffstrommanagements sowie durch Einführung und Gewährleistung globaler Recyclingstandards ließe sich dies überwinden (BOX X). Letztlich muss die Kreislaufwirtschaft so verstanden und eingerichtet werden, dass die einmal in die Technosphäre eingebrachten Metalle am Lebensende der Produkte/Infrastruktur möglichst vollständig zurückgewonnen werden. Nur so lässt sich das Postulat des Gebrauchs statt Verbrauchs der Metalle auch in die gesellschaftliche Praxis umsetzen.¹⁹⁴

Wegen der komplexen Technik und des hohen Investitionsbedarfs gelten für die metallurgische Gewinnung, als

letzten Schritt der Prozesskette, die gleichen Konzentrationstrends wie in jedem Industriesektor (Economies of Scale), also für die Primär- und die Sekundärrohstoffgewinnung.

Rohstoffstrategisch muss es langfristig das Ziel sein, so weit wie möglich den gesamten Rohstoffbedarf aus dem Recycling zu gewinnen, indem einmal aus der Geosphäre in die Technosphäre überführte metallische Rohstoffe unter Minimierung der Verluste immer wieder in neue Produkt-Lebenszyklen überführt werden (Abbildung 3.29, BOX X). Dies wird sich nur stufenweise erreichen lassen. In einzelnen Bereichen ist dies allerdings heute schon fast der Fall. So kann der Bleibedarf für Batterien in Deutschland aus dem Sekundärkreislauf gedeckt werden.¹⁹⁵ Ein anderes Beispiel für einen Kreislauf mit minimiertem Verlust ist Wolfram, das für Hartmetallschneiden zur Metallbearbeitung

¹⁹⁴ Übersetzt und modifiziert nach Steinbach/Wellmer 2010.

¹⁹⁵ Steinbach/Wellmer 2010.

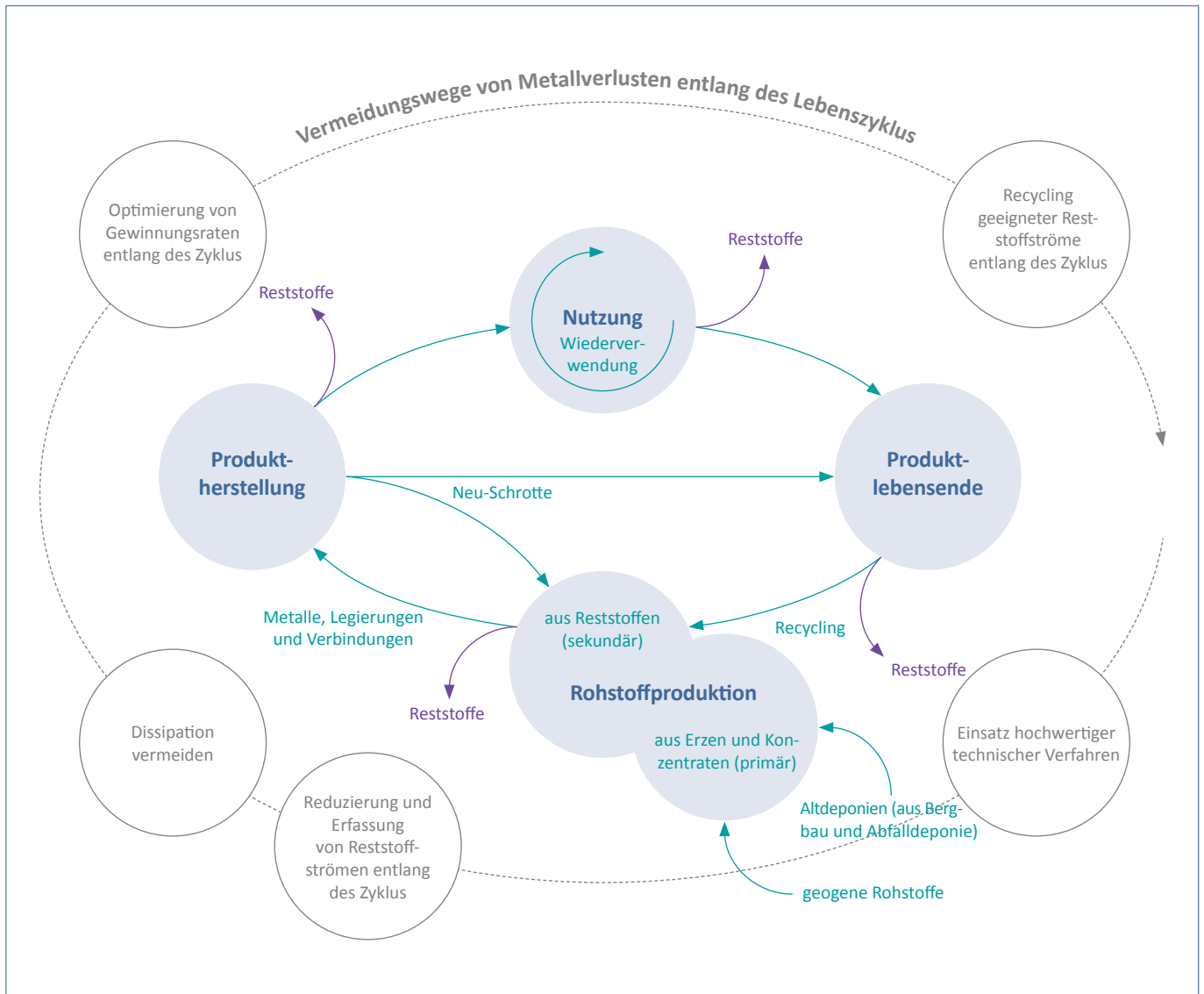


Abbildung 3.29: Ideal einer Kreislaufwirtschaft für Metalle.¹⁹⁶ Im Lebenszyklus eines metallischen Rohstoffs von der primären bergbaulichen Gewinnung bis zum Recycling ergeben sich Verluste, Abkürzungen und Wechselwirkungen. Um Stoffkreisläufe zu optimieren und die Rohstoffeffizienz zu erhöhen, sind künftig Effizienzsteigerungen in den einzelnen Zyklusstufen und eine Vermeidung von Verlusten nötig.

BOX X: Das Problem der unvollständigen Stoffkreisläufe – Beispiel Metalle

Anders als die geologischen Lagerstätten sind die sekundären Lagerstätten – mit Ausnahme der massiven Infrastruktur wie Stromleitungen – nicht ortsfest. Anschauliche Beispiele sind Autos, Computer, Mobiltelefone. Ihr Nutzungsende bedeutet nicht, dass sie hier auch als Altprodukte für das Recycling zur Verfügung stehen. In Deutschland und Europa zum Beispiel gehen sekundäre Rohstoffe in großem Umfang durch legitime Exporte in Form von Gebrauchsgütern, aber oftmals auch in Form dubioser oder illegaler Abfallexporte verloren. Die Rohstoffe werden in Form von Produkten, Komponenten (zum Beispiel als Leiterplatten oder Katalysatoren) oder Fraktionen nach der Aufbereitung exportiert.

Da in vielen Fällen außerhalb Europas kein oder nur ein minderwertiges Recycling stattfindet,

¹⁹⁶ Modifiziert nach Hagelüken 2014-2.

führt dies nicht nur zu vermeidbaren Rohstoffverlusten für Deutschland oder Europa, sondern zugleich zu unwiderruflichen Verlusten (Dissipation) für die globale Kreislaufwirtschaft. Die Größe dieses „Schlupfes“ zwischen dem Potenzial der sekundären Rohstofflagerstätte und der tatsächlichen Sekundärproduktion hängt maßgeblich von den technischen und politisch-gesellschaftlichen Rahmenbedingungen ab. Bei letzteren spielen Abfallgesetze und ihr Vollzug eine wichtige Rolle. Der Export von Altgeräten wird weitgehend durch wirtschaftliche Anreize getrieben, wobei die treibende Kraft in vielen Fällen nicht etwa bessere Recyclingverfahren im außereuropäischen Ausland sind, sondern vielmehr die Externalisierung von Umwelt- und Sozialkosten.

eingesetzt wird. Die Schneiden werden nachgeschliffen oder recycelt und nur das abgetragene Hartmetall ersetzt.

Beim Ausblick bis zum Jahr 2050 ist abschließend festzustellen, dass in der Geo- und der Technosphäre genügend Potenziale vorhanden sind, auch um eine steigende Nachfrage zu decken. Voraussetzung ist eine funktionierende Marktwirtschaft, die auf Preisanreize reagieren kann (siehe Kapitel 2.4). Weitere Voraussetzungen sind leistungs- und zukunftsfähige Infrastrukturen sowohl technisch-ökonomisch als auch im Bereich der Forschung, wodurch die Wirtschaft – in deren Verantwortung die Rohstoffversorgung liegt – in die Lage versetzt wird, Projekte der Rohstoffversorgung – im Primär- und im Sekundärbereich – zur kommerziellen Reife zu führen. Entsprechende Ansätze können der Industrie im Vorfeld beispielsweise unterstützend zur Verfügung gestellt werden, indem politische Rahmenbedingungen an Entwicklungen angepasst oder richtungsweisende Vorgaben gemacht werden. Ferner können durch gezielte Forschungsförderungen staatlicherseits Ansätze zur Verfügung gestellt werden.

3.4.5 Entwicklung von Technologien für das Recycling von sekundären Rohstoffen

Um die Probleme beim Recycling von sekundären Rohstoffquellen zu diskutieren, bietet sich das von Metallurgen entwickelte

„Metallrad“¹⁹⁷ an (Abbildung 3.30) – eine Darstellung, die Metalle nach der Art ihrer metallurgischen Verarbeitung ordnet. Die metallurgischen Gesetzmäßigkeiten für die Metalle, gleich ob sie aus primären oder sekundären Rohstofflagerstätten stammen, sind die gleichen. Denn beispielsweise ändern sich das Oxidationsverhalten und die Affinität der Metalle zueinander oder auch die Schmelztemperaturen nicht. Somit kann man Metalle quellenunabhängig mit einem Metallrad darstellen, entscheidend ist die Vergesellschaftung mit anderen Metallen/Elementen in Erzen oder auch in Produkten beziehungsweise Sekundärfractionen. Je nach Zielmetall und stofflicher Zusammensetzung des Ausgangsmaterials ergeben sich jedoch unterschiedliche metallurgische Routen, um eine Optimierung beim Gewinnungsprozess zu erreichen (BOX XI).

Die metallurgische Metallgewinnung ist im Recyclingprozess nur das letzte Glied, sodass eine Effizienzsteigerung insgesamt nur durch eine Optimierung auf allen Prozessstufen zu erreichen ist. Bei der Technologieentwicklung für das Recycling sekundärer Rohstoffe werden im Wesentlichen vier große Herausforderungen gesehen:

1. Die Gesamteffizienz der Sekundärmetallrückgewinnung ist das Produkt der Rückgewinnungsraten auf den einzelnen Stufen (siehe Beispiel in Abbildung 3.24). Dabei ist die erste Stufe,

¹⁹⁷ Verhoef et al. 2004; Reuter/Verhoef 2004.

die Sammelstufe, die wichtigste Stufe. Gerade bei vielen für zukünftige Energiesysteme wichtigen Metallen aber ist die Rückgewinnung auf der ersten Stufe sehr gering. So wird normale Verbraucherelektronik bis heute nur zu einem geringen Teil dem Recycling zugeführt. Die Gehalte pro Tonne Elektronikschrott sind oft höher als in einer Tonne Primärerz:¹⁹⁸ So sind zum Beispiel in Computer-Leiterplatten 100 bis 200 Gramm pro Tonne (g/t) Gold und bis zu 50 g/t Palladium oder 300 g/t Gold und 40 g/t Palladium in Mobiltelefonen gegenüber 1-10 g/t Gold oder 1-5 g/t Palladium in Erzen. Der spezifische Wert pro Mobiltelefon ist dagegen allerdings gering (um 1 €/Telefon), sodass ein ökonomischer Anreiz fehlt, die Produkte dem Recycling überhaupt zuzuführen. Heute gehen etwa zwanzig Prozent der weltweiten Bergwerksförderung von Palladium und Kobalt in kurzlebige Verbraucherprodukte, wie Mobiltelefone, PCs und Laptops. Bei Gold und Silber sind es jeweils vier Prozent. Entsprechend hoch sind die bislang weitgehend ungenutzten Potenziale für Hightech- und Edelmetalle einzuschätzen. Die Nutzbarmachung dieses Rohstoffpotenzials hängt von der Motivation der Endverbraucher ab, Altprodukte der Wiederverwertung zuzuführen.

2. Nicht nur das Einsammeln von Altgeräten hat Verbesserungspotenzial. Wichtig ist auch eine effiziente Organisation der gesamten Recyclingkette. Das bedeutet, dass nur qualitativ hochwertige Verfahren eingesetzt werden, mit denen sich viele Elemente sehr gut zurückgewinnen lassen. Zudem sollten hohe Umwelt- und Sozialstandards erfüllt werden. Obwohl entlang der Recyclingkette heute für fast alle Stoffe leistungsfähige Rückgewinnungsprozesse – sowohl auf der mechanischen

Stufe der Trennung und Aufbereitung wie auch auf der metallurgischen Stufe – vorhanden sind, werden sie in vielen Fällen nicht genutzt. Hierbei spielt die Wirtschaftlichkeit eine wesentliche Rolle. Weniger gegenüber der primären Rohstoffgewinnung, sondern vielmehr aufgrund des Einsatzes kostengünstigerer Verfahren, die entsprechend weniger leistungsfähig sind. Dies ist oftmals möglich, da die Kosten für Umwelt- und Sozialbelastungen hier nicht zum Tragen kommen, also nicht in die Kalkulation des Gewinnungsprozesses internalisiert werden. Problematisch ist hierbei vor allem der auf etwa 25 bis 30 Prozent zu schätzende illegale und dubiose Export von Elektronikschrott beziehungsweise Altprodukten in Regionen ohne ausreichende Recyclingstandards.

3. Design for Recycling (recyclingfreundliche Produktgestaltung) und dabei besonders Design for Disassembly (definierte Komponenten sind aus dem Produkt leicht demontierbar) können bei vielen Produkten noch verbessert werden, ohne dass darunter die Performance der Produkte leidet. Nur durch einen solchen vorausschauenden Ansatz kann die extreme Komplexität der „urbanen Lagerstätte“ etwas reduziert werden. Sind beispielsweise Magnete, Batterien oder Elektronikbauteile in Autos oder in Elektrogeräten besser zu erreichen, können sie vor dem Schredderprozess leichter ausgebaut und anschließend geeigneten Spezial-Gewinnungsprozessen zugeführt werden (Abbildung 3.29). Die Gewinnung von Spurenelementen nach dem Schredderprozess hat hingegen klare (physikalische) Grenzen.
4. Aktuell sind die Rückgewinnungsraten für einige Metalle unzureichend. Das betrifft unter anderem die Seltene-Erden-Elemente oder jene Metalle, für die es nur eine eingeschränkte eigene metallurgische Infrastruktur gibt. Mit Blick auf das Metallrad sind dies die Elemente der beiden äußeren Ringe,

¹⁹⁸ Aktualisiert nach Hagelüken 2011.

wie beispielweise die wichtigen elektronischen Metalle Gallium, Germanium oder Indium. Der Recyclingerfolg beziehungsweise die Rückgewinnungsraten sind hier – auch unter dem Aspekt einer eigenen Rohstoffversorgung – zukünftig deutlich zu verbessern. Das Forschungsprogramm des BMBF r4 „Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland“¹⁹⁹ adressiert diese Thematik.

3.4.6 Der Einfluss von Substitution und steigender Materialeffizienz auf das Rohstoffangebot

Neben der Rohstoffgewinnung von primären Rohstoffen aus der Geosphäre und aus sekundären Rohstoffen der Technosphäre gelten Substitutionsmaßnahmen als dritte Säule der Rohstoffsicherung. Die Substitutionsprozesse werden im Wesentlichen durch den in Kapitel 2.4 beschriebenen Regelkreis der Rohstoffversorgung getrieben. Mit Substitution werden heute generell fünf Kategorien von Maßnahmen beschrieben, die zum Ziel haben, ohne oder mit weniger des spezifischen Rohstoffs auszukommen:²⁰⁰

1. **Materialsubstitution:** Ein Material oder ein Element wird durch ein anderes ersetzt.
2. **Technologische Substitution:** Der Materialverbrauch wird verringert durch technologische Fortschritte und Verbesserung im Herstellungsprozess bei gleichbleibender Funktionalität.
3. **Funktionale Substitution:** Ein Produkt wird ersetzt durch ein anderes Produkt, das die gleiche Funktion erfüllt.
4. **Qualitätssubstitution:** Statt qualitativ hochwertiger Produkte werden durch Materialeinsparung solche mit geringerer Qualität hergestellt.
5. **Nicht-materielle Substitution:** Durch Zunahme nicht-materieller Faktoren wie Arbeit und Energie kann der Materialverbrauch reduziert werden.

Im Gegensatz zu den Maßnahmen 1 bis 3 sind die Maßnahmen 4 und 5 kaum interessant für die Energiesysteme der Zukunft. Ein Beispiel für Materialsubstitution (1) ist der Ersatz von Kupfer durch Aluminium bei der Elektrizitätsübertragung. Bei der Miniaturisierung von Tantal-haltigen Kondensatoren in der Elektronikindustrie, zum Beispiel für Mobiltelefone, handelt es sich um eine technologische Substitution. Ein Beispiel für eine funktionale Substitution ist der Ersatz von Synchronmotoren, deren Magnete Seltene-Erden-Elemente enthalten. Diese lassen sich durch sogenannte Käfigläufer-Asynchronmotoren oder Ferritmotoren ersetzen, die frei von Seltene-Erden-Elementen sind.

Da jedes Element spezifische Eigenschaften hat, gibt es immer wieder Anwendungen, in denen eine Elementsubstitution nur die zweitbeste Lösung ist. Stoffflussanalysen²⁰¹ zeigen, dass es kein Element gibt, das sich gleichermaßen in allen Anwendungen durch ein anderes Element perfekt substituieren lässt (Abbildung 3.31). In einer aktuellen Studie²⁰² sind für die von der Europäischen Kommission 2010 erstellte Liste kritischer Rohstoffe²⁰³ produkt- und anwendungsspezifische Substituierungsmöglichkeiten systematisch untersucht und aufgelistet worden. Substitutionsmöglichkeiten lassen sich in der Regel nur produktspezifisch lösen. Aus diesem Grunde sind pauschale Aussagen zur Substitutionsmöglichkeit eines Rohstoffes nur schwer zu treffen. Für die Untersuchungen, die Basis der summarischen Ergebnisse in Abbildung 3.31 sind, wurden Substitutionsmöglichkeiten einzelner Rohstoffe entsprechend ihrer unterschiedlichen Verwendungen gewichtet und zusammengefasst. Der so abgeleitete Substitutionserfolg für ein Element kann also nur eine Orientierung hinsichtlich des Potenzials geben – somit auch für die

199 BMBF 2012.

200 Schebek/Becker 2014.

201 Graedel et al. 2013.

202 Tercero Espinoza et al. 2013.

203 EC 2010.

BOX XI: Metallrad

Das Metallrad ist eine Darstellung, mit der die verschiedenen chemischen Elemente nach dem Typ der metallurgischen Verarbeitung untergliedert werden (Abbildung 3.30). In welchem Ring des Metallrades sich einzelne Elemente befinden, hängt zum einen vom Marktwert und der Konzentration dieser Elemente in den Erzen ab. Zum anderen sind vor allem aber auch die chemischen Eigenschaften, wie beispielweise die Oxidationsfähigkeit oder – wie beim Kupfer – die Eigenschaft, als „Sammler“ für andere Metalle zu fungieren, und die thermodynamischen Randbedingungen in den jeweiligen metallurgischen Prozessen (Verlust als Gasphase oder in der Schlacke) entscheidend.

Den inneren Ring des Rades bilden jene Metalle, für die die etablierten metallurgischen Prozesse primär entwickelt wurden. Dabei handelt es sich um die oxidischen Erze von Aluminium (Al), Chrom (Cr), Eisen (Fe), Magnesium (Mg), Mangan (Mn), Titan (Ti) und Zinn (Sn), die sulfidischen Erze von Blei (Pb), Kupfer (Cu) und Zink (Zn) und die sowohl oxidischen wie auch sulfidischen Erze von Nickel (Ni). Es folgen im nächsten Ring (I) ko-existent mit den Primärmetallen vorkommende Metalle, für die es in der Regel immer eine angeschlossene und bedeutsame eigene Produktionsinfrastruktur gibt. Sie haben einen hohen wirtschaftlichen Wert und werden zum Teil in Hightech-Produkten benötigt. Dies sind zum Beispiel die wertvollen Edelmetalle Gold (Au) und Silber (Ag), die bei der Blei- (Pb), Kupfer- (Cu), Nickel- (Ni) und Zinkverhüttung (Zn) gewonnen werden. Den nächsten Ring (II) bilden jene beibrechend vorkommenden Metalle, für die es nur eine begrenzte oder keine eigene metallurgische Infrastruktur gibt. Als Hightech-/Elektronik-Metalle sind sie zumeist wertvoll. Im äußeren Ring (III) erscheinen die beibrechenden Elemente, für die es bisher keine Infrastruktur gibt. Sie gehen bei der Verhüttung anderer Metalle zumeist in der Schlacke oder mit den Abgasen und Abwässern verloren. Antimon geht zum Beispiel bei der Kupfer- oder Nickelverhüttung in die Schlacke. Die Aufbereitung dieser Elemente ist kostenintensiv, da deren Gewinnungsprozess am Ende der Produktionskette liegt und hierfür ein anderes Verfahren benötigt wird

Die verschiedenen metallurgischen Prozesse sind über Jahrhunderte für Erze mit bestimmten Elementzusammensetzungen entwickelt worden, die in den natürlichen Lagerstätten der Geosphäre vorkommen. Dennoch steht selbst für einige wertvollere beibrechende Elemente aus bestimmten Lagerstättentypen bisher kein Extraktionsverfahren zur Verfügung (thermodynamische Grenzen). Zum Beispiel kann das wertvolle Tantal nicht direkt aus Zinnerzen gewonnen werden. Tantal geht in die Zinnschlacke und muss in einem getrennten Prozess, sofern die Wirtschaftlichkeit es erlaubt, gewonnen werden. Daraus wird deutlich, dass die neuen und „willkürlichen“ Elementkombinationen in Sekundärprodukten die Metallurgie in vielen Fällen vor noch viel größere Herausforderungen stellt. Bei komplexen Stoffgemischen ist ein 100-Prozent-Recycling aller Elemente nicht möglich. Je nach eingeschlagener Verfahrensrouten wird es zwangsläufig zu Verlusten bestimmter Stoffe kommen, da die Ausbringung nicht für alle Metalle gleichzeitig optimiert werden kann.

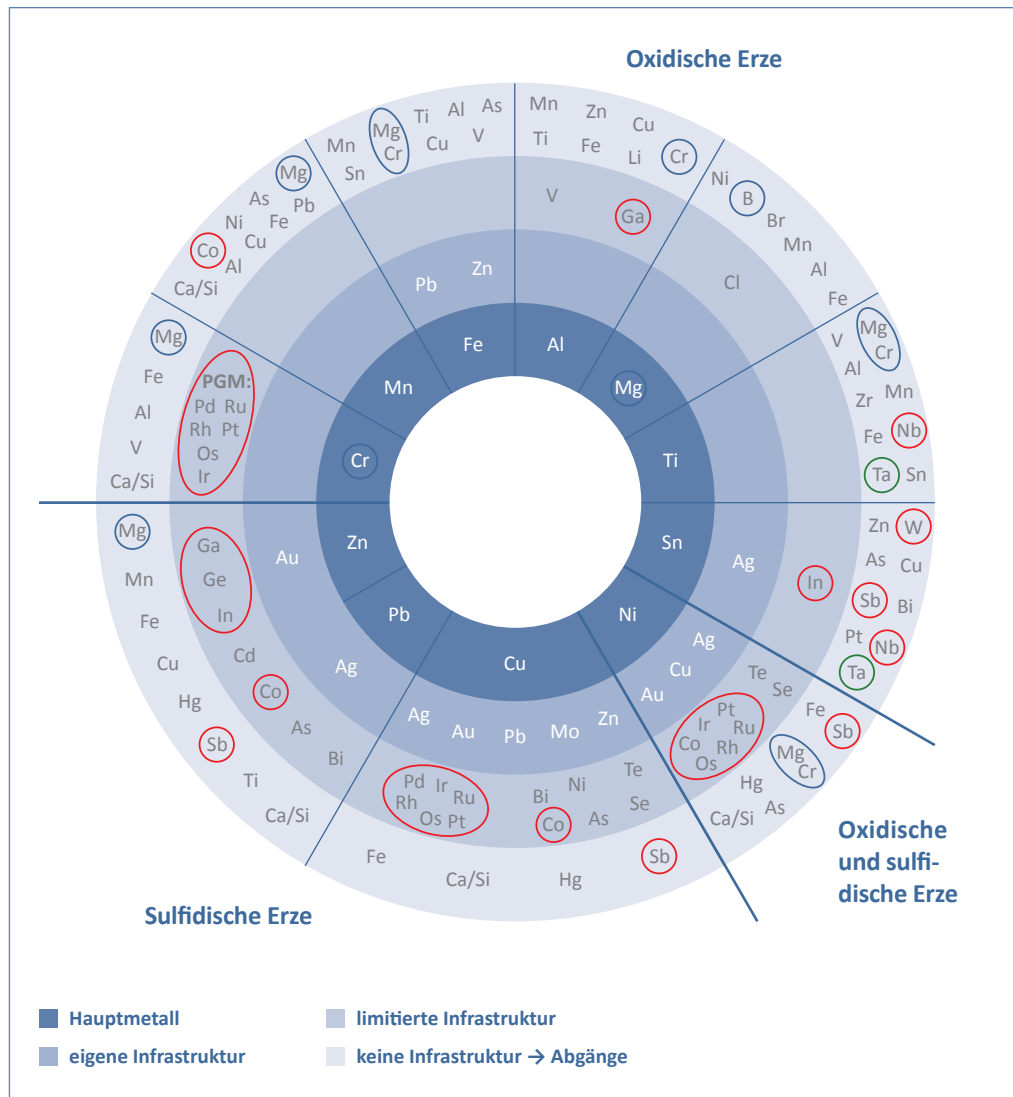


Abbildung 3.30: Das Metallrad.²⁰⁴ Ursprünglich baut diese Darstellung auf dem Verhüttungsprozess primärer Erze auf. Sie lässt sich aber auch für sekundäre Rohstoffe benutzen.²⁰⁵ Zur Orientierung sind hier die von der EU-Kommission in ihren Listen von 2010 und 2014²⁰⁶ als kritisch bewerteten Rohstoffe farblich gekennzeichnet: Die rot umkreisten Elemente sind die in 2010 als kritisch benannten Metalle. Hinzugekommen sind 2014 die mit Blau markierten Metalle. Das grün umkreiste Tantal (Ta) ist 2014 als einziges Element aus der Auflistung

Energiesysteme der Zukunft. Es kann aber nichts über den Einzelfall ausgesagt werden. Ein Rohstoff, der in diesem Globalbild eine hervorragende Substitutionscharakteristik zeigt, kann im Einzelfall für einen Hersteller ein nicht zu substituierendes und somit kritischer Rohstoff sein, wenn für die spezifische Anwendung keine Alternativen bekannt sind. Je geringer in Summe die

Substitutionsmöglichkeiten für Rohstoffe in einem Produkt sind, desto größer wird in einer Engpasssituation das Risiko für den Hersteller des spezifischen Produktes.

Zum anderen stellt Abbildung 3.31 eine statische Analyse dar und gibt keinen Hinweis auf das Innovationspotenzial. Es ist durchaus denkbar, dass ein Mangel an Rohstoffen und erhöhte Preise gemäß dem Regelkreis der Rohstoffversorgung eine intensive Suche nach Substitutionsmöglichkeiten und die Entwicklung entsprechender Technologien in Bewegung setzen. Die Lösung der Knappheiten von

²⁰⁴ Modifiziert nach Reuter/Verhoef 2004 und Verhoef et al. 2004.

²⁰⁵ Vergleiche UNEP 2013.

²⁰⁶ EC 2010: Liste für die EU mit 14 kritischen Rohstoffen; EC 2014: Liste für die EU mit 20 kritischen Rohstoffen.

Kobalt, ausgelöst durch die Shaba-Krise 1978²⁰⁷, oder kürzlich von Rhenium²⁰⁸ sind Beispiele hierfür. Im Falle von Kobalt konnten neue Legierungen mit permanentmagnetischen Eigenschaften²⁰⁹ und für Rhenium alternative Legierungskombinationen gefunden werden.

Wenn eine Eins-zu-Eins-Substitution nicht möglich ist, sondern nur eine funktionale Substitution, dann dauert es einige Zeit, bis ein alternatives Produkt entwickelt ist. Bis zum industriellen Einsatz können also mehrere Jahre vergehen.

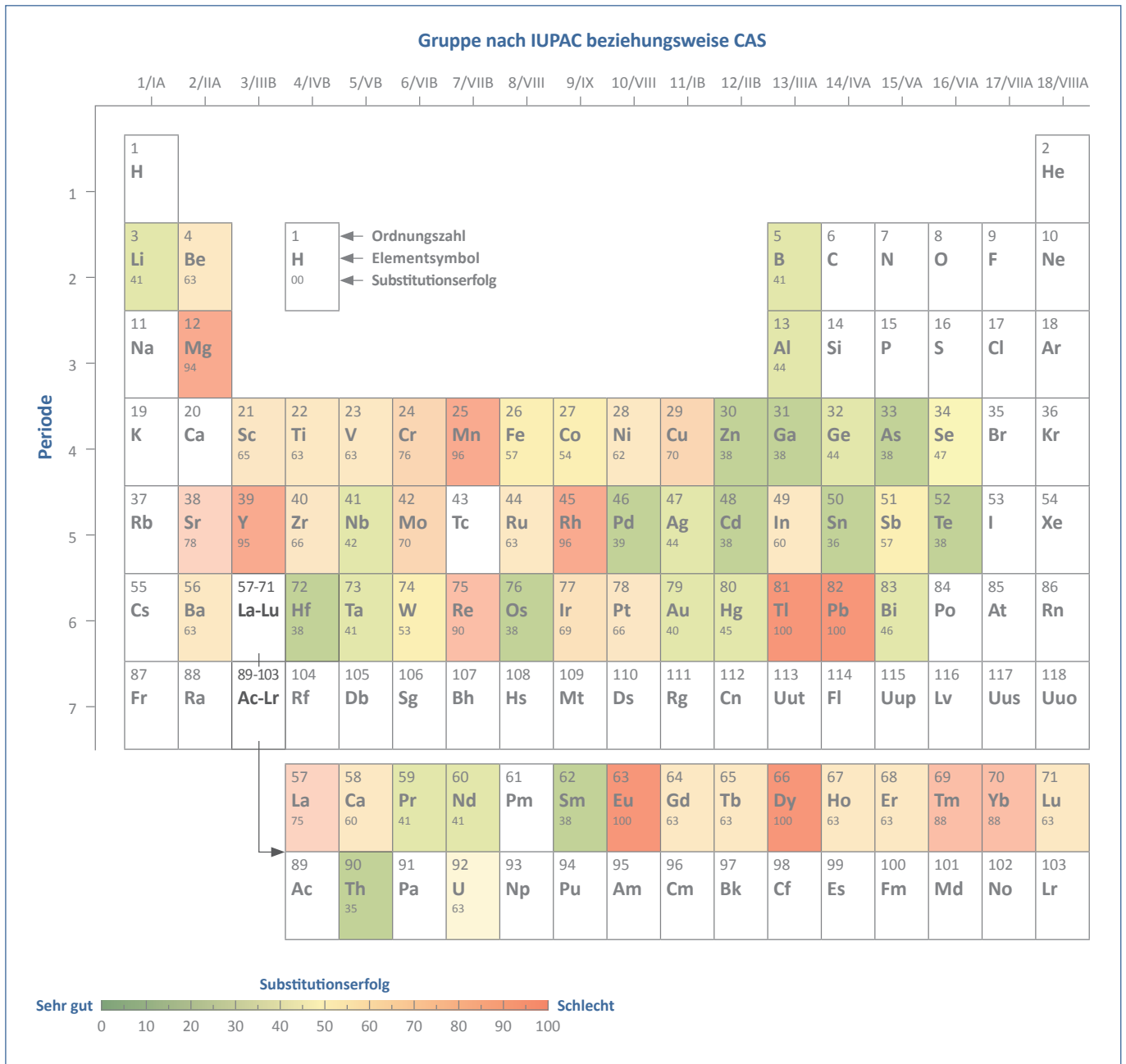


Abbildung 3.31: Durchschnittliche Effizienz der direkten Substitution von Elementen.²¹⁰ Der Substitutionserfolg ist farblich im Bereich von 0 bis 100 dargestellt. 0 indiziert dabei, dass für die Hauptanwendungsbereiche Ersatzstoffe bestehen. 100 bedeutet, dass keine adäquate Substitutionsmöglichkeit für irgendeine Anwendung besteht. Schlussendlich bleibt aber die Prüfung des Einzelfalls entscheidend.

²⁰⁷ Graedel et al. 2013.

²⁰⁸ Duclos et al. 2010.

²⁰⁹ US-CBO 1982, S. 33.

²¹⁰ Graedel et al. 2013, Abbildung 5.

Das Angebot von Sekundärrohstoffen und Entwicklung von Technologien für das Recycling

Den Rohstoffbedarf soweit wie möglich aus dem Recycling heimischer Altmaterialien zu decken, macht unabhängiger von Importen primärer Rohstoffe. Viele Potenziale sind hier aber noch ungenutzt.

Die Rohstoffrückgewinnung hat aufgrund von Stoffzusammensetzungen und individueller Bauweisen von Produkten andere Anforderungen als die primäre Rohstoffgewinnung. Ein „100-Prozent-Recycling“ ist nicht möglich, da der Rückgewinnung von Metallen aus komplexen Stoffgemischen physikalische Grenzen gesetzt sind. Dies sowie die Stoffverweilzeiten im Wirtschaftszyklus sind die Gründe, dass eine vollständige Deckung des Rohstoffbedarfes aus Sekundärmaterialien unmöglich ist.

Rohstoffverluste beim Recycling können aber durch recyclinggerechtes Produktdesign, die Etablierung von Stoffkreisläufen sowie global einheitliche Qualitäts- und Umweltstandards der Recyclingprozesse auch unter den Bedingungen freier Warenflüsse minimiert werden. Eine Kreislaufwirtschaft muss so aufgebaut werden, dass in die Technosphäre eingebrachten Metalle an ihrem Lebensende möglichst vollständig der Wiederverwertung zugeführt werden. Nur so lässt sich das Postulat des Gebrauchs statt Verbrauchs der Metalle auch in die gesellschaftliche Praxis übertragen.

Die Versorgung mit Sekundärrohstoffen sowie eine ausreichende Schrottqualität stellen für deutsche und europäische Hütten eine Herausforderung dar: Sie müssen sich durch die schnellen Lebenszyklen vieler (elektronischer) Produkte fortlaufend an wechselnde Schrottzusammensetzungen anpassen, also möglichst flexible Prozesse etablieren. Die Gesamteffizienz des Recyclings hängt von der Effizienz der einzelnen Verarbeitungsschritte ab. Gerade auf der ersten Stufe, beim Sammeln, ist die Effizienz teilweise gering, da für Verbraucher ein Anreiz fehlt, Altprodukte dem Recycling zuzuführen.

Bis zum Jahr 2050 sind in der Geo- und der Technosphäre zusammengenommen genügend Potenziale vorhanden, um eine steigende Rohstoffnachfrage zu decken. Voraussetzung hierfür sind eine funktionierende Marktwirtschaft, leistungs- und zukunftsfähige Infrastrukturen sowie Forschung und Entwicklung.

Die Grenzen der Substitution

Derzeit wird in der EU auch die Substitution von Materialien mit hohem Risiko durch Materialien mit geringerem Risiko diskutiert. Mit diesem Aspekt befasst sich insbesondere die jüngste Studie²¹¹ des Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission, genauer das Institut für Energie und Transport (JRC-IET). Natürlich ist das

Versorgungsrisiko eine abstrakte Gefährdung. Daher muss im globalen Wettbewerb jede Firma für sich entscheiden, wie sie am Weltmarkt mit den besten Produkten konkret bestehen kann – die Risiken minimiert und gleichzeitig die wirtschaftlichen Erfolgchancen maximiert. Eine Firma muss also das Rohstoffrisiko immer im größeren Zusammenhang sehen. Im Einzelfall mag es keinesfalls von

²¹¹ Moss et al. 2013, S. 142 ff.

BOX XII: Politische Anreize zur Materialeffizienz

Um den Stellenwert der Rohstoff- und Materialeffizienz und deren Effekte in der Wirtschaft stärker zu verankern, vergibt das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) den „Deutschen Rohstoffeffizienz-Preis“. Seit 2011 ist die Deutsche Rohstoffagentur vom BMWi mit der Ausrichtung und Organisation beauftragt. Mit dem Preis werden herausragende Unternehmensbeispiele für rohstoff- und materialeffiziente Produkte, Prozesse oder Dienstleistungen und anwendungsorientierte Forschungsergebnisse entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung bis zum Recycling ausgezeichnet.

Sowohl in der Rohstoffstrategie der Bundesregierung vom Oktober 2010²¹² als auch in der EU-Mitteilung vom Februar 2011²¹³ wird dem Thema Rohstoffeffizienz als Beitrag zur nachhaltigen Rohstoffgewinnung und -nutzung eine zentrale Bedeutung beigemessen. Neben der Verbesserung der Rohstoffeffizienz ist das rohstoffpolitische Ziel der Bundesregierung, die Rohstoffproduktivität in Deutschland bis 2020 (referenziert gegenüber 1994, entspricht also dem Wert 100) zu verdoppeln. 2013 betrug der Wert 147,8.²¹⁴ Die Rohstoffproduktivität ist der Quotient aus Bruttoinlandsprodukt und dem gesamten Rohstoff-/Materialverbrauch. Das bedeutet, dass eine Verringerung des Rohstoffeinsatzes bei gleicher Wertschöpfung oder die Steigerung der Wertschöpfung aus der gleichen Menge eingesetzter Rohstoffe zur Steigerung der Rohstoffproduktivität beitragen. Der Indikator wird unter anderem in der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie „Perspektiven für Deutschland“ der Bundesregierung²¹⁵ genutzt.

In diesem Zusammenhang ist auch die internationale Faktor-X-Bewegung zu nennen, die ebenfalls zum Ziel hat, die Rohstoffeffizienz unserer Gesellschaft insgesamt zu verbessern. Das bekannteste Beispiel der Faktor-X-Bewegung ist das internationale Factor-10-Institute²¹⁶, das das Ziel hat, die Rohstoffeffizienz der Gesellschaft um den Faktor zehn zu verbessern. Die Erhöhung der Materialeffizienz aus Gründen der Nachhaltigkeit ist ein wichtiges Ziel, das sich positiv auf die gesamte Rohstoffsituation auswirkt. Bezüglich zukünftiger Energiesysteme ist für deren Bereitstellung aber zunächst von einem generell erhöhten Rohstoffbedarf auszugehen. Effizienzmaßnahmen können hier vor allem eine Kostensenkung bewirken.

Vorteil sein, kritische durch weniger kritische Rohstoffe zu ersetzen. So kommt auch das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie in seiner Studie *Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems* (kurz: KRESSE)²¹⁷ zu dem Schluss, dass „der

Einsatz von möglicherweise kritischen mineralischen Rohstoffen vorteilhaft für die individuelle Ressourceneffizienz von Technologien sein kann, wenn Systeme dadurch insgesamt materialeffizienter und energieeffizienter werden.“

Ein Aspekt der Substitution, genauer der technologischen Substitution, ist auch die Erhöhung der Materialeffizienz, nämlich mit weniger Rohstoffen auszukommen. Der größte Anreiz ist natürlich, Materialkosten zu sparen. Im Falle der Umstellung des Energiesystems auf

²¹² BMWi 2010.

²¹³ EC 2011.

²¹⁴ Statistisches Bundesamt 2014, S. 41.

²¹⁵ Bundesregierung 2002.

²¹⁶ Factor 10-Institute 2010.

²¹⁷ Wuppertal Institut 2014, S. 186.

erneuerbare Energietechnologien ist diese Forderung anfänglich kaum zu erfüllen. Die Herstellung von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien ist bezogen auf die damit generierte Energieeinheit in vielen Fällen zunächst einmal rohstoffintensiver als die konventioneller Energieanlagen. Dies wirkt der Verbesserung der Rohstoffproduktivität zunächst entgegen.²¹⁸ Erst

bei der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus, von der Investition bis zum Betriebsende, ergibt sich eine Verbesserung der Rohstoffeffizienz, da bei erneuerbaren Energien keine fossilen Energierohstoffe verbraucht werden. Dies ist ein Beispiel dafür, dass zunächst in mehr Rohstoffe investiert werden muss, um letztendlich die Rohstoffeffizienz zu verbessern.²¹⁹

Substitution und steigende Materialeffizienz

Die Industrie kann flexibler auf Rohstoffengpässe reagieren, wenn entlang der gesamten Wertschöpfungskette nach Wegen gesucht wird, vor allem versorgungskritische Rohstoffe zu substituieren oder diese effizienter zu verwenden. Neben der Vermeidung des Einsatzes versorgungskritischer Rohstoffe und einer Verbesserung der Materialeffizienz, gehört dazu beispielsweise auch, dass Kunden vorab davon überzeugt werden, unter Umständen eine andere Materialzusammensetzung in den Produkten zu akzeptieren („Produktfreigabe“). Grundlage für eine erfolgreiche Substitution und für Ausweichstrategien ist, dass die Materialforschung in dieser Richtung intensiviert wird. Letztlich wird dadurch der Hightech-Standort Deutschland gestärkt – vor allem im Bereich kleinerer und mittlerer Unternehmen.

²¹⁸ Wellmer 2012-2; Vidal et al. 2013; Hertwich et al. 2014.

²¹⁹ Wagner/Wellmer 2009.

4 Aktuelle Rohstoffsituation – ein Überblick

Was die Versorgung mit Rohstoffen betrifft, sind grundsätzlich zwei Situationen zu unterscheiden: die Versorgung aus inländischen und die Versorgung aus ausländischen Quellen. Inländische Rohstoffe – das gilt für den primären Bergbau und die sekundäre Rohstoffgewinnung aus Altmaterialien gleichermaßen – sind im Hinblick auf politische Einflussnahme für die Industrie am sichersten. Aus privatwirtschaftlicher Sicht ist die Unterscheidung aber eigentlich irrelevant. Denn es gelten zwischen dem Exporteur und dem Importeur vertragliche Abmachungen. Diese Lieferverträge werden in der Regel auch dann erfüllt, wenn es inländische Engpässe geben sollte. Ausnahmen sind politische Eingriffe wie Exportrestriktionen, die von manchen Ländern erlassen werden, oder Sanktionen, wie sie derzeit beispielsweise im Kontext der Ukraine-Krise verhängt wurden.

Obwohl die Bedeutung der Rohstoffgewinnung in Deutschland im Lauf der Zeit deutlich abgenommen hat, ist Deutschland nach wie vor ein wichtiges Bergbauland. Deutschland ist der größte Braunkohlenförderer und der fünftgrößte Kaliproduzent der Welt sowie bedeutender Exporteur für Stein- und Kalisalz (Abbildung 4.1). Für den Eigenbedarf werden fast alle Steine- und Erden-Rohstoffe (wie Sand oder Kies) sowie einige Industriemineralien (wie Kaolin oder Gips) in Deutschland selbst gewonnen. Bei den nicht-erneuerbaren Energierohstoffen wurden im Jahr 2013 100 Prozent der Braunkohle, 13 Prozent der Steinkohle, 12 Prozent des Erdgases und rund 2 Prozent des Erdöls im Inland gefördert. Die Steinkohlenförderung läuft 2018 aus. Somit müssen die

fossilen Energierohstoffe überwiegend importiert werden. Mehr als zwei Drittel der Importbilanz für Rohstoffe entfällt derzeit auf fossile Energierohstoffe (Abbildung 4.2).

Im Jahr 2008 wurden ungefähr 20 Prozent von der in Deutschland als Energiequelle genutzten Biomasse importiert²²⁰, etwa 80 Prozent entstammen also aus heimischem Anbau (siehe Kapitel 4.3). Inländisch erzeugte Biomasse konnte aber nur deshalb in größerer Menge für Bioenergie genutzt werden, weil vor allem für Tierfutter zusätzlich Biomasse importiert wurde. Deutschland ist somit stark davon abhängig, sich Anteile der Nettoprimärproduktion von außerhalb seiner eigenen Grenzen anzueignen, um seinen gegenwärtigen Gesamtverbrauch an Biomasse zu decken.²²¹ Auch in Zukunft wird Deutschland einen zunehmenden Anteil der Bioenergieträger importieren müssen.²²²

Anders als bei fossilen Brennstoffen und der Biomasse ist Deutschland bei den durch Bergbau gewonnenen metallischen Rohstoffen praktisch zu hundert Prozent von Importen abhängig. Die inländische Sekundärproduktion leistet nur einen Teil der Rohstoffversorgung, der von Rohstoff zu Rohstoff unterschiedlich groß ist. Für Deutschland im Allgemeinen als auch für die Energiesysteme der Zukunft ist es daher wichtig, dass auf dem internationalen Markt Metallrohstoffe in ausreichender Menge

²²⁰ Bringezu et al. 2009.

²²¹ Leopoldina 2013; BMU/BMELV 2010.

²²² BMU/BMELV 2010.

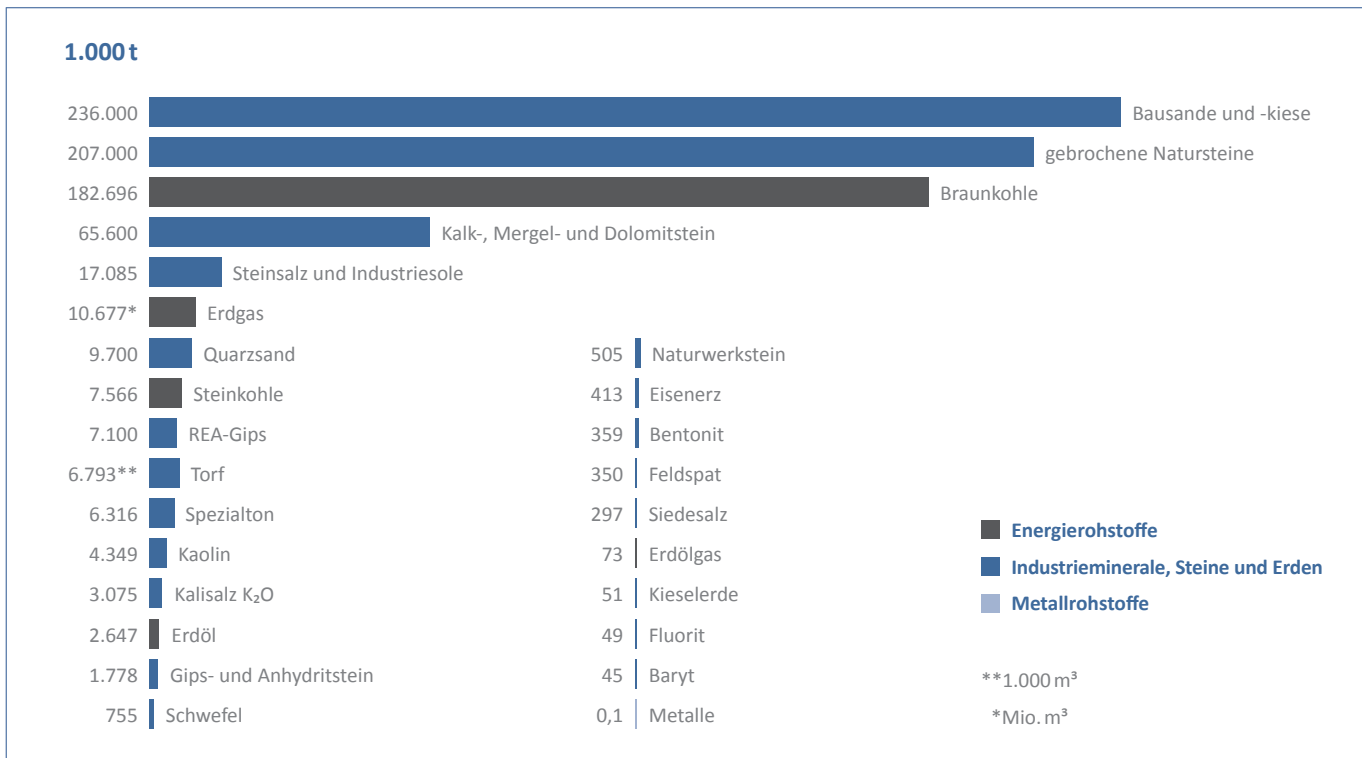


Abbildung 4.1: Rohstoffproduktion in Deutschland im Jahr 2013²²³

verfügbar sind. Diese werden vor allem durch primären Bergbau bereitgestellt. Dazu zählen Chromerze, die beispielsweise aus Südafrika und der Türkei bezogen werden, Eisenerze aus Brasilien, Kanada und Schweden, Germanium aus China, Russland und den USA sowie Kupfererze aus Peru, Chile, Argentinien und Brasilien. Von besonderer Bedeutung sind die wirtschaftsstrategischen Rohstoffe, die in vergleichsweise geringen Mengen eine große Hebelwirkung für die Wirtschaft haben. Dazu gehören die Stahlveredler, Refraktärrohstoffe, Rohstoffe für die Elektronikbranche und andere Hightech-Rohstoffe wie Seltene-Erden-Elemente oder Platingruppenelemente. 2013 betrug ihr Anteil an den nach Deutschland importierten Rohstoffen 5,8 Prozent (Abbildung 4.2).

Wie erwähnt, kann der Import von Rohstoffen durch Konzentrationseffekte auf Länder- oder Konzernebene (siehe Kapitel 3.4.1) oder durch politische Interventionen in Form von Exportrestriktionen (siehe Kapitel 3.4.2)

eingeschränkt werden. Dadurch kann es zu wirtschaftlichen Ausfällen kommen. Aus Sicht deutscher Unternehmen stellen diese potenziellen Importhemmnisse Risiken für freie Rohstoffflüsse und somit Schwachstellen in der industriellen Wertschöpfungskette dar. Der Industriestandort Deutschland könnte demnach wie folgt beeinträchtigt werden:

- Internationale Konkurrenten haben gegebenenfalls einen Vorteil durch besseren Zugang zu Rohstoffquellen, sodass die Gefahr der Abwanderung von deutschen Unternehmen der verarbeitenden Industrie ins Ausland besteht. Die oben beschriebenen Exportrestriktionen haben den Effekt, Produzenten im Lande zu bevorzugen.
- Auftretende Lieferengpässe können insbesondere bei einzelnen Rohstoffspezifikationen entstehen, für die Deutschland bereits heute eine hohe Importabhängigkeit und geringe Diversifizierung aufweist.

²²³ BGR 2014-2, S. 16.

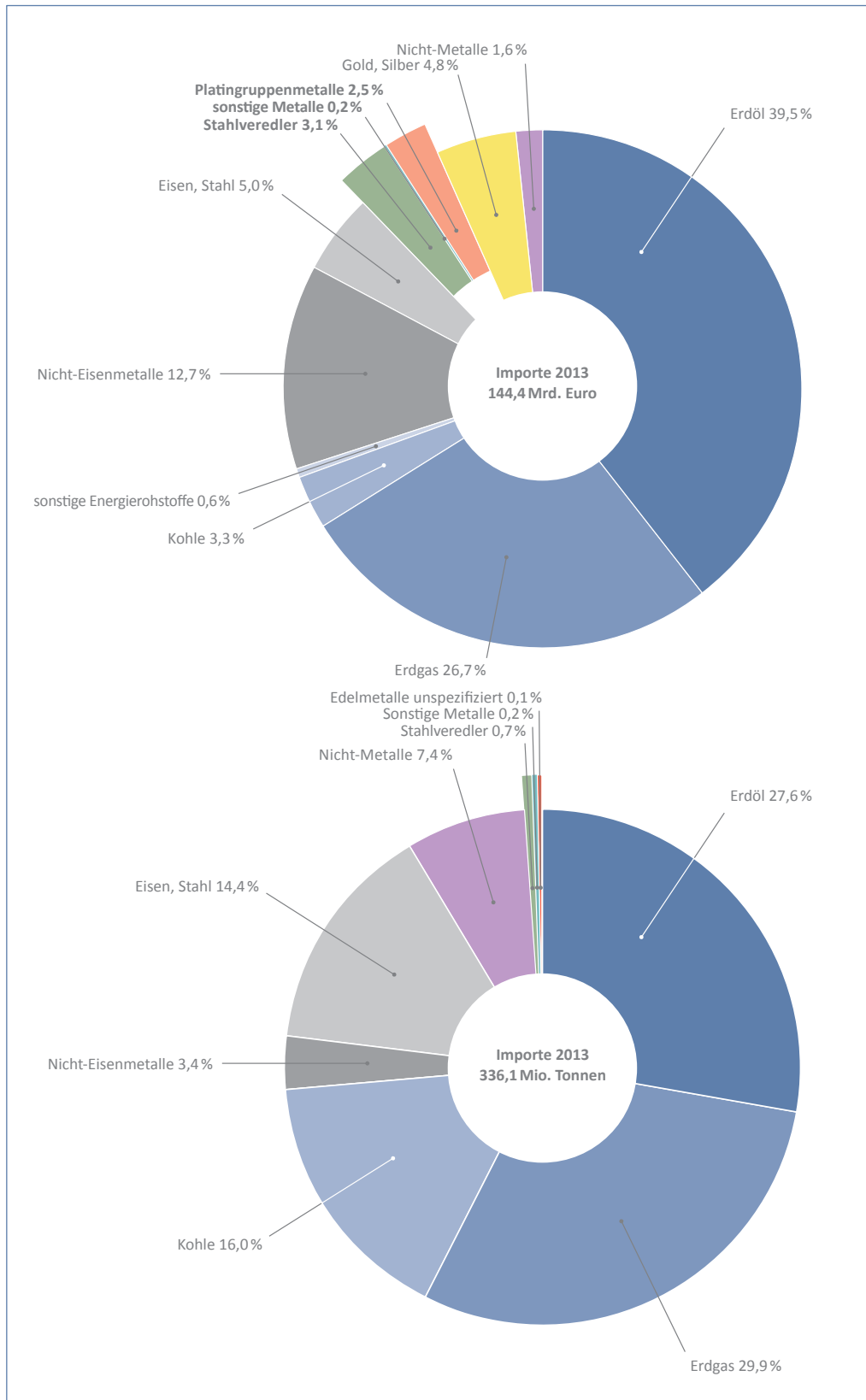


Abbildung 4.2: Wert- und Mengenanteile der 2013 nach Deutschland importierten Rohstoffe.²²⁴ Herausgehoben sind die wirtschaftsstrategischen Rohstoffe.

²²⁴ Aktualisiert und modifiziert nach BGR 2014-2, S. 19.

Die aktuelle Rohstoffsituation – ein Überblick

Für zukünftige Energiesysteme sind mineralische Rohstoffe beziehungsweise Metalle, fossile Energierohstoffe und Biomasse in unterschiedlichem Maße von Bedeutung. Die wichtigste Rohstoffgruppe für die Energiesysteme sind nach derzeitigem Stand der Technik die Metalle. Da die inländische Sekundärproduktion den Bedarf auf absehbare Zeit nicht decken kann, ist Deutschland hier im hohen Maß vor allem von Einfuhren primär gewonnener Rohstoffe abhängig. Mit Ausnahme der Braunkohle muss auch ein Großteil der fossilen Energierohstoffe importiert werden. Bei den Agrarrohstoffen und der energetisch genutzten Biomasse ist Deutschland, obwohl bedeutendes Agrarland, ebenfalls kein Selbstversorger. Die Rohstoffe werden aus der ganzen Welt bezogen. Daher ist Deutschland auf freie Rohstoffflüsse angewiesen.

- Die Konkurrenz auf den internationalen Rohstoffmärkten steigt, sodass sich deutsche Unternehmen im globalen Wettbewerb befinden und künftig weniger zuverlässig mit Rohstoffen beliefert werden könnten.

4.1 Versorgungssituation bei mineralischen Rohstoffen

Bei den mineralischen Rohstoffen sind die nicht-metallischen und die metallischen Rohstoffe zu unterscheiden.

Die **nicht-metallischen Rohstoffe** umfassen die Baurohstoffe und die Industriemineralien sowie Düngerohstoffe und Wasser. Hinsichtlich zukünftiger Energiesysteme sind natürlich die Baurohstoffe immer von Bedeutung. Von der Geologie her sind Baurohstoffe unbegrenzt verfügbar. Einschränkungen gibt es durch konkurrierende Nutzungsansprüche wie Naturschutz oder Trinkwasserschutz. Damit ist die Sicherung der zukünftigen Verfügbarkeit kein absolutes, sondern ein relatives Problem – ein Prioritätsproblem. Die im Grunde unbegrenzte Verfügbarkeit gilt auch, wenn man berücksichtigt, dass die erneuerbaren Energien bezogen auf die generierte Energieeinheit mehr Rohstoffe bei der

Investition benötigen als konventionelle Energieerzeugungsanlagen.²²⁵

Bei den Industriemineralien ist das Substitutionspotenzial in der Regel hoch. Neben Wasser benötigen Pflanzen zum Wachstum (als Dünger) die Elemente Stickstoff, Kalium und Phosphat. Diese Rohstoffe sind nicht substituierbar. Stickstoff und Kalium sind unbegrenzt in der Luft beziehungsweise im Meerwasser verfügbar. Das gilt nicht für Phosphat. Hier gibt es aber im Verhältnis zum Verbrauch sehr hohe Reserven, sodass in Szenarien bis zum Jahr 2050 und darüber hinaus mit keinem Versorgungsengpass gerechnet werden muss.²²⁶ Natürliches Süßwasser ist begrenzt und sollte als Trinkwasser und für landwirtschaftliche Zwecke vorbehalten werden.

Salzwasser ist in den Weltmeeren und in ariden/semiariden Gebieten in quasi unbegrenztem Umfang verfügbar. Es kann in einem energieabhängigen Entsalzungsprozess in Süßwasser umgewandelt werden.

²²⁵ Vidal et al. 2013; Hertwich et al. 2014.

²²⁶ Scholz/Wellmer 2013.

Zeitraum	Ergebnisse
vor 1992	Mit dem Explorationsförderprogramm der Bundesregierung („Maßnahmen zur Verbesserung der Versorgung der Bundesrepublik mit mineralischen Rohstoffen“) von 1970 bis 1990 gelang es deutschen Firmen bedeutende Beteiligungen an ausländischen Gruben und damit eine solide Rückwärtsintegration ²²⁷ aufzubauen. ²²⁸ Im Jahr 1992 schlossen die letzten deutschen Metallgruben. Bis dahin gab es in der Bundesrepublik Deutschland zum Teil eine bedeutende primäre Eigenversorgung, zum Beispiel bei Zink und Blei mit beibehaltenden Elementen wie Germanium. Die Lagerstätten waren teilweise erschöpft oder die Gehalte waren zu gering, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Die Metallpreise (1992) ²²⁹ ließen einen wirtschaftlichen Betrieb nicht mehr zu. Die Kupfer- und Zinngruben der DDR hatten nach der Wiedervereinigung aus Gründen der Unwirtschaftlichkeit schließen müssen, sodass Deutschland ab diesem Zeitpunkt nur noch auf sekundäre inländische Metallproduktionen zurückgreifen konnte.
1992 – 2003	Nach der völligen Umstrukturierung der Metallgesellschaft AG (ab 1993), eine der wichtigsten deutschen Firmen im Bereich Metallbergbau und Verhüttung sowie eine nationale Institution der Rohstoffversorgung ²³⁰ , und dem generellen Trend der 1990er Jahre in Deutschland, sich nur auf den Rohstoffmarkt zu verlassen, wurden fast alle deutschen Auslandsbeteiligungen für mineralische Rohstoffe verkauft, oft sogar an direkte Konkurrenten. Von den erfolgreichen Entdeckungen, die das Explorationsförderprogramm von 1970 bis 1990 mit sich gebracht hatte, ist nur noch eine Magnetitlagerstätte in Kanada in deutscher Hand. Die Schließung der deutschen Metallgruben und die Aufgabe der deutschen Auslandsbeteiligungen und aller Explorationsaktivitäten führten in Deutschland zu einem großen Know-how-Schwund im Bereich von Exploration und Bergbau. Das wirkte sich ebenfalls auf die Universitätsausbildung aus. Auch international und sogar in Bergbauländern wie Kanada oder Australien gab es den Trend, hinsichtlich der Universitätsausbildung etliche Lagerstättenforschungslehrstühle in Richtung „modernerer“ Umweltgeowissenschaften umzuwidmen.
ab 2003	Erst mit der starken Zunahme des weltweiten Rohstoffverbrauchs und der immer größer werdenden Konkurrenz Chinas auf den internationalen Rohstoffmärkten, begann in Deutschland langsam ein Umdenken.
ab 2009	Die Rohstoffforschungsprogramme des BMBF im Programm zur Forschung für nachhaltige Entwicklung (FONA) und der Hightech-Strategie der Bundesregierung ²³¹ starteten: r ² Innovative Technologie für Ressourceneffizienz – rohstoffintensive Produktionsprozesse ²³² r ³ Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien ²³³ r ⁴ Wirtschaftsstrategische Rohstoffe ²³⁴
2010	Die Bundesregierung formulierte ihre Rohstoffstrategie ²³⁵ . Die wichtigsten Aktivitäten sind: 2010: Gründung der Deutschen Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2011: Gründung des Helmholtz-Institutes Freiberg für Ressourcentechnologie 2011: Verabschiedung des Nationalen Masterplans Maritime Technologien NMMT des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologien: Deutschland, Hochtechnologie-Standort für marine Technologien zur nachhaltigen Nutzung der Meere 2012: Gründung der „Allianz zur Rohstoffsicherung“ der deutschen Industrie, angestoßen durch den Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI). Seit Ende 2015 existiert die Allianz aus mangelndem Interesse der Industrie de facto nicht mehr. 2012: Verabschiedung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms ProgRess des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) ²³⁶ 2013: Neuauflage des Explorationsförderprogrammes des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie beziehungsweise des heutigen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. ²³⁷ Dieses Programm wurde zum 30. Juni 2015 aufgrund mangelnder Nachfrage vonseiten der deutschen Industrie eingestellt.

Tabelle 4.1: Wirtschaftliche und politische Entwicklungen im Bereich der Rohstoffgewinnung in Deutschland von 1970 bis 2013

²²⁷ Siehe Glossar.

²²⁸ Barthel et al. 1991.

²²⁹ Die Rohstoffwelt ist eine USD-Welt. Durch die Aufwertung der Deutschen Mark sanken die Erlöse für deutsche Gruben, die damit in eine Kostenschere gerieten.

²³⁰ Keitel 2010; Wedig 2014.

²³¹ BMBF 2009.

²³² BMBF 2010-2.

²³³ BMBF 2013.

²³⁴ BMBF 2012.

²³⁵ BMWi 2010.

²³⁶ BMUB 2012.

²³⁷ BMWi 2012.

Der Wasserstoff im Meerwasser besteht zu 0,015 Prozent aus Deuterium (D_2), das mit unterschiedlichen Verfahren angereichert werden kann. Schweres Wasser (D_2O) wird in Kernspaltungsreaktoren und D_2 in Kernfusionsreaktoren benötigt. Beides steht in fast unbegrenzten Mengen zur Verfügung. Wasser kann unter Energieaufwand durch Elektrolyse oder Photokatalyse in molekularen Wasserstoff und molekularen Sauerstoff umgesetzt werden, die ihrerseits als Energiequellen dienen können. Dennoch ist Wasser kein Energierohstoff, da zur Spaltung des Wassermoleküls mehr Energie aufgewendet werden muss, als bei der Verbrennung des molekularen Wasserstoffs wieder freigesetzt wird. Dagegen kann molekularer Wasserstoff als Energierohstoff angesehen werden. Dieser ist in der Atmosphäre allerdings nur in Spurenkonzentrationen zu finden.

Um zu ergründen, warum Deutschland bei den **metallischen Rohstoffen**, den wichtigsten Rohstoffen für zukünftige Energietechnologien, heute auf der Primärseite zu hundert Prozent von Einfuhren abhängig ist, bietet es sich an, die Entwicklung phasenweise zu betrachten (Tabelle 4.1):

Im Zuge der neuerlichen Rückwärtsintegration ab dem Jahr 2003 haben mittlerweile wieder einzelne Firmen erfolgreich Auslandsbergbaubeteiligungen im Metallsektor aufgebaut. Diese Akteure sind klein im Vergleich mit der ehemaligen Metallgesellschaft AG, die ein weltweites Händlernetz besaß und somit praktisch für jeden Rohstoff als Ansprechpartner fungieren konnte. Nicht nur im Hinblick auf den Bergbau und die Exploration, sondern auch als Anbieter von Ingenieurdienstleistungen war die Metallgesellschaft AG sehr viel bedeutender.

Im Bereich der Sekundärrohstoffgewinnung ist diese Entwicklung erfolgreicher. So können heute einige

deutsche und europäische Produzenten von Metallprodukten einen erheblichen Anteil ihres Rohstoffbedarfs aus dem Recycling abdecken, wobei die metallhaltigen Sekundärrohstoffe in der Regel weltweit akquiriert werden. Zu diesen Akteuren gehören zum Beispiel Hydro oder Rio Tinto bei Aluminium, Aurubis bei Kupfer und Umicore bei Edelmetallen²³⁸. Auch europäische Stahlproduzenten verarbeiten heute in großem Maße Sekundärmaterialien. Der Aufbau leistungsfähiger Recyclingkapazitäten kann dazu beitragen, Stoffkreisläufe zu schließen und damit die Versorgungssicherheit zu erhöhen.

4.1.1 Gründung einer deutschen Rohstoffgesellschaft?

Für die deutsche Rohstoffversorgung stellt sich die Frage, ob es je wieder eine Firma wie die Metallgesellschaft AG geben wird. Bis zum Jahre 2020 ist dies ausgeschlossen. Auch bis 2050 ist das fraglich. Es gibt keine inländischen Metallergreber als Know-how-Basis mehr. Das Händlernetz der Metallgesellschaft beruhte auf jahrzehntelang aufgebauten Beziehungen, die selbst die beiden Weltkriege überlebt hatten, nun aber nicht mehr existieren. Die ersten Auslandserfolge der Metallgesellschaft AG kamen alle über dieses Netz zustande. Zwar gab es von 2012 bis 2015 die RA Rohstoffallianz GmbH der deutschen Industrie, diese war aber mangels Interesse der Industrie wenig erfolgreich. Zu einer schnellen Realisierung einer neuen international bedeutenden, antizyklisch tätigen deutschen Bergbaugesellschaft bedarf es daher vermutlich einer staatlichen Initialzündung, wie sie seinerzeit im

²³⁸ Bei Umicore kann beispielsweise ein signifikanter Anteil des Bedarfs an Gold (zum Beispiel für Schmucklegierungen und galvanische Bäder), an Silber (zum Beispiel für Kontaktmaterialien) und an Platinmetallen (für Katalysatoren) aus dem Recycling von Elektronikfraktionen, Katalysatoren und industriellen Rückständen gedeckt werden. Zusätzlich nutzt das Unternehmen in-House recyceltes Germanium für opto-elektronische Produkte oder Sekundärkobalt für Hartmetalle und Batteriematerialien.

BOX XIII: Vorlaufzeit bei Angebotsengpässen (Lead Time)

Verknappen sich Rohstoffe, steigen die Rohstoffpreise. Während einer solchen Hochpreisphase kann man auf Lagerstätten zurückgreifen, die zwar bereits bekannt waren, in denen der Rohstoffabbau während der Niedrigpreisphase aber zu kostspielig war. Fachleute sprechen dabei von „shelved“ Lagerstätten, sozusagen „Lagerstätten im Regal“. Die geologischen Dienste von Australien, Deutschland, Kanada, Südafrika, den USA und Großbritannien erarbeiteten in ihrer Arbeitsgruppe International Strategic Minerals Inventory (ISMI) die sogenannte Lead-Time-III-Studie²³⁹. „Lead Time III“ steht für die Zeit, die benötigt wird, eine entweder neu entdeckte oder im Status „shelved“ befindliche Lagerstätte ohne weitere Unterbrechung in Produktion zu nehmen.

Lead-Time-III-Zeiten sind rohstoffabhängig. In den 1990er Jahren wurden als kürzeste Vorlaufzeiten beim Gold durchschnittlich drei Jahre und bei porphyrischen Kupferlagerstätten durchschnittlich sieben Jahre beobachtet, wobei es eine beträchtliche Streuung gibt (Abbildung 4.3). Die maximalen Vorlaufzeiten betragen weniger als dreißig Jahre. Es wird durch den Vergleich der besonders kostenintensiven Großtagebaue (porphyrische Kupferlagerstätten) mit den anderen Rohstoffen deutlich, dass die Lead Time umso länger ist, je höher die Kapitalaufwendungen sind. Auch eine zunehmende Größe und Komplexität der Anlage lässt die Vorlaufzeiten länger werden. So werden für die Seltene-Erden-Elemente 2012 in einer vergleichbaren Situation Vorlaufzeiten von fünf bis zwölf Jahren angegeben.²⁴⁰ Dies entspricht ziemlich genau den Zeiten für die in Abbildung 4.3 dargestellten Metalle. Leider gibt es keine aktualisierte Studie.

Obwohl weder die Abbildung 4.3 noch Ergebnisse anderer Studien²⁴¹ einen signifikanten Trend zu längeren Vorlaufzeiten erkennen lassen, muss im Hinblick auf steigende Anforderungen durch Umwelt- und Sozialaspekte in Zukunft mit einer Verlängerung der Vorlaufzeiten gerechnet werden. Es lässt sich also feststellen, dass die Dauer von Versorgungsengpässen – die Zeit, bis ausreichend neue oder „shelved“ Lagerstätten in Produktion sind – derzeit auf etwa zehn Jahre begrenzt ist. Eine weitere Rolle spielt die politische Zuverlässigkeit des Exportlandes. Für Kupferlagerstätten werden in Abhängigkeit des Länderrisikos aktuell Zeiten von elf (niedrig) bis 19 Jahren (hoch) genannt.²⁴²

Erdölsektor mit der Deminex²⁴³-Konstruktion praktiziert wurde und jetzt in Frankreich mit der Compagnie Nationale des Mines de France initiiert wird.²⁴⁴ Auch die erfolgreichen Gründungen der Kupferexplorationsgesellschaft mbH²⁴⁵ oder

²³⁹ Wellmer 1992.

²⁴⁰ Kingsnorth 2012.

²⁴¹ Schodde 2012-1; Schodde 2012-2.

²⁴² Schodde 2012-2: Vorlaufzeiten am Beispiel von Kupferlagerstätten.

²⁴³ Die Deminex war eine Gemeinschaftsgründung der deutschen Erdölfirmer, für die die Bundesregierung zwischen 1969 und 1989 2,375 Milliarden Deutsche Mark Bundesmittel als Darlehen und Zuschüsse zur Sicherung und Verbesserung der Erdölversorgung der Bundesrepublik Deutschland zur Verfügung stellte (Hiller 1991).

²⁴⁴ Zum Beispiel Le Parisien vom 21.02.2014; FAZ vom 21. Februar 2014; Die Welt vom 21. Februar 2014: Im Februar 2014 kündigte der Industrieminister Arnaud Montebourg in Kooperation mit der Privatwirtschaft die Gründung eines staatlich geführten Bergbauunternehmens, der Compagnie Nationale des Mines de France, an.

²⁴⁵ In der Kupferexplorationsgesellschaft mbH hatten sich unter Federführung der Metallgesellschaft AG 1978 weiterhin die Degussa AG, die Siemens AG und die Kabel- und Metallwerke Gutehoffnungshütte AG (mit jeweiligem Anteil von 25 Prozent) zusammengeschlossen.

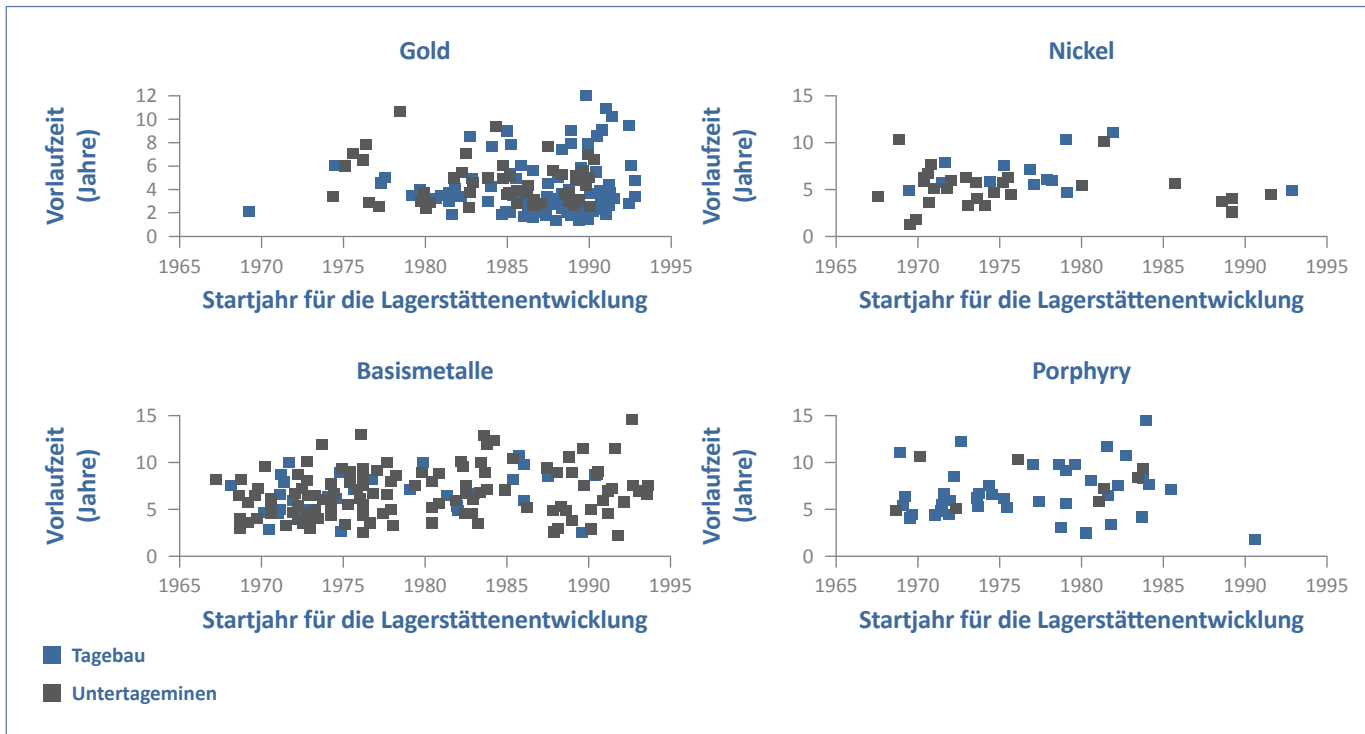


Abbildung 4.3: Vorlaufzeiten für Lead Time III (Entwicklungszeitraum von der letzten Inangriffnahme eines Explorationsprojektes bis zur Produktionsaufnahme) anhand verschiedener Rohstoffe.²⁴⁶ „Porphyry“ bezieht sich auf großtonnagige, oft niedrighaltige Kupfer- und Molybdän-Massenlagerstätten.

der deutschen Urangesellschaften²⁴⁷, bei denen sich auf Initiative der Bundesregierung Rohstoffabnehmer mit starken Bergbaugesellschaften zusammenschlossen, sind entsprechende Beispiele. Diese trugen wesentlich zur Versorgung deutscher Unternehmen im Kupfer- und Kernenergiesektor bei und wären ohne starke Bergbaugesellschaften mit breiter Know-how-Basis (vom Bergbau bis zum Marketing) nicht zustande gekommen.

Der Zeitraum für eine staatliche Maßnahme beziehungsweise Unterstützung ist dabei ein kritischer Punkt, denn für die zukünftige Rohstoffversorgung ist generell zu berücksichtigen, dass es gewisser Vorlaufzeiten (Lead Times) bedarf, bis in einer neu entdeckten Lagerstätte die Rohstoffproduktion beginnen

kann. In Zeiten normaler Angebots- und Nachfrageverhältnisse beträgt die Lead Time in etwa zehn Jahre. In risikoreichen Ländern ist die Lead Time in der Regel länger als in sicheren Ländern (BOX XIII). Die marktwirtschaftliche Sicht spricht für eine möglichst kurze Anschubphase. Ein überlegenswertes Konzept, um schnell wieder industrielles Bergbau-Know-how auf dem Metallsektor in Deutschland anzusiedeln, wäre möglicherweise auf europäischer Ebene realisierbar, und zwar durch ein Joint Venture mit einer europäisch kontrollierten, aber international tätigen Metallbergbaugesellschaft. Hierbei muss dann allerdings sichergestellt werden, dass die Muttergesellschaft nicht mit dem Joint Venture konkurriert. Eine geeignete Partnerfirma wäre zum Beispiel die französische Bergbau- und Metallurgiefirma Eramet, die Nickelgruben auf Neukaledonien und Mangangruben in Gabun betreibt und auch eine eigene Forschungsabteilung besitzt.

²⁴⁶ Wellmer/Dalheimer 2012.

²⁴⁷ Siehe Anger 1990: Es gab drei deutsche Urangesellschaften: Urangesellschaft mbh (Metallgesellschaft AG, VEBA und STEAG), Uranerzbergbau-GmbH (damalige RWE-Tochter Rheinbraun, und C. Deilmann AG) sowie Saarberg Interplan Uran GmbH (Saarbergwerke AG, Badenwerk AG und Energieversorgung Schwaben AG).

4.1.2 Ausweichstrategien für eine sichere Versorgung

Eine Rückwärtsintegration mit eigener Bergwerksproduktion ist zwar die sicherste, aber nur eine der Ausweichstrategien für Unternehmen, um für eine gesicherte Rohstoffversorgung zu sorgen. Andere Strategien können sein:

- langfristige Lieferverträge abschließen mit Preisgleitklauseln und Hedgingmaßnahmen²⁴⁸
- Käufergemeinschaften bilden
- Lieferquellen diversifizieren (verschiedene Anbieter und Länder)
- ausreichende Lagerhaltung
- Materialeffizienz erhöhen und innerbetriebliches Recycling verbessern
- Flexibilität innerhalb der Lieferketten erhöhen durch Substitution und Ausweichklauseln, also vorher mit dem Kunden abgesprochen Möglichkeiten, auf andere Rohstoffe auszuweichen

4.1.3 Sekundärrohstoffe erhöhen die Versorgungssicherheit

Im Hinblick auf die Versorgungssicherheit kommt den Sekundärrohstoffen eine zunehmende Bedeutung zu. Grundsätzlich steigt das Potenzial der Versorgung mit Sekundärrohstoffen mit zunehmendem Rohstoffinventar in Infrastruktur und Produkten. Wie in Kapitel 3.4.4 beschrieben, findet eine fortschreitende Verschiebung von geologischen in anthropogene Lagerstätten statt. Je schneller sich Produktzyklen entwickeln und je kürzer die Nutzungsdauer rohstoffrelevanter (Massen)Produkte ist, desto größer kann der Beitrag von Sekundärrohstoffen an der Versorgung sein. Bei Metallen liegt dieser schon heute in vielen Fällen hoch. Die inländische Sekundärproduktion

kann den Bedarf vor allem für eine weiterhin exportorientierte Volkswirtschaft aber nicht decken.

Die Nutzung von Sekundärrohstoffen hat unter den Randbedingungen, wie zum Beispiel Investitionssicherheit, in Deutschland und Europa folgende Vorteile gegenüber der Versorgung mit primären Rohstoffen:

- Die Vorlaufzeiten (Lead Times) zum Erschließen des heute ungenutzten Potenzials der sekundären Rohstofflagerstätte sind vergleichsweise gering. Ähnliches gilt für den Investitionsbedarf.
- Die Akzeptanz in der Bevölkerung für Recyclingprojekte ist etwas größer als beim Bergbau.
- Deutschland und Europa stehen weltweit an der Spitze bei der Entwicklung und dem Einsatz moderner Recyclingtechnologien, und zwar sowohl bei der mechanischen Aufbereitungstechnik als auch bei der metallurgischen Metallrückgewinnung. Während Explorations- und Bergbau-Know-how in Deutschland mit dem Rückgang der inländischen Bergbauproduktion und dem Wegfall der großen Bergbaukonzerne verloren ging, ist im Recyclingsektor eine gegenläufige Tendenz zu erkennen. Das gilt für die Verfahrensentwicklung, das Engineering, den Anlagenbau sowie den Betrieb von Anlagen zur Sekundärrohstoffgewinnung.
- In gewissem Umfang könnten im Recycling führende aktive deutsche und europäische Konzerne damit bei der Rohstoffversorgung die Nachfolge der großen Bergbaukonzerne übernehmen. Dies beschränkt sich nicht auf einheimische Sekundärrohstoffe. Schon heute importieren führende europäische Metallhütten Sekundärmaterialien aus weltweiten Quellen.

Durch die hohen Importabhängigkeiten bei den metallischen Rohstoffen sind globale

²⁴⁸ Der Begriff „Hedging“ bezeichnet ein Finanzgeschäft zur Absicherung einer Transaktion gegen Risiken (Absicherung mit Deckungsgeschäften) wie beispielsweise Wechselkurschwankungen oder Veränderungen der Rohstoffpreise. Das Unternehmen, das eine Transaktion „hedgen“ möchte, geht zu diesem Zweck eine weitere Transaktion, ein Gegengeschäft, ein, das mit dem zugrunde liegenden ersten Geschäft gekoppelt ist. Dies findet gewöhnlich in der Form eines Termingeschäfts statt.

offene Rohstoffmärkte entscheidend für die zukünftige Rohstoffverfügbarkeit in Deutschland. Grundsätzlich gilt, dass in einer normalen und unverzerrten Wettbewerbssituation ein Käufer- und Verbraucherland wie Deutschland seine Interessen längerfristig immer durchsetzen kann. Die Versorgung mit Rohstoffen kann also als langfristig sicher betrachtet werden. Eine Ausnahme können extreme Verkäufermarktsituationen wie beispielsweise die Ölkrise 1973 und 1979 sein. Generell aber hat ein Käufer die Wahl, wo er seine Rohstoffe kauft, solange es keine Monopole gibt. Es ist natürlich einfacher, die Rohstoffversorgung sicher zu stellen, wenn es viele Lieferanten gibt – und nicht wie heute beim überseeischen Eisenerzhandel ein Oligopol aus wenigen Anbietern. Daher ist der Konzentrationsgrad ein wichtiger Parameter, kritische Rohstoffe zu bestimmen (siehe BOX IV). Trotzdem gilt vor allem das Prinzip, dass Märkte immer zwischen Verkäufer- und Käufermärkten hin- und

herschwingen werden. Ein Verkäufer muss für seine Produkte einen Käufer finden, denn Rohstoffe in einer Lagerstätte, die keinen Käufer finden, sind nichts wert. Sehr prägnant hat dies beispielsweise der Bergbau- und Energieminister der kanadischen Provinz Neufundland in einer Rede im Oktober 2001 formuliert, als es um Auflagen für die Entwicklung einer der größten Nickellagerstätten der Welt, Voisey's Bay, ging: „We must balance the need of the province to realize maximum benefits for our shareholders, the people of the province, with the need of Inco to earn a fair return for its shareholders.“ Und später in seinem Vortrag: „It goes without saying that our natural resources benefit no one if they remain undeveloped.“²⁴⁹ In diesem Zusammenhang können politische Sanktionen, wie jüngst gegen Erdöl- und Erdgasexporte aus dem Iran, künftig eine wichtige Rolle spielen.

²⁴⁹ Matthews 2001.

Versorgungssituation bei mineralischen Rohstoffen

In Deutschland sind aus wirtschaftlichen Gründen oder aus Gründen der Lagerstättenschöpfung mit der Zeit die eigenen Produktionskapazitäten für primäre metallische Rohstoffe vollständig stillgelegt worden. Die deutschen Firmen gaben auch fast alle Auslandsbeteiligungen aufgrund ausreichenden Rohstoffangebots auf. Damit sind auch die entsprechende Industrien sowie das Know-how verloren gegangen. Die verstärkte Nachfragekonkurrenz und Preisanstiege seit Beginn des Jahrtausends haben die Politik in der jüngeren Vergangenheit jedoch dazu veranlasst, Forschungsprogramme und Rohstoffinitiativen aufzulegen, um den heimischen Rohstoffsektor wieder zu stärken und die Versorgungslage zu verbessern. Eine international bedeutsame Rückwärtsintegration, die für eine größere Unabhängigkeit von den Rohstoffmärkten notwendig wäre, fand bisher zum Teil bei Sekundärrohstoffen, aber nicht bei primären Rohstoffen statt. Deutsche und europäische Produzenten beziehen ihre Sekundärrohstoffe dabei aus der ganzen Welt und decken ihren Bedarf so zu einem erheblichen Teil ab. Für eine erneute Rückwärtsintegration bei den primären Rohstoffen bedarf es womöglich einer staatlichen Initialzündung. Ein anderes Konzept, um schnell wieder industrielles Bergbau-Know-how auf dem Metallsektor in Deutschland anzusiedeln, wäre möglicherweise auf europäischer Ebene realisierbar, und zwar durch ein Joint Venture mit einer europäisch kontrollierten, aber international tätigen Metallbergbaugesellschaft.

Nicht-metallische Rohstoffe wie Baurohstoffe, Industriemineralien oder Wasser sind für zukünftige Energiesysteme hinsichtlich der Versorgung weitestgehend unkritisch. Bei der Nutzung sind energetische und Umweltaspekte zu berücksichtigen

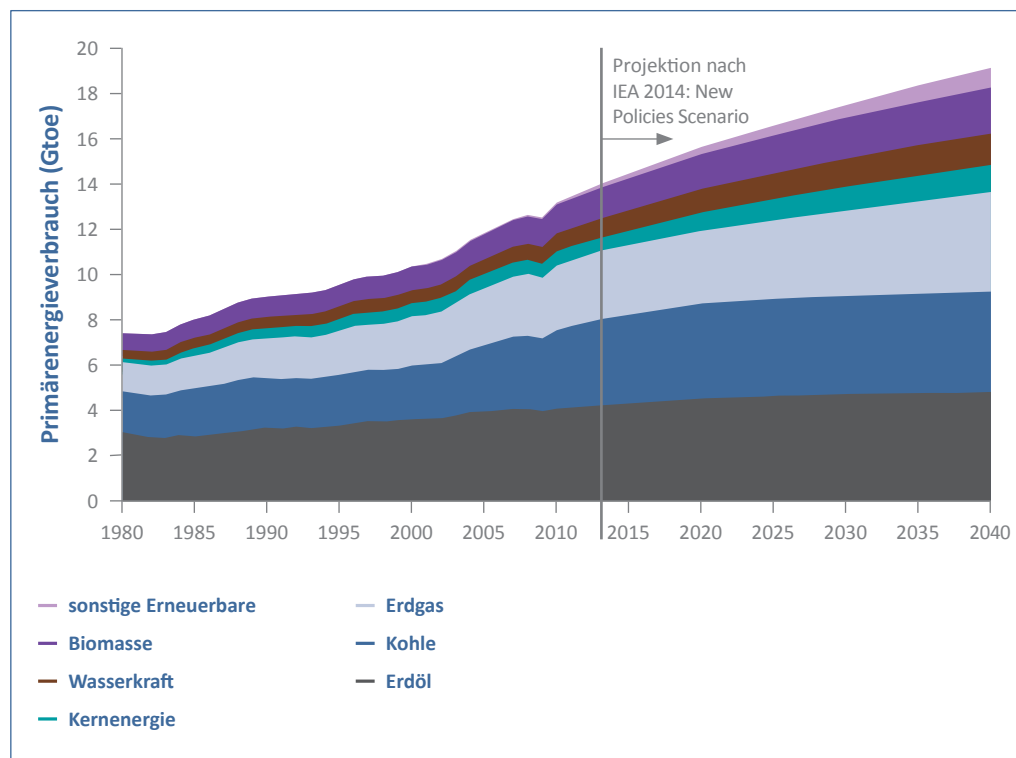


Abbildung 4.4: Globaler Energieverbrauch in Gigatonnen Öl-Äquivalent von 1980 bis 2013, aufgeteilt nach Energieträgern und Extrapolation bis 2040.²⁵⁰ Die Internationale Energie Agentur erwartet bis 2040 einen weiteren Anstieg durch steigenden Verbrauch vor allem in China und verschiedenen Schwellenländern (New Policies Scenario der IEA).

4.2 Versorgungssituation bei fossilen Energierohstoffen

In regelmäßigen Abständen erstellt die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Studien zu Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von fossilen Energierohstoffen.²⁵¹ Die letzte dieser Studien wurde im Jahre 2014 veröffentlicht. Wesentliche Daten in der Studie zur weltweiten Situation stammen aus den Berichten der International Energy Agency und anderer Organisationen.²⁵² Diese neusten Studien betrachten beim Erdöl und Erdgas – anders als früher – jetzt auch sogenannte unkonventionelle Rohstoffvorkommen. Darunter versteht man Erdöl und Erdgas, das in sehr dichten Gesteinen, also Sedimentgesteinen wie beispielsweise Tongestein mit geringer Durchlässigkeit (Permeabilität)

lagert und häufig nur durch zusätzliche technische Maßnahmen (hydraulische Stimulation beziehungsweise Fracking) gefördert werden kann, aber auch Erdgas in Kohleflözen (Coalbed Methane) und in Gashydraten, eisähnlichen Methanvorkommen im Permafrostboden und in der Tiefsee.

Diesen Studien zufolge werden heute mehr als achtzig Prozent des Primärenergieverbrauchs durch die fossilen Energieträger Erdöl, Erdgas und Kohle gedeckt (Abbildung 4.4). Daneben spielen Biomasse, Wasserkraft und Kernenergie mit einem Anteil von zusammen zwanzig Prozent eine bedeutende Rolle. Die International Energy Agency geht von einem weltweit weiter zunehmenden Energieverbrauch aus, wobei das Wachstum nicht in Westeuropa, sondern vor allem in China sowie verschiedenen Schwellenländern erfolgen wird.

²⁵⁰ Aus BGR 2014-3, S. 14; Projektion nach IEA 2014-1.

²⁵¹ BGR 2014-3.

²⁵² IEA 2014-1; OPEC 2014; BP 2015.

Die Zusammensetzung der zur Deckung des Energieverbrauchs in Deutschland eingesetzten Energiequellen ähnelt sehr der internationalen Situation. Auch hierzulande wird Energie zu 80 Prozent mit fossilen Energieträgern, knapp 10 Prozent Kernenergie und gut 10 Prozent erneuerbaren Energieträgern gedeckt.²⁵³ Allerdings ist in Deutschland der Verbrauch seit 1990 leicht gesunken und eine weitere Reduktion ist Teil der energiepolitischen Ziele der Bundesregierung.

Der für die Zukunft erwartete Anstieg des weltweiten Energieverbrauchs lässt entsprechend auch eine Verknappung der fossilen Energierohstoffe erwarten. Allerdings unterscheidet sich die Situation von Rohstoff zu Rohstoff erheblich. Die Zunahme des Verbrauchs von Kohle und Kernenergie erscheint – im Hinblick auf die Verfügbarkeit dieser Rohstoffe – unkritisch, da große Ressourcen und Reserven an Hartkohle (Steinkohle)²⁵⁴, Weichbraunkohle und Uran bereitstehen. Für die deutsche Versorgung spielt Uran, aufgrund des bis 2022 beschlossenen Kernenergieausstiegs, keine große Rolle mehr. Braunkohle stammt praktisch ausschließlich aus heimischer Förderung. Der Anteil heimischer Steinkohle hingegen ist über die letzten zehn Jahre drastisch zurückgegangen und betrug 2013 nur noch 13 Prozent – Tendenz weiter fallend. Dazu trägt auch bei, dass die Subventionierung der deutschen Steinkohle bis zum Jahr 2018 beendet wird. Damit wird noch weniger heimische Steinkohle verwendet werden und die Importabhängigkeit ab 2018 weiter zunehmen.

Erdöl und Erdgas sind im Vergleich zu Kohle knappe Rohstoffe. Selbst wenn die Förderung aus unkonventionellen Lagerstätten (zum Beispiel Vorkommen, die mittels Fracking-Verfahren zugänglich ge-

macht werden oder Gashydrate) deutlich zunehmen sollte. Für beide Energieträger wird kontrovers diskutiert, wann das Maximum der Förderung erreicht sein wird. Es wird angenommen, dass Erdgas und Erdöl für die nächsten 30 bis 40 Jahre nach wie vor einen großen Anteil am Weltenergieverbrauch haben werden – dazu werden zunehmend Gas und Öl aus unkonventionellen Quellen beitragen. Trotz des aktuellen Preisverfalls, der unter anderem auf die Explorationserfolge bei Schieferöl zurückzuführen ist, ist weiterhin mit hohen beziehungsweise auf lange Sicht noch steigenden Preisen für Erdöl und Erdgas zu rechnen. Dabei darf allerdings nicht vergessen werden, dass die Preisentwicklung in der Vergangenheit auch stark von politischen Entwicklungen, zum Beispiel im Nahen Osten, getrieben wurde, und nicht allein durch die Förderkosten.

Positiv auf die Preisentwicklung haben sich technologische Entwicklungen im Bereich Exploration und Förderung ausgewirkt. Dazu zählen moderne Verfahren wie die 3D-Seismik, die numerische Modellierung, Horizontalbohrverfahren oder die hydraulische Stimulation der Bohrungen (Fracking). Der gegenwärtige, stark gesunkene Erdöl- und Erdgaspreis wird vor allem auf die stark gestiegene Förderung von Schieferöl und Schiefergas in den USA zurückgeführt, unkonventionelle Lagerstätten, die erst durch das „Fracking“ zugänglich werden. Die geologischen Rahmenbedingungen dieser Vorkommen werden auch hinsichtlich möglicher Umweltauswirkungen untersucht und bewertet; in den USA beispielsweise durch die US Environmental Protection Agency (EPA).²⁵⁵ Für Deutschland wurde diese Thematik zeitgleich in vielen verschiedenen Studien betrachtet: unter anderem durch die BGR²⁵⁶, durch einen von der ExxonMobil Production Deutschland beauftragten unabhängigen

²⁵³ AGEB 2015, S. 4.

²⁵⁴ Dies gilt nicht für spezielle Kohlen, wie sie bei der Koksherstellung benötigt werden.

²⁵⁵ EPA 2015.

²⁵⁶ BGR 2012; BGR 2016-2.

Expertenkreis²⁵⁷, im Auftrag des Umweltbundesamtes²⁵⁸, im Auftrag des Landes Nordrhein-Westfalen²⁵⁹ sowie durch acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften²⁶⁰. Derartige Technologiesprünge können auch künftig einer Verteuerung von Erdöl und Erdgas entgegenwirken. Dazu gehören auch Technologien der Kohleverflüssigung oder Gas-to-Liquids-Technologien (GtL), über die aus Erdgas Treibstoffe hergestellt werden können.

Im Hinblick auf Erdgas und Erdöl ist Deutschland von wenigen Lieferländern stark abhängig. Erdgas aus deutschen Quellen deckte im Jahr 2013 immerhin etwa zwölf Prozent²⁶¹ des deutschen Gesamtverbrauchs. Ein Teil des Erdgases kommt heute noch aus den Niederlanden, doch werden die Niederlande aufgrund schrumpfender Reserven als wichtiger Erdgaslieferant komplett ausfallen. Ohne Entwicklung von unkonventionellen Lagerstätten (zum Beispiel über den Einsatz von Fracking-Technologien) oder den Bezug von Erdgas aus anderen Kontinenten wird Deutschland in Bezug auf Erdgas von Russland immer stärker abhängig werden. Eine Lösung ist die verstärkte Nutzung von verflüssigtem Erdgas (LNG), das über Tanker und Terminals von anderen Ländern herantransportiert werden kann. Hier ergeben sich für die Versorgungszukunft grundlegende strategische und wirtschaftspolitische Fragestellungen.

Der Produktionseigenanteil ist beim Erdöl mit nur etwa zwei Prozent im Jahr 2013²⁶² noch deutlich kleiner als beim Erdgas. Allerdings gab es in Deutschland in den letzten Jahren beim Erdöl einige überraschende Neufunde wie etwa das Feld Römerberg bei Speyer. Erdöl ist der

teuerste Energierohstoff. Deutschland bezog sein Erdöl im Jahr 2013 als weltweit sechstgrößter Importeur in erster Linie aus Russland, Norwegen und dem Vereinigten Königreich und weiterhin zu großen Teilen aus politisch wenig stabilen Regionen des Nahen Ostens und Nordafrikas²⁶³, während die Eigenproduktion in der Nordsee absehbar abnehmen wird. Aus strategischer und volkswirtschaftlicher Sicht ist es daher sinnvoll, den Einsatz von Erdöl auf zeitnah am wenigsten substituierbare Bereiche zu reduzieren, zum Beispiel als chemischen Rohstoff oder für die Mobilität.

Kennzeichnend für die Preisentwicklung sind kurzfristige Preissprünge, beispielsweise durch Verknappungsmaßnahmen der OPEC, durch Wirtschaftskrisen wie im Jahre 2008 oder politisch-militärische Krisen (Kuwaitkrise/Irakkrieg). Zwischen 2000 und 2008 stieg der Preis um mehr als das 10-fache von 10 USD/Barrel auf über 100 USD/Barrel im Jahr 2014. Seither schwankt der Ölpreis etwa zwischen 40 und 70 USD/Barrel. Der Wert der importierten fossilen Energieträger lag im Jahre 2013 bei 55,98 Milliarden Euro für Erdöl, 37,84 Milliarden Euro für Erdgas und 3,3 Milliarden Euro für Steinkohle. Dies entsprach mehr als zwei Drittel des Wertes aller deutschen Rohstoffimporte²⁶⁴ und verdeutlicht die volkswirtschaftliche Bedeutung (vergleiche Abbildung 4.2, Tabelle 4.1).

257 Ewen et al. 2012.

258 Meiners et al. 2012.

259 MKULNV 2012.

260 acatech 2015.

261 BGR 2014-3.

262 BGR 2014-3.

263 BGR 2014-3: Der Anteil Russlands an den deutschen Rohöl-Importen lag 2013 bei knapp 35 Prozent, gefolgt von Norwegen mit gut 12 und dem Vereinigten Königreich mit gut 10 Prozent. Mit einem Anteil zwischen einem und etwa acht Prozent folgen Nigeria, Kasachstan, Libyen, Aserbaidschan, Algerien, Saudi-Arabien und Ägypten. Zusammen decken diese Länder über 91 Prozent des deutschen Importaufkommens.

264 BGR 2014-2, S. 19.

	Produktion Welt	Wert (geschätzt) in Milliarden €	Import Deutschland in Milliarden €
Erdöl	32 · 10 ⁹ bbl	2.429*	55,98
Erdgas	3,5 · 10 ¹² m ³	346**	37,84
Kohle	8,1 · 10 ⁹ t	405***	4,71

*bei 75 €/bbl

**bei 0,1 €/m³, anders als bei Erdöl ist der Erdgaspreis aufgrund regionaler Märkte unterschiedlich

***bei 50 €/t, Kohlepreise nach Kohlenart (Steinkohle viel teurer als Braunkohle) und regionalen Märkten sehr unterschiedlich

Tabelle 4.1: Weltweite Produktion, geschätzter Wert der Weltproduktion in 2015²⁶⁶ und deutsche Importe für fossile Energieträger im Jahr 2013²⁶⁶

Eine weitere heute noch nicht wirtschaftliche Quelle für Kohlenwasserstoffe sind Methanhydrate in der Tiefsee. Das Gas ist dort fest in eisähnlichen Strukturen gebunden. Diese Gasvorkommen gelten als sehr groß. Allerdings sind die Abschätzungen noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Angaben über die verfügbaren Gashydratmengen sind auch deshalb ungenau, weil bisher nur Vorkommen quantifiziert werden, nicht aber wirtschaftlich gewinnbare Reserven. Eine Produktion aus solchen Gashydrat-Vorkommen der Tiefsee erscheint in naher Zukunft wenig wahrscheinlich.

Gashydrate kommen allerdings auch an Land in Permafrostgebieten vor. Aus diesen Vorkommen wird auch bereits Methangas gefördert, beispielsweise im sibirischen Feld Mesoyake. Wesentlich relevanter ist auf kurze Sicht aber die Förderung von Erdgas aus Kohleflözen. Hier ergeben sich auch Fördermöglichkeiten in Deutschland, vor allem im nördlichen Nordrhein-Westfalen, die aber hinsichtlich der Gasmengen und Förderbarkeit weiter erkundet werden müssen.

Auch wenn die Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik weiterhin rasant ausgebaut wird, so müssen doch – solange es keine Langzeitspeicher für Strom gibt – auf absehbare Zeit entweder Kohle-

oder Erdgaskraftwerke bereitgehalten werden. Für Zeiten, in denen die Sonne nicht scheint und der Wind nicht weht, müssen diese die gesicherte Leistung bereitstellen. Ob vor allem Kohle oder Erdgas verwendet werden, hängt von mehreren Randbedingungen ab. Einerseits ist Kohle auf lange Sicht verfügbar und relativ kostengünstig. Ferner hat sie den volkswirtschaftlichen Vorteil, dass sie – vor allem im Falle von Braunkohle auch kostendeckend – aus einheimischen Lagerstätten gewonnen werden kann. Kohle-Großkraftwerke haben aber den Nachteil, dass sie nicht sehr schnell hoch oder heruntergefahren werden können, um schwankende Mengen an Solar- oder Windstrom auszugleichen. Sie benötigen eine mehrere Stunden lange Anfahrphase. Daher sollten Kohlekraftwerke immer auf mindestens vierzig Prozent der Nominallast betrieben werden. Nur dann können sie effizient Regelenergie bereitstellen, um die schwankende Stromproduktion aus Solar- und Windenergieanlagen ausgleichen zu können.²⁶⁷ Ferner verursachen sie im Vergleich aller Energieträger die meisten CO₂-Emissionen.

Erdgaskraftwerke hingegen können schnell angefahren werden und auf diese Weise flexibel Regelenergie bereitstellen. Sie sind daher gut geeignet, die fluktuierende

²⁶⁵ Berechnet nach BP 2015.

²⁶⁶ Aus BGR 2014-2.

²⁶⁷ Dies gilt für heutige Kraftwerke, die für den Dauerbetrieb ausgelegt sind. Fachleute schätzen allerdings, dass Kohlekraftwerke in Zukunft deutlich flexibler gemacht werden können, indem zum Beispiel die Mindestlast reduziert wird (Görner/Sauer 2016).

Einspeisung aus Windkraft- und Photovoltaik auszugleichen. Zudem verbrennt Erdgas deutlich sauberer als Kohle. Erdgas ist aber auf lange Sicht im Vergleich zur Kohle der knappere und teurere Energieträger.

Trotz des forcierten Ausbaus der regenerativen Stromversorgung und der hohen Emissionsbelastungen durch die Nutzung fossiler Energierohstoffe werden diese noch lange als Energieträger benötigt. Um den Bedarf an Kohle und Erdgas im Bereich der Stromversorgung zu reduzieren, müssten effektive Speichersysteme für erneuerbare Energien geschaffen werden. Dabei weisen Untertagespeicher neben übertägigen Pumpspeichern die mit Abstand höchsten Speicherkapazitäten auf. Nationale Energiereserven in Form von eigenen Lagerstätten und künstlichen Speichern für Erdöl und Erdgas spielen für die Versorgungssicherheit daher eine große Rolle. So können nicht nur Knappheiten ausgeglichen, sondern auch damit einhergehende Hochpreisphasen abgepuffert werden. Rohstoffmärkte sind dadurch gekennzeichnet, dass schon kleine Unterdeckungen zu großen Preisausschlägen führen können. Daher ist es wichtig, dass man die zur Deckung von Bedarfsspitzen benötigten Mengen selbst kontrolliert. Deutschland kann die Erdgasversorgung zu etwa einem Drittel selbst steuern. So können 12 Prozent des Bedarfs durch die heimische Produktion und 24 Prozent durch Erdgas aus eigenen Erdgasspeichern gedeckt werden. Das über längere Zeiträume in unterirdischen Speichern aufbewahrte Gas wird bei Spitzenbedarf zum Beispiel in kalten Wintern abgerufen.

Mit zunehmendem Anteil fluktuierender Energiebereitstellung durch Wind und Photovoltaik könnte die Rolle von Gasspeichern noch steigen. Überschüssige Wind- und Sonnenenergie kann mit sogenannten Power-to-Gas-Verfahren in Wasserstoff oder künstlich hergestelltes Methan umgewandelt und in großen

Gasspeichern eingelagert werden. Diese Form der Langzeitspeicherung ist neben Bioenergie die einzige Möglichkeit, mehrwöchige Zeiträume mit wenig Wind und geringer Solarstrahlung ohne den Einsatz von herkömmlichen fossilen Energieträgern zu bewältigen.²⁶⁸ Die Akzeptanz spielt auch in diesem Kontext eine wichtige Rolle. Im Vergleich zu oberirdischen Pumpspeicherkraftwerken, für die die (lokale) Akzeptanz meist gering ist und mögliche Standorte begrenzt sind, bieten Untertagespeicher große Vorteile. Um aber Unfälle wie jüngst in Gronau²⁶⁹ zu vermeiden, besteht weiterer Forschungsbedarf für derartige Speichertechnologien.

4.3 Versorgungssituation bei Biomasse

Die wichtigste Ressource für Bioenergie ist pflanzliche Biomasse. Wie viel Biomasse zur Verfügung steht, hängt von verschiedenen Rahmenbedingungen ab: der Lichteinstrahlung, der nutzbaren Anbaufläche, den Bodentypen, der Wasserversorgung sowie der Düngung mit Stickstoff, Phosphat und Kalium. Äcker, Wiesen und Weiden müssen, um hohe Biomasse-Erträge zu erzielen, bearbeitet, gedüngt und zum Teil auch bewässert werden. Nur die Waldflächen werden in der Regel nicht zusätzlich mineralisch gedüngt. Global spielt die Qualität der Böden und die Verfügbarkeit von Wasser für die Landwirtschaft bereits eine begrenzende Rolle. Ein baldiger Peak Phosphor wird zwar immer wieder diskutiert, eine wirkliche Limitierung ist aber zurzeit nicht in Sicht.

Viele der in diesem Kapitel gemachten Angaben und Formulierungen sind aus der Stellungnahme der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina

²⁶⁸ Elsner et al. 2015.

²⁶⁹ Im Februar 2014 kam es zu einer zunächst nicht umfassend erkannten Leckage im System eines etwa in 1.000 Metern Tiefe gelegenen Kavernenspeichers. Nach Prüfung und eingeschränkter Wiederinbetriebnahme des Speichers kam es schließlich zum Austritt von eingelagertem Erdöl an der Erdoberfläche, was erhebliche Umweltverschmutzungen verursachte.

Versorgungssituation bei fossilen Energierohstoffen

Fossile Energierohstoffe stellen derzeit eine wesentliche Basis unserer Energieversorgung dar. Mit zunehmendem Ausbau erneuerbarer Energietechnologien wird dieser Bedarf zurückgehen. Eine Entkoppelung des Energiesystems von diesen Rohstoffen ist allerdings erst denkbar, wenn adäquate Speichermöglichkeiten für die fluktuierende Energiebereitstellung aus Sonne und Wind zur Verfügung stehen. Bis dahin bleiben fossile Energieträger bedeutend für die Energieversorgung.

Ohne eine Nutzung unkonventioneller Erdöl- und Erdgasvorkommen oder eine subventionsfreie, technologisch getriebene Neubelebung des Steinkohlenbergbaus wird die Importabhängigkeit Deutschlands im Bereich fossiler Energieträger somit weiter steigen. Hier besteht die Gefahr, noch stärker auf einzelne, politisch instabile Akteure, wie zum Beispiel Russland, angewiesen zu sein.

Aus strategischer und volkswirtschaftlicher Sicht ist es sinnvoll, den Einsatz von Erdöl künftig auf die am wenigsten substituierbaren Bereiche zu reduzieren: als chemischen Rohstoff und im Bereich Mobilität.

*Bioenergie – Chancen und Grenzen*²⁷⁰ entnommen, die 2013 erschienen ist. Auch die Informationen zu den Treibhausgasbilanzen nachwachsender Biomasse stammen aus dieser Veröffentlichung. Daraus lassen sich zunächst folgende generelle Aussagen ableiten: Die Treibhausgasbilanz nachhaltig bewirtschafteter Wälder ist weitgehend neutral. Dagegen sind die Treibhausgasbilanzen von intensiv genutzten Äckern, Wiesen und Weiden positiv. Dabei wird die Netto-Produktion der Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) betrachtet (Tabelle 4.2).²⁷¹

Im Jahr 2011 stammten fast acht Prozent der Treibhausgasemissionen in Deutschland aus der Landwirtschaft.²⁷² Weltweit liegt der Prozentsatz bei etwa zwanzig Prozent. Damit ist die Verwendung von agrarischer Biomasse als Energiequelle unter Klimagesichtspunkten

nicht nachhaltig, auch wenn gegenüber der Verwendung von fossilen Energieträgern pro Energieeinheit weniger Treibhausgase gebildet werden können. Intensive Landwirtschaft führt zu Biodiversitätsverlust, zu Wasserverbrauch und zur Gewässerkontaminationen durch überschüssige Nährstoffe.²⁷³ Auch das trägt dazu bei, dass die energetische Nutzung solcher Biomasse nicht nachhaltig ist.

Die Rate, mit der die Menschheit viele Ressourcen der Erde pro Jahr vereinnahmt, nimmt nach vielen Jahren der Zunahme seit einiger Zeit wieder ab. Das gilt zum Beispiel für die Umwandlung von Wiesen und Wälder in Ackerland (Landnutzungsänderungen), für die Zunahme der bewässerten landwirtschaftlichen Flächen, den Verbrauch von Wasser und die Ertragssteigerung pro Fläche, während die Rate des Verbrauchs an Gas, Öl und Kohle, aber auch von Phosphat, immer noch zunimmt. Interessanterweise haben 16 von 20 unabhängigen erneuerbaren Ressourcen eine globale Peak-Verbrauchsrate um das Jahr 2006 gehabt, wie zum Beispiel

²⁷⁰ Leopoldina 2013; auf Basis der bereits 2012 in Englisch erschienenen Version der Stellungnahme „Bioenergy – Chances and limits“ (Leopoldina 2012).

²⁷¹ Leopoldina 2013, S. 27: „N₂O und CH₄ haben einen viel stärkeren Treibhauseffekt als CO₂. Im Falle von CH₄ ist das Potenzial etwa 25-fach und im Falle von N₂O circa 300-fach höher als das vom CO₂ bezogen auf einen Horizont von hundert Jahren.“

²⁷² Umweltbundesamt 2014.

²⁷³ EASAC 2012.

Bewirtschaftete Flächen	CO ₂ aus Bodenkohlenstoffen	CO ₂ aus fossilen Brennstoffen ^{a)}	Treibhausgase aus Ernteresten	N ₂ O und CH ₄ ^{b)} (als CO ₂ -Äquivalente)	Σ
Ackerland	4 %	11 %	14 %	12 %	41 %
Wiesen/ Weiden	-26 %	7 %	18 %	20 %	19 %
Wälder	-32 %	3 %	21 %	1 %	-7 %

Tabelle 4.2: Treibhausgasemissionen in Verbindung mit dem Wachstum von Biomasse in Prozent des in geernteter Biomasse assimilierten Kohlendioxids (CO₂).²⁷⁴ Die Daten gelten für die EU-25-Länder. Die Fehlerspannen betragen mindestens ± 10 Prozent. Negative Zahlen beziehen sich auf die Aufnahme von CO₂/Treibhausgasen aus der Atmosphäre und positive Zahlen zeigen die Abgabe von CO₂/Treibhausgasen in die Atmosphäre an.

der Verbrauch an Reis, Rohrzucker, Soja, Getreide und Holz. Die Rate der Zunahme der Weltbevölkerung hatte bereits um 1989 einen Peak.²⁷⁵

4.3.1 Anteile der Bioenergie am Primärenergieverbrauch

Der Primärenergiebedarf von Industrie, Verkehr und Haushalten der zurzeit rund sieben Milliarden Menschen auf der Erde beträgt ungefähr 560 Exajoule²⁷⁶ pro Jahr. Dieser Primärenergiebedarf wird durch fossile Brennstoffe, Kernenergie und aus erneuerbaren Quellen wie der nachwachsenden Biomasse gedeckt. Der Jahresanteil von Bioenergie am weltweiten Primärenergieverbrauch beträgt mit etwa 55 Exajoule knapp 10 Prozent²⁷⁷ (Abbildung 4.5). In den meisten Entwicklungsländern ist Bioenergie, insbesondere Holz, die Hauptenergiequelle.

In der Bundesrepublik Deutschland lag der Primärenergieverbrauch im Jahr 2013 bei 13,75 Exajoule und 2014 bei 13,08 Exajoule. Der Unterschied ist auf die milde Witterung im Jahr 2014 zurückzuführen. Davon entfielen 2014 etwas mehr als 0,98 Exajoule (7,5 Prozent) auf Bioenergie. Über fünfzig Prozent der energetisch genutzten Biomasse, vorwiegend Holz, dienen der Wärmeerzeugung. Etwa 25 Prozent

gingen in die Stromerzeugung und etwa 16 Prozent wurden als Kraftstoffe genutzt. Biodiesel war unter den Biokraftstoffen führend.²⁷⁸ Eigentlich wird die in Deutschland geerntete Biomasse fast vollständig für Nahrungsmittel, Viehfuttermittel sowie Bau- und Nutzstoffe benötigt. Es blieben nur Biomasseabfälle für die Umwandlung in Bioenergie übrig. Der Anteil an Bioenergie von 7,5 Prozent war nur durch erhebliche Importe von Biomasse möglich. Der Biomasseimport verursacht oftmals direkt oder indirekt anderswo Verknappungen von Biomasse für Ernährungszwecke, führt zur Abholzung beispielsweise von Regenwäldern oder zum Verlust von Biodiversität.

Welche Bedeutung die Biomasse für die Energieversorgung in Deutschland hat, lässt sich am Beispiel des elektrischen Stroms verdeutlichen. Ende 2013 wurde in Deutschland in 7.850 Biogasanlagen Biogas erzeugt (Prognose für 2014 7.960 Anlagen)²⁷⁹ und dort meist kontinuierlich mit einem Wirkungsgrad von bis zu 35 Prozent verstromt. Die installierte elektrische Leistung aller Anlagen zusammen betrug circa 3,54 Gigawatt, die Nettoleistung lag bei circa 2,5 Gigawatt. Die Bruttostromerzeugung wird mit 27,5 Terawattstunden angegeben, was einem Anteil von etwa vier Prozent der gesamten deutschen Bruttostromerzeugung

²⁷⁴ Leopoldina 2013, S. 26–28.

²⁷⁵ Seppelt et al. 2014.

²⁷⁶ Ein Exajoule entspricht einer Trillion oder 10¹⁸ Joule.

²⁷⁷ Dies entspricht pro Jahr 1,5 Milliarden Tonnen Kohlenstoff.

²⁷⁸ AGE 2015, S. 39 ff.

²⁷⁹ BMEL 2015.

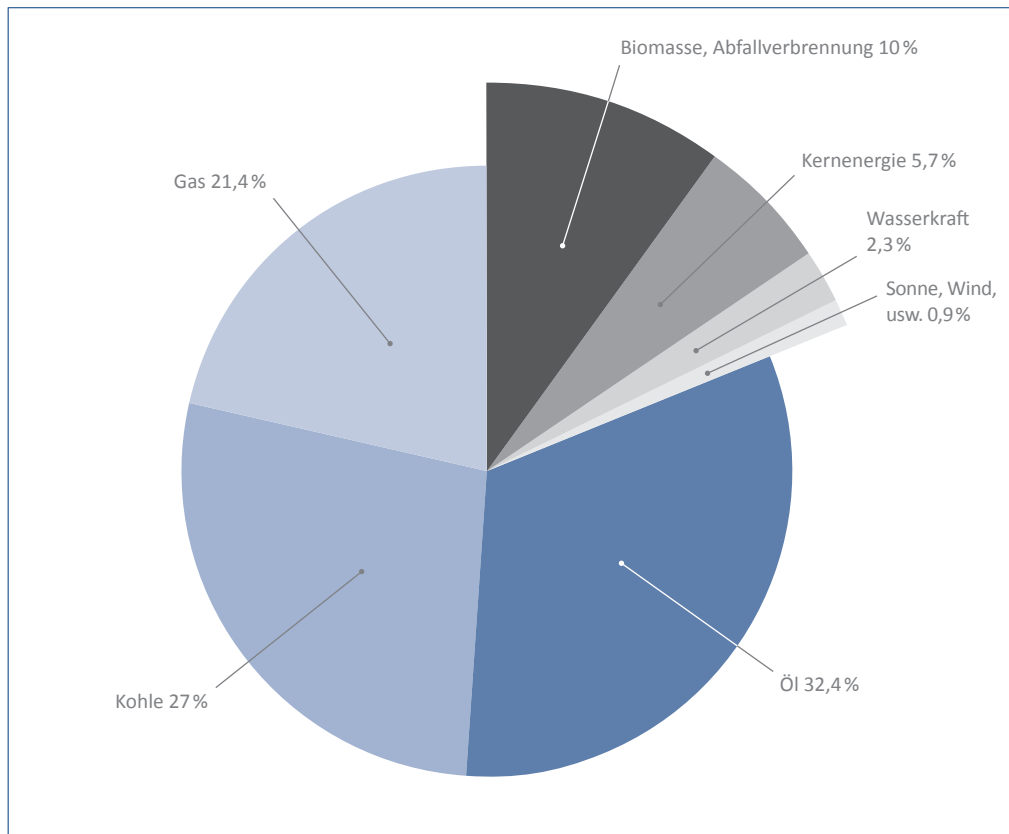


Abbildung 4.5: Weltweiter Primärenergieverbrauch im Jahr 2012 (560 Exajoule), unterteilt nach Energiequellen²⁸⁰

(633 Terawattstunden) entsprach. Betrachtet man nur die deutsche Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (152 Terawattstunden) hatte Biogas einen Anteil von ungefähr 18 Prozent am Ökostrom.²⁸¹ Diese Zahlen machen deutlich, dass Strom aus Biogas bei bedarfsorientierter Produktion eine quantitativ wichtige Rolle in den Zeiten spielt, in denen Strom aus Windkraft oder Photovoltaik nicht zur Verfügung steht.

Der weltweite jährliche Primärenergieverbrauch pro Kopf liegt derzeit bei etwa 70 Gigajoule pro Person und Jahr. Dieser globale Jahresdurchschnitt ist viel niedriger als der Durchschnitt in Europa (150 Gigajoule pro Person und Jahr) oder in den USA, Kanada, Norwegen und Australien (>300 Gigajoule pro Person und Jahr). Da der Wohlstand der Menschen in anderen

Kontinenten sich hoffentlich verbessern wird, ist zu erwarten, dass der globale Jahresdurchschnitt in den nächsten 40 Jahren auf mindestens 100 Gigajoule pro Person und Jahr ansteigen wird. Zusätzlich dürfte sich in dieser Zeit die Gesamtbevölkerungszahl von sieben Milliarden auf neun Milliarden erhöhen. Deshalb ist es sehr wahrscheinlich, dass sich der jährliche globale Primärenergieverbrauch bis 2050 von jetzt 560 Exajoule auf dann 900 Exajoule fast verdoppeln wird. Der Anstieg könnte niedriger ausfallen, wenn es gelingen sollte, den Primärenergieverbrauch in den Industrieländern zu reduzieren. Deutschland hat sich bis zum Jahr 2050 eine Halbierung von derzeit fast 14 Exajoule pro Jahr auf sieben Exajoule pro Jahr zum Ziel gesetzt. In den letzten Jahren gab es allerdings kaum Anzeichen für eine deutliche Reduktion des Energieverbrauchs.

²⁸⁰ Daten aus IEA 2014-2, S. 6.

²⁸¹ AGE B 2015, S. 30 und S. 39.

Neben dem Primärenergieverbrauch wird sich auch der globale Biomasseverbrauch deutlich erhöhen, weil zusätzliche Mengen für die menschliche Ernährung und die Herstellung von Produkten wie Papier, Baumwolle und Baumaterialien benötigt werden. Berücksichtigt man, dass die Landwirtschaft aus Gründen des Klima- und Umweltschutzes künftig schonender sein soll, dann wird deutlich, dass sich die Menge an Biomasse, die verfügbar ist, voraussichtlich nicht wesentlich steigern lassen wird. Damit wird der Anteil der Bioenergie am globalen Primärenergieverbrauch von derzeit zehn Prozent wahrscheinlich eher schrumpfen.

Letztlich sind Prognosen zum weltweiten Potenzial der Bioenergie aber unsicher, weil sie zugleich von mehreren Annahmen abhängen:

- den zu erwartenden Steigerungen der Ernteerträge
- der nachhaltig verfügbaren Wassermenge
- den mit intensiver Landwirtschaft verbundenen Treibhausgasemissionen
- den Auswirkungen direkter und indirekter Landnutzungsänderungen auf Treibhausgasemissionen und die Biodiversität
- der für die Ernährung der Menschheit benötigten agrarischen Flächen

Natürlich werden einige dieser Annahmen ihrerseits durch die Bevölkerungszahl, den Grad des Wohlstands, die Verluste in der Nahrungsmittelherstellungskette und die Essgewohnheiten beeinflusst.²⁸² Nicht-Vegetarier etwa brauchen sehr viel mehr agrarische Flächen für ihre Ernährung als Vegetarier.²⁸³ So unterscheidet sich die hier vorgestellte Einschätzung von dem

aktuellen „Forecast“ des Club of Rome²⁸⁴ und den Ergebnissen der International Renewable Energy Agency (IRENA)²⁸⁵. Beide gehen von einem erheblichen zukünftigen Anstieg der für Ernährung und Bioenergie verfügbaren Biomasse aus. Der „Forecast“ des Club of Rome²⁸⁶ sagt aber auch voraus, dass der zukünftige intensivierete Biomasseanbau erheblich zu Lasten von Umwelt und Klima gehen wird, und die IRENA Projektion²⁸⁷ räumt ein, dass viele mit der intensiven Landwirtschaft verbundene Nachhaltigkeitsprobleme noch ungelöst sind.

4.3.2 Bilanzierung der pflanzlichen Biomasseproduktion auf dem Land

Von der globalen Landfläche (150 Millionen Quadratkilometer) sind etwa ein Drittel Wüsten, Berge, Tundren, Städte oder andere, nicht für die forstwirtschaftliche und landwirtschaftliche Nutzung geeignete, Flächen (Abbildung 4.6A). Die Verfügbarkeit von Biomasse als Energiequelle ist in weniger dicht besiedelten Ländern wie den USA oder Brasilien mit einer Einwohnerdichte von 30 beziehungsweise 20 Menschen pro Quadratkilometer höher als in Deutschland mit einer Einwohnerdichte von 230 Menschen pro Quadratkilometer.²⁸⁸ Die globale Landfläche liefert derzeit jährlich nachwachsende pflanzliche Biomasse (Nettoprimärproduktion; siehe BOX XIV) mit einem Gewicht von 60 Gigatonnen Kohlenstoff und einem Energieinhalt von 2.200 Exajoule. Dabei entspricht der Kohlenstoffgehalt von getrockneter pflanzlicher Biomasse etwa 50 Prozent. Der durchschnittliche Energiegehalt (Bruttobrennwert) von Trockenbiomasse beträgt 37 Kilojoule pro Gramm Kohlenstoff.

²⁸⁴ Randers 2012.

²⁸⁵ IRENA 2014.

²⁸⁶ Randers 2012, S. 130–159.

²⁸⁷ IRENA 2014, S. 45–58.

²⁸⁸ DOE 2011-2.

²⁸² Haberl et al. 2013.

²⁸³ Leopoldina 2013, S. 33f.

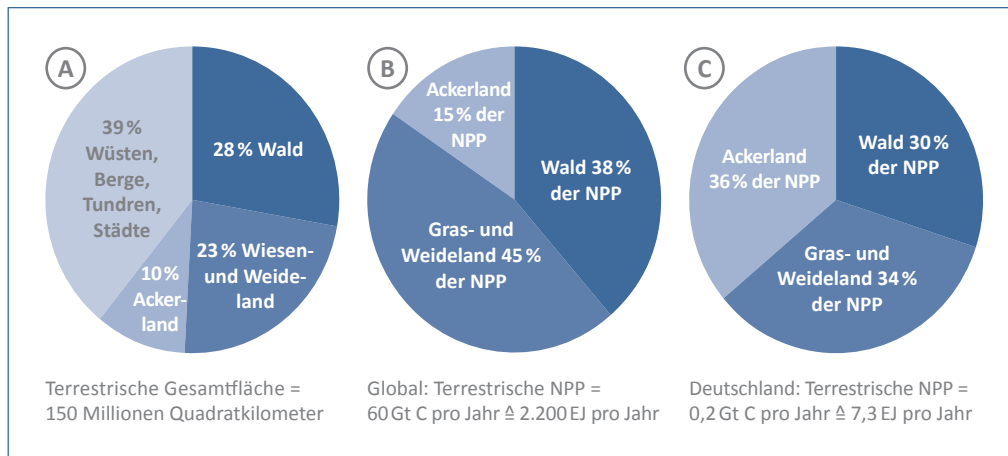


Abbildung 4.6: Nutzung der terrestrischen Landoberfläche und deren Anteile an der Nettoprimärproduktion.²⁸⁹

A) Globale Verteilung der terrestrischen Flächen auf Wälder, Wiesen, Äcker und für forst- und landwirtschaftliche Nutzung ungeeignete Flächen B) Globale Anteile der verschiedenen Nutzflächen an der NPP C) Anteil der verschiedenen Nutzflächen an der NPP in Deutschland.

Etwa 38 Prozent der weltweiten Nettoprimärproduktion (NPP) entfallen auf Waldflächen, 45 Prozent auf Gras- und Weideland und 15 Prozent auf Ackerland (Abbildung 4.6B). Von der globalen NPP sind über 50 Prozent für den Menschen nicht verfügbar, da sich diese unterirdisch (30 bis 40 Prozent) oder in unzugänglichen Umgebungen (20 Prozent) befindet. Von der jährlich global nachwachsenden Biomasse werden vom Menschen zurzeit etwa 10 Prozent genutzt: etwa 7 Prozent für Nahrung und Tierfutter sowie 1 Prozent für industrielle und 2 Prozent für energetische Zwecke.

In Deutschland beträgt die jährlich nachwachsende pflanzliche Biomasse etwa 0,2 Gigatonnen Kohlenstoff mit einem Energiegehalt von 7,3 Exajoule (Abbildung 4.6C). Etwa 30 Prozent der deutschen NPP entfallen auf Wald, 34 Prozent auf Gras- und Weideland und 36 Prozent auf Ackerland. Von der NPP in Deutschland werden jährlich circa 0,09 Gigatonnen Kohlenstoff mit einem Energiegehalt von etwa 3,4 Exajoule vom Menschen geerntet oder von Nutztieren abgegrast. Das entspricht 24 Prozent des deutschen Primärenergieverbrauchs von 14 Exajoule. Im Jahr 2010 beispielsweise

vereinnahmte Deutschland darüber hinaus über Importe jährlich einen Anteil der ausländischen Nettoprimärproduktion von circa 0,07 Gigatonnen Kohlenstoff. Die Menge schließt die aus Biomasse hergestellten Produkte ein, die im Ausland produziert, aber in Deutschland verbraucht wurden.

4.3.3 Biomasse aus Wäldern

Von der globalen Landfläche sind ungefähr 41,6 Millionen Quadratkilometer (28 Prozent) bewaldet (Abbildung 4.6A). Zum Vergleich, in Deutschland sind durchschnittlich 32 Prozent der Flächen bewaldet.²⁹⁰ Die globale Nettoprimärproduktion der Wälder beträgt ungefähr 23 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr. Anhand von Kohlenstoffbilanzen wurde abgeleitet, dass für eine nachhaltige Waldnutzung, also hinsichtlich einer Bestandserhaltung und klimaneutralen Nutzung, ein Ernteindex²⁹¹ von 12 bis 13 Prozent nicht zu überschreiten ist. Der Aspekt der Nachhaltigkeit hat

²⁹⁰ BMEL 2014.

²⁹¹ Der Ernteindex ergibt sich aus dem Prozentsatz der gesamten Nettoprimärproduktion (oberirdisch und unterirdisch), der nachhaltig als Holz aberntbar ist. Bei der Definition eines Ernteindex für Bäume ist zu berücksichtigen, dass in diesen langlebigen Pflanzen die meiste NPP für die stete Neubildung von Blättern und Wurzeln verwendet wird. Diese NPP kann nicht als Holz geerntet werden, wodurch sich bei Bäumen der Ernteindex reduziert.

²⁸⁹ Zahlengrundlage aus Leopoldina 2013.

BOX XIV: Nettoprimärproduktion pflanzlicher Biomasse

Mit Nettoprimärproduktion (NPP) wird die Menge an pflanzlicher Biomasse bezeichnet, die innerhalb eines Jahres auf einem gegebenen Gebiet aufwächst. Dabei werden die Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen und Wurzelausscheidungen sowie ober- und unterirdische Streu, die innerhalb eines Jahres remineralisiert wird, vernachlässigt. Die NPP ist abhängig von der Sonneneinstrahlung, der Länge der Vegetationsperiode, der Temperatur und der Wasser- und Mineralstoff-Versorgung (Abbildung 4.7). Die globale Nettoprimärproduktion hat in den letzten 200 Jahren um etwa zehn Prozent abgenommen, trotz Ausweitung von Düngung, Pflanzenzucht und Bewässerung. Ein Hauptgrund hierfür ist, dass viele landwirtschaftlich genutzte Flächen eine niedrigere NPP haben als die ursprüngliche, natürliche Vegetation. Außerdem hat sich die NPP durch Versiegelung von Flächen und durch die Verschlechterung des Bodens verringert. Der Rückgang der NPP auf vielen Flächen konnte auch nicht durch die Steigerung der NPP von Feldpflanzen durch Düngung, Bewässerung und Züchtung in einigen intensiv genutzten Regionen wie in Nordwest-Europa oder dem Niltal kompensiert werden. So ist für die Zukunft eher eine weitere Netto-Abnahme der globalen NPP durch Bodenerosion, Bodenversalzung und Überbauung zu erwarten als eine Zunahme durch Ausweitung der landwirtschaftlichen Nutzflächen, Düngung, Bewässerung und Pflanzenzucht.²⁹²

Die kontinuierliche Steigerung der Ernteerträge, die in den letzten fünfzig Jahren erreicht wurde, ist in den letzten Jahren abgeflacht und war im Wesentlichen mit der Umverteilung der NPP innerhalb der Pflanze (zum Beispiel mehr Getreidekörner bei niedrigerem Pflanzenwuchs) und nur unwesentlich mit einer Erhöhung der NPP verbunden. Die früheren Steigerungsraten der Ernteerträge wurden nicht nur durch Pflanzenzüchtung erzielt, sondern auch durch Verwendung von Düngemitteln und durch bessere Bewässerung. Ob es in Zukunft möglich sein wird, auch die NPP über das natürliche Potenzial hinaus langfristig und über ausgedehnte Gebiete hinweg zu steigern, scheint fraglich.²⁹³

dabei einen Bezugszeitraum von Jahrzehnten.²⁹⁴ Die Menge an Holz, die somit jährlich nachhaltig gefällt werden kann, wird auf etwa 3 Gigatonnen Kohlenstoff geschätzt. Dies entspricht einem Brennwert von etwa 110 Exajoule. Selbst wenn das ganze Holz, das nachhaltig gefällt werden kann, für energetische Zwecke verwendet werden würde, läge der Anteil von Holz am gegenwärtigen weltweiten Primärenergieverbrauch (560 Exajoule pro Jahr) bei lediglich etwa zwanzig Prozent. Diese Annahme ist indes unrealistisch, da Holz auch für andere Zwecke,

wie zum Beispiel den Bau oder die Papierherstellung, benötigt wird. Bei einer intensiven energetischen Waldnutzung besteht sogar ein erhebliches Risiko, dass die Integrität und Nachhaltigkeit der Wälder für die Steigerung der Energieproduktion geopfert wird, ohne eine Verringerung des Klimawandels zu erzielen.²⁹⁵ Nach Angaben der Food and Agriculture Organization der Vereinten Nationen (FAO) wurden im Jahr 2011 weltweit durchschnittlich etwa sechs Prozent des Primärenergieverbrauchs durch Verbrennung von Holz gedeckt.²⁹⁶ Dies entspricht einem Brennwert von etwa

²⁹² Zika/Erb 2009; Zhao/Running 2010; Haberl et al. 2013; Krausmann et al. 2013; Hejazi et al. 2014; siehe auch Leopoldina 2013, S. 16.

²⁹³ Leopoldina 2013, S. 16.

²⁹⁴ Leopoldina 2013, Anhang 1.

²⁹⁵ Schulze et al. 2012; Stephenson et al. 2014.

²⁹⁶ Etwa 55 Prozent des geernteten Holzes wurden zur Deckung des Primärenergieverbrauchs aufgewendet.

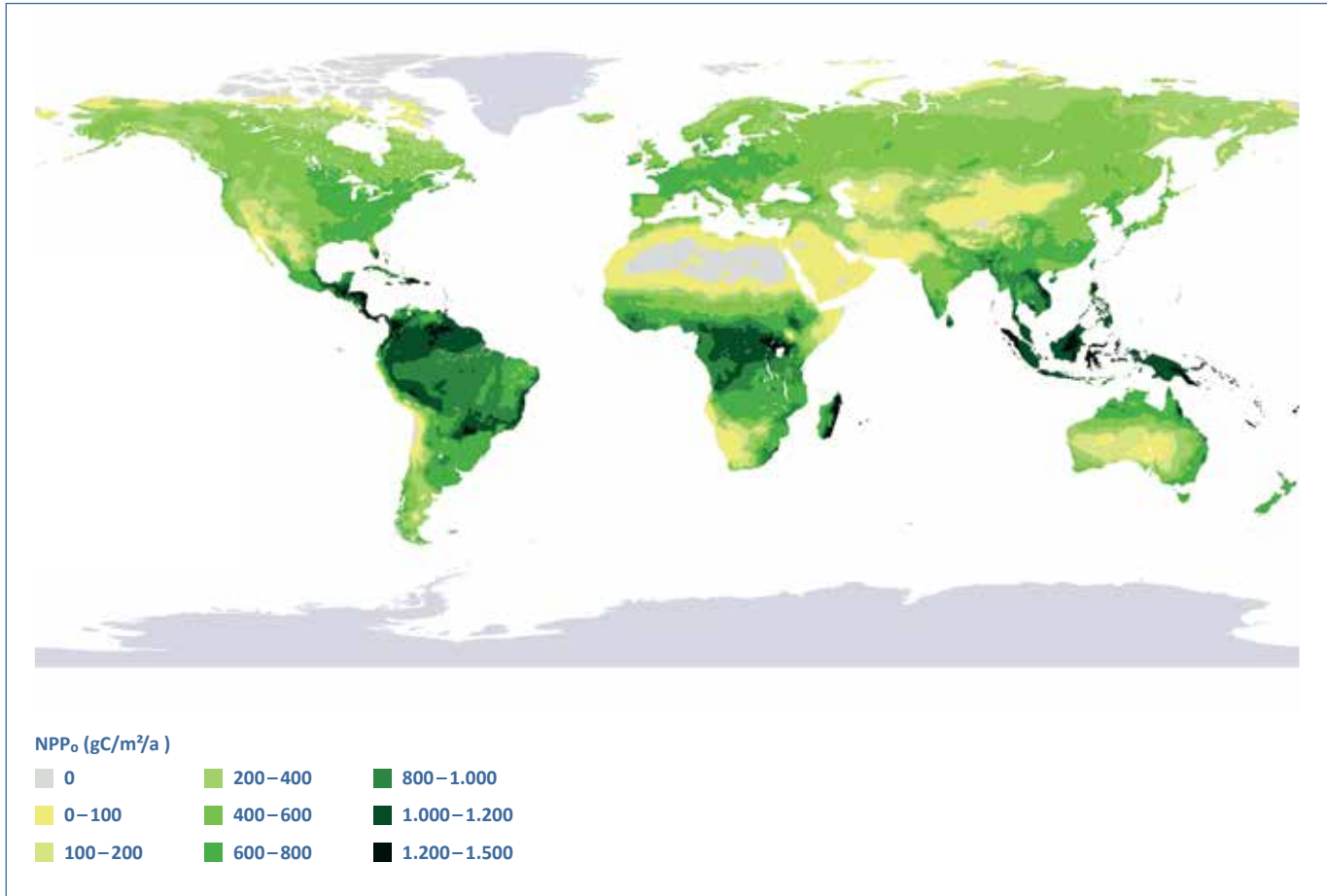


Abbildung 4.7: Globale terrestrische Nettoprimärproduktion im Jahr 2000.²⁹⁷ Die globale terrestrische Fläche beträgt etwa 150 Millionen Quadratkilometer, von denen nur 100 Millionen Quadratkilometer mit Vegetation bewachsen sind. Die durchschnittliche NPP pro Quadratmeter beträgt ungefähr 430 Gramm Kohlenstoff pro Jahr (gC/m²/a) bezogen auf die Gesamtlandfläche, und 650 Gramm Kohlenstoff pro Jahr bezogen auf die bewachsene Fläche.

30 Exajoule. Der Holzanteil am jeweiligen Gesamtenergieverbrauch ist regional sehr unterschiedlich. In Afrika beispielsweise ist der Anteil mit durchschnittlich 27 Prozent weltweit am größten, in Nordamerika mit 2 Prozent am geringsten.²⁹⁸

In Deutschland gibt es 11,4 Millionen Hektar Wald mit einem Holzvorrat von 336 Kubikmeter pro Hektar und einem durchschnittlichen Holzzuwachs von 11,2 Kubikmeter pro Hektar und Jahr. In den letzten 10 Jahren hat die Waldfläche um 0,4 Prozent zugenommen. Der Wald ist im Durchschnitt 77 Jahre alt. 43 Prozent der Bäume sind Laubbäume. Die Entwicklung weg

von reinen Nadelbaumbeständen hin zu standortgerechten, strukturreichen Mischwäldern und die Einschränkung des Holzeinschlags setzt sich fort, da man damit den Auswirkungen des Klimawandels vorbeugen will. Von 2002 bis 2012 sind durchschnittlich nur 76 Millionen Kubikmeter Rohholz (Erntefestmeter ohne Rinde) pro Jahr genutzt worden.²⁹⁹

4.3.4 Biomasse aus der Landwirtschaft

Von der globalen Landfläche (150 Millionen Quadratkilometer) werden derzeit 49 Millionen Quadratkilometer (33 Prozent) landwirtschaftlich genutzt (Abbildung 4.6A). Etwa 34 Millionen Quadratkilometer (23 Prozent) davon sind Wiesen und Weideland mit einer globalen NPP von 27 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr. Etwa

²⁹⁷ Haberl et al. 2007, begleitendes Informationsmaterial SI Figure 2.

²⁹⁸ FAO 2014, S. 32.

²⁹⁹ BMEL 2014.

15,3 Millionen Quadratkilometer (10 Prozent) sind Ackerland mit einer globalen NPP von 10 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr. Von der auf diesen Flächen anfallenden NPP (37 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr) werden zurzeit etwa sechs Gigatonnen Kohlenstoff für die Ernährung von Menschen und Nutztieren sowie für die Versorgung des Menschen mit Nutstoffen (zum Beispiel Baumwolle) und Energie (0,72 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr beziehungsweise 25 Exajoule pro Jahr) genutzt. Die verbleibenden 31 Gigatonnen Kohlenstoff müssen sich alle übrigen Lebewesen teilen. Sie stehen für Ernährung ohnehin meist nicht zur Verfügung, da sie beispielsweise als Wurzeln unterirdisch liegen (30 bis 40 Prozent) oder für den Menschen nicht verdaulich sind (Lignocellulose).

Zurzeit leiden über eine Milliarde Menschen unter Unterernährung und mangelnder Ernährungssicherheit aufgrund regionalen Lebensmittel Mangels. Eine weitere Milliarde leiden unter Vitamin- und/oder Spurenelementmangel (Hidden Hunger). Um dem abzuwehren wird in Zukunft wahrscheinlich beinahe die gesamte agrarische Biomasse, die nachhaltig auf der Erde geerntet werden kann, für die menschliche Ernährung (Getreide, Mais, Reis, Gemüse, Salate, Fette und Öle), als Tierfutter, für die stoffliche Nutzung (zum Beispiel Baumwolle), oder als Ausgangsmaterial für Plattformchemikalien benötigt werden. Die für das Jahr 2050 erwartete Weltbevölkerung von neun bis zehn Milliarden Menschen wird vermutlich sämtliche agrarische Biomasse für die Ernährung benötigen. Damit wird landwirtschaftlich nur noch wenig Biomasse für die Energieerzeugung zur Verfügung stehen. Zur energetischen Nutzung bleiben dann noch agrarische Biomasseabfälle übrig, die mengenmäßig allerdings nicht unerheblich sein können.

In Deutschland beispielsweise fallen jährlich insgesamt 18 Megatonnen Kohlenstoff (0,64 Exajoule) agrarische

Abfälle an. Auch Stroh (20 Megatonnen Kohlenstoff; 0,7 Exajoule) steht teilweise als Energiequelle zur Verfügung, wobei zu beachten ist, dass der größte Teil zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit untergepflügt werden muss.³⁰⁰

Unerschlossene Potenziale

In Deutschland ist es per Gesetz verboten, organische Abfälle zu deponieren, daher haben sich hierzulande bereits Nutzungsstrukturen (zum Beispiel Biogasanlagen) für die meisten Biomasseabfälle etabliert. Weltweit werden allerdings noch immer große Mengen von Biomasseabfällen deponiert. Dabei werden aufgrund von Verrottungsprozessen zum Teil große Mengen an Treibhausgasen, insbesondere Methan, frei. Beispielsweise werden für die Produktion einer Tonne Palmöl circa 4,4 Tonnen feste und flüssige Abfallstoffe erzeugt, deren Deponierung etwa 1,2 Tonnen CO₂-Äquivalente an Treibhausgasen erzeugen kann.³⁰¹ Durch die energetische Nutzung solcher Abfälle könnten die Treibhausgasemissionen aus der Deponierung vermieden werden.

Die Schätzungen, wie viel Bioenergie aus agrarischer Biomasse im Jahr 2050 weltweit zur Verfügung stehen wird, gehen weit auseinander. Sie reichen von 50 Exajoule pro Jahr (Istzustand) bis 500 Exajoule pro Jahr.³⁰² Die Unterschiede erklären sich unter anderem anhand der unterschiedlich getroffenen Annahmen zu den verschiedenen Einflussfaktoren (siehe Kapitel 4.3.1).

Die Produktion von tierischen Produkten, wie Fleisch und Milch, erfordert erhebliche Mengen pflanzlicher Biomasse, die von der spezifischen Tierart und der Fütterungsstrategie abhängig sind. Verschiedene Tierarten wandeln Futter mit unterschiedlicher Effizienz in Fleisch um. Zum Beispiel benötigt man für die

³⁰⁰ Leopoldina 2013.

³⁰¹ Stichnothe/Schuchardt 2010.

³⁰² Fritz et al. 2013; Empfehlungen des BÖR 2012; IPCC 2011, Kapitel 2; Leopoldina 2013, S. 16.

Herstellung von einem Kilogramm Rindfleisch (rotes Fleisch) unter Umständen etwa 13 Kilogramm Getreide und 30 Kilogramm Heu, während ein Kilogramm Hähnchenfleisch (weißes Fleisch) nur circa 2,3 Kilogramm Körnerfutter erfordert. Ungefähr 40 Prozent der gesamten weltweiten Getreideproduktion wird im Durchschnitt an Tiere verfüttert, um Fleisch, Milch, Käse und andere aus Tieren stammende Lebensmittel zu produzieren. Dieser Trend ist steigend. So werden gegenwärtig 75 Prozent der weltweiten landwirtschaftlichen Nutzflächen für die Aufzucht von Nutztieren verwendet.

In Deutschland und in den meisten europäischen Ländern werden ungefähr zwei Drittel der gesamten Nahrungsmittelenergie aus pflanzlichen und etwa ein Drittel aus tierischen Produkten bereitgestellt (Fleisch, Milch, Eier etc.). Bei vegetarischer Ernährung könnten bis zu fünfzig Prozent der agrarischen Flächen für Bioenergie frei werden.³⁰³ Derzeit sind die Nahrungsmittelherstellungsketten sehr ineffizient. Circa sechzig Prozent der Ernte gehen weltweit durch Verluste in der Landwirtschaft und in den Lieferketten sowie durch Wegwerfen in Supermärkten und Haushalten verloren. Eine substantielle Reduktion dieser Verluste könnte eine nachhaltigere Landwirtschaft möglich machen.³⁰⁴ Damit ließen sich auch die Treibhausgasemissionen, die Nitratmengen im Grundwasser und andere Umweltbelastungen verringern.

4.3.5 Lignocellulose

Es wird häufig darauf hingewiesen, dass ein größerer Prozentsatz der Nettoprimärproduktion als Energiequelle zur Verfügung stünde, wenn der Lignocellulose-Anteil von Feldpflanzen und Gräsern zu Bioethanol umgewandelt werden könnte (sogenannte zweite Generation Biotreibstoffe).³⁰⁵ Da Menschen Cellulose

nicht verdauen können, würde es auch keinen Wettbewerb zwischen Kraftstoff und Ernährung geben. Diese Argumente lassen allerdings außer Acht, dass Wiederkäuer (Rinder, Schafe, Ziegen etc.), die eine wichtige Quelle für tierische Produkte der menschlichen Ernährung sind, im Wesentlichen von Cellulose leben können. Außerdem wird der Lignocellulose-haltige Teil von Feldpflanzen auch dazu benötigt, den Kohlenstoffgehalt der Böden zu regenerieren. Cellulose und Holz sind darüber hinaus auch Pflanzenprodukte mit einer ganzen Reihe von anderen Verwendungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel in der Bau- und Papierindustrie.

4.3.6 Land, Böden, Wasser, Stickstoff, Phosphor und Kalium

Die Nutzung von Land, Böden, Süßwasser, Stickstoff und Phosphor durch den Menschen hat Grenzen. Deren Überschreitung kann zum Umkippen der Umweltbedingungen (zum Beispiel Eutrophierung³⁰⁶ von Gewässern) führen. Ein internationales Team von Wissenschaftlern hat in diesem Zusammenhang neun essenzielle ökologische Dimensionen definiert, die durch eine Übernutzung oder Überlastung massiv und teils unumkehrbar gestört werden könnten – dazu zählen der Wasserverbrauch, der globale Stickstoffkreislauf oder die Biodiversität, beziehungsweise der Verlust an Artenvielfalt. Diese ökologischen Dimensionen werden nach diesem Konzept als „Globale Grenzen“ (Planetary Boundaries) bezeichnet. Die Forscher gehen davon aus, dass die Globalen Grenzen heute bei der Biodiversität, dem globalen Phosphor- und Stickstoffkreislauf, dem Klimawandel und der Landnutzung bereits überschritten sind.³⁰⁷

³⁰³ Eisler et al. 2014.

³⁰⁴ Leopoldina 2013, S. 33.

³⁰⁵ Peplow 2014.

³⁰⁶ Eutroph bedeutet nährstoffreich. In diesem Kontext ist eine anthropogen verursachte Überdüngung von Gewässern gemeint, die ein übermäßiges Pflanzenwachstum verursacht und somit zu weitreichenden Ungleichgewichten in diesen Lebensräumen führen kann (Entzug von Sauerstoff, Verlandung, Faunasterben, Übermäßiges Wachstum einzelner Pflanzenformen etc.).

³⁰⁷ Rockström et al. 2009; Steffen et al. 2015.

Landnutzungsänderungen

Zwischen 1985 und 2000 haben die landwirtschaftlichen Nutzflächen (Weide- und Ackerland) weltweit um 1,54 Millionen Quadratkilometer zugenommen. Vor allem in den Tropen wurden die Flächen erheblich erweitert, während in den gemäßigten Zonen die Flächen konstant blieben oder sogar abnahmen. Das Ergebnis ist also eine Nettoumverteilung der landwirtschaftlichen Flächen in Richtung der Tropen.³⁰⁸

Eine weitere Expansion der landwirtschaftlichen Nutzflächen ist problematisch, da durch die weltweite Landwirtschaft bereits 70 Prozent der Wiesen, 50 Prozent der Savannen, 45 Prozent der Laubwälder in gemäßigten Zonen und 27 Prozent der tropischen Waldlebensräume in Besitz genommen beziehungsweise abgeholzt wurden. Von der insgesamt nachwachsenden Biomasse, die sich alle Lebewesen teilen müssen, hat sich der Mensch global bereits über 40 Prozent über Land- und Forstwirtschaft angeeignet³⁰⁹. Gleichwohl wird eine Vergrößerung der Anbaufläche mit intensiver landwirtschaftlicher Produktion um fünf Prozent zwischen 2005 und 2050 vorausgesagt, mit allen damit verbundenen Risiken. Die Landnutzungsänderung zugunsten der Landwirtschaft hat enorme Auswirkungen auf Lebensräume, biologische Vielfalt, Kohlenstoffspeicherung, Bodenverhältnisse, Trinkwasserverfügbarkeit und Treibhausgasemissionen (N_2O , CH_4 und CO_2). So trägt die intensive Landwirtschaft inklusive Landwirtschaft-bedingter Landnutzungsänderungen weltweit mit etwa zwanzig Prozent zum Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre bei.³¹⁰

308 Leopoldina 2013, S. 14.

309 „Angeeignet“ bezeichnet die Differenz zwischen der NPP der potenziellen Vegetation, also der Vegetation, die an einem bestimmten Standort aufgrund von Standortfaktoren wie Boden und heutigem Klima in Abwesenheit menschlicher Nutzung zu erwarten wäre, und dem Anteil der NPP der gegenwärtig vorherrschenden Vegetation, der nach der menschlichen Ernte im Ökosystem verbleibt (siehe Leopoldina 2013, S. 116–132).

310 Leopoldina 2013, S. 28; Wegener/Theuvsen 2010, S. 4.

Böden

Für die Fruchtbarkeit von Böden ist entscheidend, dass die Böden stabil sind. Das bedeutet, dass die Bodenbildungsrate gleich oder höher ist als die Rate der Bodenverluste. Eine solche Bildung von Böden findet statt, wenn festes Gestein durch physikalische, chemische und biologische Prozesse sowie mithilfe von Bodenorganismen aufgelockert und in neue mineralische Komponenten transformiert wird. Die dabei entstehenden Partikel verbinden sich mit der zerfallenden Biomasse und lebendigen Mikroben zu größeren Aggregaten. Diese Aggregate aus mineralischen und organischen Nährstoffen werden von Mikroben so aufbereitet, dass die Mineralien von Pflanzen genutzt werden können. Die Poren innerhalb und zwischen den Bodenaggregaten sind bedeutende Feuchtigkeitsspeicher. Sie sind entscheidend für das biologische Wachstum, erleichtern das Abfließen von Wasser und ermöglichen auch die Sauerstoffzufuhr in die Pflanzenwurzeln.

Insgesamt enthält der Boden zweibis dreimal so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre (820 Gigatonnen C) oder die terrestrische Vegetation (800 Gigatonnen C).³¹¹ Im Boden liegt Kohlenstoff meist als organische Materie vor, die zum Teil sehr stabil ist und seit Jahrtausenden besteht, teilweise aber auch leicht zersetzt wird. Die Stabilität der organischen Substanz im Boden hängt nicht allein von der molekularen Struktur der organischen Materie ab. Vielmehr beeinflussen auch Mikroorganismen und Umweltfaktoren, wie Temperatur oder Wasseraktivität, den Abbau maßgeblich.

In einigen Regionen der Welt geht zurzeit der Boden hundert Mal schneller verloren, als er gebildet wird.³¹² Diese

311 Hierbei wird der Kohlenstoff, der dem Kohlenstoffkreislauf unterliegt, bilanziert. Kohlenstoff, der beispielsweise in Gesteinen, wie Karbonatgesteinen, gebunden ist, wird hier nicht berücksichtigt.

312 Leopoldina 2013, S. 36f.

Verluste an Böden können auf vielfältige Weise auftreten: zum Beispiel aufgrund von Bodenabtragung durch Regen, Staubstürme, Verschlechterung durch Umweltverschmutzung, durch Salze aus verdunstetem Bewässerungswasser, durch Verdichtung aufgrund schwerer Maschinen, durch Bodenkohlenstoff, der zu CO_2 oxidiert wird, oder durch Böden, die buchstäblich versiegelt werden, indem Städte beziehungsweise Straßen und Häuser gebaut werden.³¹³

Wasser

Pflanzen benötigen für ein optimales Wachstum in der Regel viel Wasser. Aufgrund der moderaten Temperaturen und der relativ hohen Niederschläge benötigt der Anbau von Kulturpflanzen in Deutschland normalerweise keine Bewässerung und dort, wo bewässert werden muss, steht dafür in der Regel ausreichend Wasser zur Verfügung. In Ländern mit weniger Niederschlägen als in Deutschland können jedoch hohe Erträge nur mithilfe von Bewässerung erzielt werden. Allerdings können Böden durch die Bewässerung auch versalzen. Allgemein ist die Bewässerung für die landwirtschaftliche Produktivität sehr wichtig. Für die Bewässerung werden derzeit weltweit aus dem Grundwasser und aus Seen und Flüssen etwa 2.800 Kubikkilometer pro Jahr (70 Prozent der weltweiten Süßwasserentnahmen) entnommen. Diese Entnahmen werden zur Bewässerung von etwa 24 Prozent der Ackerflächen genutzt, auf denen rund 34 Prozent der landwirtschaftlichen Produkte erzeugt werden. In den vergangenen 50 Jahren hat sich die Fläche der weltweit bewässerten Anbauflächen in etwa verdoppelt. Jedoch sind gleichzeitig auch beträchtliche Flächen aufgrund von Versalzung verloren gegangen. Die Nutzungsgrenze (Planetary Boundary) für den globalen Süßwasserverbrauch wird auf knapp 4.000 Kubikkilometer pro Jahr geschätzt.³¹⁴

Betrachtet man die Meere gibt es auf der Erde schier unbegrenzte Mengen Wasser. Dieses lässt sich aber nur nutzen, wenn es in Meerwasserentsalzungsanlagen aufbereitet wird, was große Mengen an Energie erfordert. Da Pflanzen große Mengen an Wasser zum Wachstum benötigen, wird bei ihrem Aufwuchs mit entsalztem Meerwasser bis zu fünfzig Prozent der Energie verbraucht, die bei der Verbrennung der aufgewachsenen Biomasse freigesetzt werden kann. Wenn die Energie für die Entsalzung von der Sonne stammt, ist der Energieverbrauch an sich nicht unbedingt problematisch. Allerdings könnte die Solarenergie statt für die Entsalzung auch gegebenenfalls effizienter direkt für die Stromerzeugung eingesetzt werden.

Stickstoffdünger

Pflanzen bestehen zu etwa fünfzig Prozent aus Kohlenstoff und je nach Pflanzenart zu einem deutlich geringeren Teil aus Stickstoff (N). So haben beispielsweise Fichtenhölzer mit Rinde einen Stickstoffgehalt von 0,13 Prozent und ganze Weizenpflanzen von 1,4 Prozent. Während der Kohlenstoffgehalt in unterschiedlichen pflanzlichen Geweben relativ konstant ist, variiert der Stickstoffgehalt je nach Gewebe zwischen 0,03 Prozent und 7 Prozent. Stickstoff ist wesentlicher Bestandteil von Proteinen und Nukleinsäuren aber auch von Chlorophyll. Der Stickstoff wird unter Beteiligung von Mikroorganismen aus dem Stickstoff der Luft³¹⁵ fixiert, der in fast unbegrenzten Mengen zur Verfügung steht. Um hohe Erträge zu erzielen, ist allerdings eine Düngung mit Stickstoff (Ammonium – NH_4^+ , Harnstoff – $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ oder Nitrat – NO_3^-) erforderlich. In Deutschland wurde 2010 ein Hektar Ackerfläche durchschnittlich mit etwa 100 Kilogramm Stickstoff gedüngt.³¹⁶

³¹³ Banwart 2011.

³¹⁴ Rockström et al. 2009.

³¹⁵ Hier kommt Stickstoff in der Regel molekular als N_2 vor.

³¹⁶ BMEL 2013; FAO 2012.

Weltweit werden zurzeit jährlich etwa 110 Millionen Tonnen Stickstoff über chemisch hergestellte Stickstoffdünger (Haber-Bosch-Verfahren) in den natürlichen Stickstoffkreislauf eingetragen. Hinzu kommen bis zu 20 Millionen Tonnen Stickoxide (NO_x) aus der Luft, die aus Verbrennungsprozessen stammen. Diese anthropogenen Stickstoffeinträge übersteigen inzwischen mengenmäßig die biologische Stickstoff-Fixierung durch Mikroorganismen (circa 40 Millionen Tonnen Stickstoff pro Jahr)³¹⁷. Der Stickstoffkreislauf wird, mit noch nicht absehbaren Folgen, über die Düngung daher noch stärker beeinflusst als der Kohlenstoffkreislauf durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen.

Die Düngemittelproduktion mittels Haber-Bosch-Verfahren hat sich in den vergangenen 50 Jahren um mehr als 800 Prozent erhöht. Das Haber-Bosch-Verfahren ist ein sehr energieintensiver Prozess. Trotz gesteigerter Verfahrenseffizienz entfallen auf ihn etwas mehr als ein Prozent des globalen Primärenergieverbrauchs. Aufgrund der Möglichkeit, Stickstoffdünger chemisch herzustellen, ist hier generell keine Rohstoffknappheit zu befürchten. Vielmehr sind die Auswirkungen auf die Umwelt durch Herstellung und Einsatz, also in Form von Treibhausgasemissionen und der Beeinflussung des Stickstoffkreislaufs, zukünftig mögliche limitierende Aspekte.

Phosphatdünger

Auch Phosphat ist wichtiger Bestandteil der Pflanzen. Es kommt in den Nukleinsäuren des Erbguts und in vielen anderen Molekülen des Stoffwechsels vor, unter anderem im Adenosintriphosphat-Molekül (ATP), das als Energielieferant vieler Stoffwechselprozesse fungiert. Zwar sind im Boden häufig genügend Phosphate vorhanden, doch können Pflanzen diese nicht immer direkt verwerten, weil sie als unlösliche

Phosphate auftreten, die durch Pflanzen nur langsam mobilisiert werden können. Bestimmte Mikroben (Mykorrhiza) aber interagieren mit den Pflanzenwurzeln und erleichtern die Phosphataufnahme. Sie können organische Säuren (zum Beispiel Zitronensäure) ausscheiden, wodurch der Mobilisierungsprozess beschleunigt wird. Dadurch wird das Pflanzenwachstum gefördert. Um hohe Erträge zu erzielen, ist allerdings meist eine zusätzliche Düngung mit Phosphaten erforderlich. Ein Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche wurde in Deutschland 2010 durchschnittlich mit etwa 14 Kilogramm Phosphat³¹⁸ pro Jahr gedüngt (ohne Jauche). Weltweit werden jährlich etwa 44 Millionen Tonnen Phosphat auf die Felder gebracht, von denen etwa 80 Prozent Verbindungen eingehen, die für Pflanzen nicht oder nur langsam erreichbar sind. Etwa 3,7 Millionen Tonnen Phosphat werden zusätzlich in der tierischen Ernährung und vier Millionen Tonnen in industriellen Anwendungen genutzt.³¹⁹ Geschätzte drei Millionen Tonnen Phosphat fließen über die Kanalisation in die Meere.

Die deutsche Landwirtschaft verbraucht zurzeit ungefähr 650.000 Tonnen Phosphat pro Jahr. Ungefähr die Hälfte dieser Menge muss importiert werden. Nahezu 300.000 Tonnen dieses Bedarfs kann durch Jauche (Gülle und Dung) gedeckt werden. Zusätzlich können erhebliche Phosphatmengen aus den städtischen und industriellen Klärwerken extrahiert werden. Bislang aber wird Klärschlamm verbrannt. Dabei entstehen unlösliche Phosphorverbindungen, deren Rückgewinnung und Umwandlung in für Pflanzen nutzbare Phosphate zusätzliche Energie erfordert.

Darüber hinaus sind industrielle und städtische Abfälle normalerweise mit Schwermetallen verseucht und deren

317 Rockström et al. 2009.

318 Berechnung in der Verbindung P_2O_5 .

319 BMEL 2013; FAO 2012.

Gebrauch als Düngemittel in Wäldern und auf landwirtschaftlichen Flächen generell verboten, es sei denn, die kontaminierenden Schwermetalle werden entfernt. Das ist zwar heutzutage technisch möglich, aber mit zusätzlichen Energiekosten verbunden.

Wenn landwirtschaftliche Nutzpflanzen zur Erzeugung von Biogas eingesetzt werden, kann der Phosphatgehalt der Biomasse vollständig wiederverwertet werden, indem die Fermentationsrückstände für die Düngung verwendet werden. Denn bei der mikrobiellen Erzeugung von Biogas reichert sich das Phosphat in den Mikroorganismen an. Das in den Fermentationsrückständen vorhandene Phosphat ist für Kulturpflanzen biologisch weitgehend verfügbar. Obwohl die weltweiten Phosphatvorkommen endlich sind, dürften Phosphate in absehbarer Zeit kein limitierender Faktor der Landwirtschaft sein, da das Verhältnis von Reserven zu Bergwerksproduktion nach aktuellen Schätzungen bei etwa 300 Jahren³²⁰ liegt. Dieser Frühwarnindikator zeigt derzeit daher keine Versorgungsknappheit für Phosphat an (vergleiche Kapitel 3.1 und 5.4.2).³²¹

Kaliumdünger

Kalium ist ein wichtiger Bestandteil aller lebenden Zellen, so auch von Pflanzen, in denen es in hohen Konzentrationen vorkommt und unter anderem für die Aufrechterhaltung des Osmotischen Drucks (Turgor) in den Pflanzengefäßen und insbesondere den Blättern benötigt wird. Ein Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche wurde in Deutschland 2010 durchschnittlich mit etwa 22 Kilogramm Kalium³²² gedüngt. Weltweit werden jährlich etwa 30 Millionen Tonnen Kali (als K_2O berechnet) auf die Felder gebracht. Kaliumsalze sind meist leicht löslich und

werden durch Regen aus den Böden ausgewaschen, weshalb mit Kaliumsalzen regelmäßig nachgedüngt werden muss, um gutes Pflanzenwachstum zu erhalten.³²³

Die weltweit bekannten geologischen Lagerstätten enthalten nach heutigem Kenntnisstand schätzungsweise 210 Milliarden Tonnen K_2O . Davon sind bis zu 16 Milliarden Tonnen K_2O mit dem aktuellen Stand der Technik gewinnbar. Im Meerwasser gibt es fast unbegrenzt Kalium, das nach Aufkonzentration durch Wasserverdunstung als K_2O gewonnen werden kann. Hierfür sind das Tote Meer in Israel und Jordanien sowie der Qarhan-See in China Beispiele. Eine Ressourcenknappheit ist daher im Falle von Kalium nicht zu befürchten.

4.3.7 Ökonomische Aspekte der Biomassenutzung

Für die Aufzucht und die Ernte von Biomasse ist selbstverständlich ein gewisser Energieeinsatz (Energie-Input), erforderlich, der gegen die nutzbare Energiemenge (Energie-Output) aufgewogen werden muss. Im Falle von Brennholz beträgt der Energy Return of Investment (EROI, Energie-Output geteilt durch Energie-Input) etwa zehn, im Fall von Bioethanol aus Mais (USA) oder von Elektrizität über Biogas aus Mais aber nur etwa 1,5.³²⁴

Im Vergleich zu anderen Energietechnologien, wie beispielsweise Photovoltaik und Windkraftanlagen, besitzt die Bioenergie mit meist weniger als 0,5 Watt pro Quadratmeter nur eine geringe Flächeneffizienz. In Deutschland liegt die Leistungsdichte von Photovoltaik-Modulen in der Regel über fünf Watt pro Quadratmeter und die der Windkraftanlagen an Land zwischen zwei und drei Watt pro Quadratmeter (durchschnittliche Gesamtjahresleistung: 365 Tage à 24 Stunden). Diese höhere Effizienz drückt sich auch in

³²⁰ USGS 2015, Phosphatgestein S. 118ff.

³²¹ Scholz/Wellmer 2013.

³²² Angabe in Form von Kaliumoxid (K_2O) als Maßzahl für den Kaligehalt.

³²³ BMEL 2013; FAO 2012.

³²⁴ Leopoldina 2013, S. 22ff.

höheren EROI-Werten aus, die für Photovoltaik sieben und für Windkraftanlagen bis zu 18 betragen. Außerdem fallen nach der Installation von Photovoltaik-Zellen und Windkraftanlagen an Land kaum Wartungskosten an. Abgesehen von der Biomasse, die in nachhaltig bewirtschafteten Wäldern gewonnen wird, ist Bioenergie unter den von der Sonne stammenden Energien diejenige, die am wenigstens zur Reduzierung der Treibhausgase beiträgt und den höchsten finanziellen Preis pro Tonne eingespartes CO₂ aufweist.³²⁵ Im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien, wie Wind- und Solarenergie, weist Bioenergie eine geringere Flächeneffizienz aus. Das Potenzial an Bioenergie wird relativ zum Primärenergieverbrauch als klein eingeschätzt, wenn alle Nachhaltigkeitskriterien, die Konkurrenz „Tank-Teller“ und die Ernährungspräferenzen der Menschen berücksichtigt werden. Die Verwendung von Biomasse als Energiequelle sollte sich hauptsächlich auf Holz aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern und agrarische Abfälle begrenzen. Demnach ist der Einsatz von Bioenergie nur

dort sinnvoll, wo es dem Gesamtsystem den größten Nutzen bringt.

Der Vorteil einer vergleichsweise hohen Energiedichte von Bioenergie (Bioethanol, Biodiesel, Biogas) bietet in absehbarer Zeit die Möglichkeit, fossile Brennstoffe im Verkehr und vor allem im Lastverkehr (Lastkraftwagen, Lastschiffe) zu ersetzen.³²⁶ In dichtbesiedelten Regionen wie Deutschland ist im Verkehrssektor allerdings abzuwägen, ob sich durch Effizienzmaßnahmen bei der Nutzung fossiler Treibstoffe sowie durch eine verbesserte Nachfragesteuerung, wie zum Beispiel die Verringerung des Verkehrsaufkommens durch veränderte Raumordnungen oder den Ausbau des öffentlichen Personennahverkehrs sowie Geschwindigkeitsbegrenzungen, nicht mehr fossile Treibstoffe einsparen lassen, als sich Biotreibstoffe nachhaltig herstellen lassen.³²⁷ Ein wichtiger Vorteil von Bioenergie ist seine Speicherbarkeit. So kann Biogas in der Stromerzeugung zur Überbrückung längerer Windflauten oder als Regelenergie eingesetzt werden.

Versorgungssituation bei Biomasse

Der Anteil der Bioenergie am globalen Primärenergieverbrauch von derzeit zehn Prozent wird aufgrund einer wachsenden Weltbevölkerung und damit zunehmender Nutzungskonkurrenz wahrscheinlich eher geringer als größer werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn man den Biomassebedarf durch nachhaltige Produktion decken möchte.

Die in Deutschland produzierte Biomasse wird mengemäßig theoretisch fast vollständig für nicht-energetische Zwecke benötigt. Für die Energieerzeugung blieben eigentlich nur Biomasseabfälle übrig, wenn Deutschland seinen Biomassebedarf nicht durch zusätzliche Importe decken würde. Die Biomasseimporte führen direkt oder indirekt anderswo zur Verknappung von Biomasse für die Ernährung, zur Abholzung von Regenwäldern, zum Verlust von Biodiversität und/oder zur Bildung von Treibhausgasen.

³²⁵ OECD 2008.

³²⁶ Bley 2009.

³²⁷ Leopoldina 2013.

Die energetische Verwendung von Lignocellulose, zum Beispiel aus Holz und Gräsern, steht nicht in Konkurrenz zur direkten menschlichen Ernährung, daher wird hier oft ein größeres Potenzial für die energetische Nutzung gesehen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass Lignocellulose für die tierische Ernährung, als Regenerator für Böden sowie weitere Verwendungsmöglichkeiten benötigt wird.

Intensive Landwirtschaft inklusive dadurch bedingter Landnutzungsänderungen trägt weltweit mit etwa zwanzig Prozent zum Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre bei. Lediglich die Nutzung von Holz aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern ist weitgehend Treibhausgas-neutral. Bei intensiver Nutzung von Waldbiomasse entstehen allerdings ebenfalls Treibhausgase.

Intensive Landwirtschaft führt zudem zu Biodiversitätsverlusten, zu erhöhtem Wasserverbrauch, zu Gewässerkontaminationen durch überschüssige Nährstoffe sowie zu Boden Degradation. In einigen Regionen der Welt geht zurzeit der Boden hundert Mal schneller verloren, als er gebildet wird. In ariden Gebieten kann eine intensive Bewässerung nicht nur zum Verlust von Süßwasservorkommen führen, sondern auch eine Versalzung von Anbauflächen verursachen. Die energetische Nutzung von Biomasse aus intensiver Landwirtschaft ist daher nicht nachhaltig.

Derzeit gehen circa sechzig Prozent der Ernte weltweit durch Verluste in der Landwirtschaft und in den Lieferketten sowie durch Wegwerfen in Supermärkten und Haushalten verloren. Eine substantielle Reduktion dieser Verluste würde den Bedarf an Biomasse für die Ernährung verringern und die Umwelt entlasten.

Die drei für das Pflanzenwachstum essenziellen Düngemittel Stickstoff, Kalium oder Phosphat stehen derzeit ausreichend zur Verfügung. Eine übermäßige Düngung, wie er bei intensiver Landwirtschaft notwendig ist, greift jedoch wie beschrieben mit zum Teil noch nicht absehbaren Folgen in die globalen Stoffkreisläufe ein. Es gibt die These, dass global für Biodiversität, Phosphor- und Stickstoffkreislauf, Klimawandel und Landnutzung bereits die Nutzungsgrenzen, die sogenannten Planetary Boundaries, überschritten sind.

Phosphat ist der einzige nicht unbegrenzt gewinnbare Düngerohstoff. Daher ist für einen nachhaltigen Einsatz von Biomasse für die Energieversorgung wichtig, das in der Biomasse vorhandene Phosphat als Dünger für die Landwirtschaft zurück zu gewinnen. Dies ist in Biogasanlagen beispielsweise bereits der Fall.

Im Vergleich der erneuerbaren Energien weist Bioenergie die geringste Flächeneffizienz auf. Sie trägt weniger zur Reduzierung von Treibhausgasen bei als Wind- und Solarenergie, und die Kosten pro eingesparter Tonne CO₂ sind höher. Die teilweise hohe Energiedichte und die Speicherbarkeit von Bioenergie sind allerdings vorteilhaft für eine Nutzung im Bereich der Mobilität oder zur Überbrückung langer Zeiträume mit wenig Wind und Sonne.

5 Entwicklung des Rohstoffbedarfs des Energiesystems

Die Energiesysteme der Zukunft werden deutlich vielfältiger sein, als die Energietechnologien der Vergangenheit. Zu den zentralen Erzeugungstechnologien, wie zum Beispiel Kohle- und Erdgaskraftwerke, die das heutige Energiesystem dominieren, kommen zunehmend unterschiedlichste, zumeist dezentrale Technologien hinzu. Diese umfassen die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen, zum Beispiel durch Wind- und Photovoltaikanlagen, oder Speichertechnologien – beispielsweise verschiedene Batteriesysteme, Wasserstoffspeicher und Druckluftspeicher. Die Stromnetze müssen an die neue, dezentralere Struktur des Energiesystems angepasst werden. Hinzu kommen Technologien für die Erzeugung von chemischen Energieträgern aus Biomasse, wie Biogas oder Bioethanol, und aus erneuerbarem Strom (Power-to-Gas). Auch auf der Verbraucherseite ändert sich das Energiesystem: Elektrofahrzeuge, Lampen auf Basis von Leuchtdioden (LEDs) und neue Technologien in der Industrie, wie supraleitende Magnetheizverfahren zur Buntmetallverarbeitung, sind hier nur einige Beispiele.

Um den Rohstoffbedarf für den Umbau des Energiesystems einzuschätzen, müssen also sehr viele verschiedene Technologien betrachtet werden, und es müssen Annahmen darüber getroffen werden, in welchem Umfang die jeweiligen Technologien zukünftig zum Einsatz kommen. Mögliche Ausgestaltungen der Stromversorgung im Jahr 2050 wurden im Projekt „Energiesysteme der Zukunft“ durch eine Arbeitsgruppe untersucht.³²⁸ Dabei wurden erneuerbare und nicht-erneuerbare

Stromerzeugungstechnologien, verschiedene Speichertechnologien, Netzausbau und flexible Lasten (Demand-Side-Management) berücksichtigt. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass es viele verschiedene Möglichkeiten gibt, zu relativ ähnlichen Gesamtkosten die Stromversorgung zu gestalten. Dabei können auch politische und gesellschaftliche Faktoren, wie die Ablehnung von Carbon Capture and Storage (CCS)³²⁹, Bemühungen zur Verringerung der Abhängigkeit von Energieimporten oder eine Präferenz für kleine, dezentrale Anlagen eine Rolle spielen. Es ist also keineswegs gewiss, welche Technologien in Zukunft das System dominieren werden. In der Studie wird lediglich 2050 als das Zieljahr der Energiewende betrachtet, nicht jedoch der Transformationspfad dorthin. So bleibt unklar, wann und in welcher Form in den verschiedenen untersuchten Szenarien welche neuen Anlagen errichtet werden müssten. Dieses Wissen wäre aber erforderlich, um zu beurteilen, wie sich der Rohstoffbedarf entwickeln könnte. Basierend auf der Studie sind daher keine Aussagen darüber möglich, mit welcher Geschwindigkeit sich die Rohstoffanforderungen ändern werden. Das bedeutet auch, dass keine zeitlichen Abschätzungen über unter Umständen eintretende Rohstoffknappheiten für die untersuchten Szenarien möglich sind.

In jüngerer Zeit sind jedoch verschiedene Studien durchgeführt worden, die sich mit dem Rohstoffbedarf von

³²⁸ Elsner et al. 2015.

³²⁹ Darunter versteht man die technische Abtrennung und Speicherung von CO₂, beispielsweise aus Kraftwerksemissionen auf Basis fossiler Energieträger wie Kohle oder Erdgas. In Ketzin, nahe Berlin, gibt es eine wissenschaftliche Pilotanlage, in der das Verfahren untersucht wird.

zukünftigen Energiesystemen beschäftigen. Die wichtigsten beziehungsweise aktuellsten Arbeiten sind die Studien des US Department of Energy (DOE) aus dem Jahr 2010/2011³³⁰, des Instituts für Energie und Transport (JRC-IET) der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2013³³¹ und die KRESSE-Studie des Wuppertal Instituts aus dem Jahr 2014³³². Die Ergebnisse dieser Studien werden im Folgenden diskutiert.

Vergleicht man die Studien, wird deutlich, dass es insgesamt 45 Technologien gibt, die von einer oder mehreren Institutionen als relevant betrachtet werden. Diese sind im Anhang 1 in Tabelle A1.1 aufgelistet. Die thematischen Schwerpunkte liegen hier auf den regenerativen Erzeugungstechnologien, Speichertechnologien, auf der Elektromobilität und der Energieträgergewinnung. Die Bereiche Energiemanagement und Entsorgungswirtschaft wurden hingegen außer Acht gelassen. Diese sind für den Rohstoffbedarf des Energiesystems kaum relevant, da möglicherweise kritische Rohstoffe – wenn überhaupt – in diesen Sektoren nicht in nennenswertem Umfang benötigt werden.

Die JRC-IET-Studie und die Studie des Wuppertal Instituts gehen von einer politischen Zielvorgabe aus. Diese besteht darin, den EU-Energiesektor von fossilen Brennstoffen unabhängig zu machen (Dekarbonisierung) und das deutsche Energieversorgungssystem zu transformieren. Daraus werden dann Schlussfolgerungen hinsichtlich kritischer Rohstoffe abgeleitet. Die Studie des US Department of Energy geht den umgekehrten Weg. Aufbauend auf der Studie des US National Research Council über kritische Rohstoffe für die Wirtschaft der USA³³³, fragt die

DOE-Studie, welche Sektoren der amerikanischen Energiewirtschaft von 16 Schlüsselementen betroffen sind, die vom NRC definiert wurden. Dies sind die acht Seltene-Erden-Elemente Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Samarium, Europium, Terbium und Dysprosium sowie Yttrium, Lithium, Mangan, Kobalt, Nickel, Gallium, Indium und Tellur. Diese Elemente wurden anschließend auf ihre rohstoffkritische Relevanz hin untersucht. So wurde zum Beispiel die Seltene-Erden-Situation bei Katalysatoren in Erdölraffinerien sehr genau analysiert.

Für die Einschätzung der Kritikalität muss der Rohstoffbedarf im Verhältnis zum Angebot betrachtet werden. Auch hierbei gehen die Studien unterschiedliche Wege: Die JRC-IET-Studie³³⁴ vergleicht das zu erwartende Rohstoffangebot im Zeitraum 2020 bis 2030 mit der Rohstoffmenge, die benötigt wird, wenn die EU-Staaten verstärkt auf nicht-fossile Energieerzeugung setzen (Dekarbonisierungspfad; Abbildung 5.1). Die KRESSE-Studie³³⁵, beziehungsweise die darauf folgende und in ihren Kriterien leicht modifizierte Publikation des Wuppertal Instituts³³⁶, nehmen hingegen als Berechnungsgrundlage nicht das in Zukunft zu erwartende Rohstoffangebot, sondern die heute bekannten Reserven.

Die Studien von JRC-IET und dem Wuppertal Institut zeigen, dass für unterschiedliche Technologien verschiedene potenziell kritische Rohstoffe benötigt werden. Die Tabellen A2.1 bis A2.5 (siehe Anhang 2) zeigen beispielhaft, wie viel der jeweiligen Rohstoffe für Schlüsseltechnologien der Energiesysteme der Zukunft wie etwa Photovoltaikanlagen, Brennstoffzellen, Elektrofahrzeuge und Batteriesysteme benötigt wird. Zu bedenken ist aber, dass es für die Versorgung

330 DOE 2010; DOE 2011-1.

331 Moss et al. 2013.

332 Wuppertal Institut 2014.

333 NRC 2008.

334 Moss et al. 2013.

335 Wuppertal Institut 2014.

336 Viebahn et al. 2015.

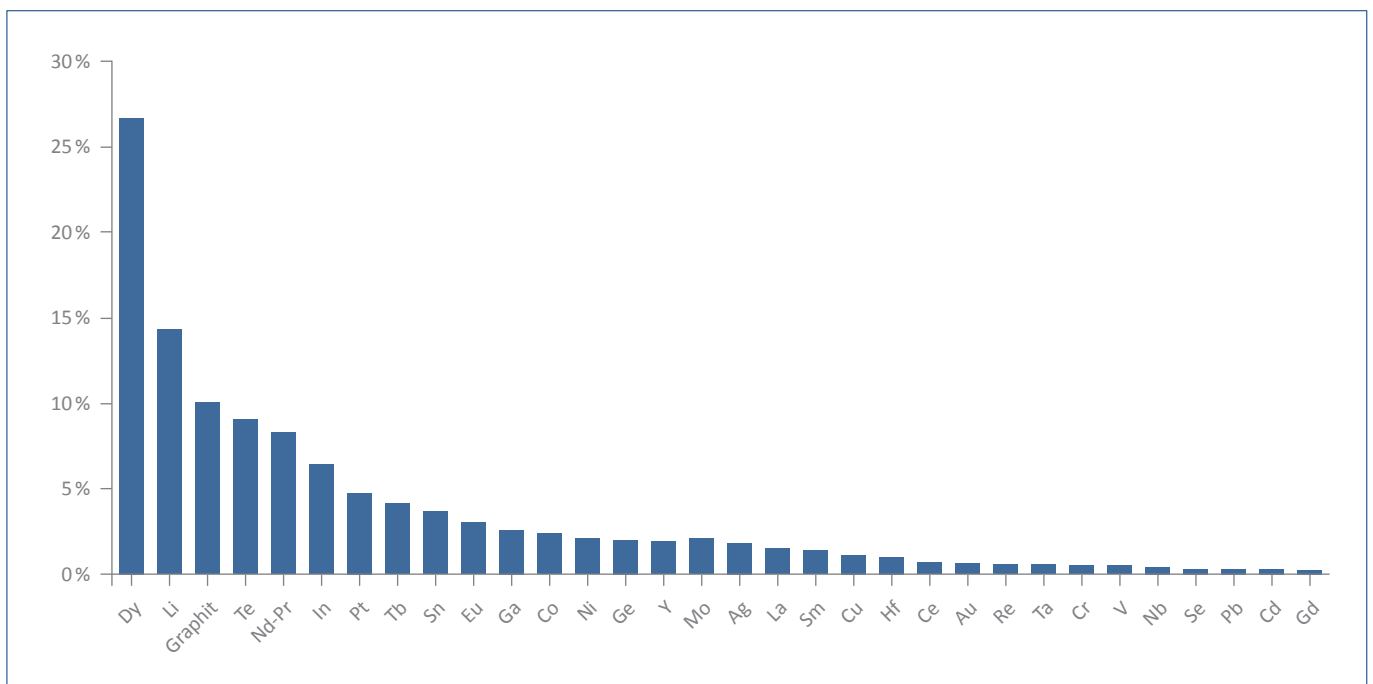


Abbildung 5.1: Am globalen Angebot gemessener durchschnittlich zu erwartender Bedarf der EU an 32 für regenerative Energietechnologien wichtigen Hightech-Metallen im Zeitraum 2020 – 2030³³⁷

der Energiesysteme der Zukunft nicht nur auf die spezifischen Rohstoffmengen ankommt, die für eine bestimmte Anwendung benötigt werden, sondern vielmehr darauf, wie groß die absoluten Mengen eines Rohstoffs im Verhältnis zu seinem Gesamtverbrauch sind. Es muss also auch bekannt sein, in welchem Umfang die verschiedenen Technologien installiert werden.

5.1 Nachfragekonkurrenzen bei kritischen Rohstoffen für Energietechnologien

Wie beschrieben, gibt es kaum Elemente, die ausschließlich nur für ein Hightech-Gebiet verwendet werden. In der Regel gibt es Nutzungskonkurrenzen zwischen verschiedenen Technologien, was auch die zukünftigen Energiesysteme betrifft. Daher ist es wichtig zu erkennen, welchen Stellenwert der Rohstoffbedarf für die Energiesysteme der Zukunft gegenüber anderen Sektoren der Volkswirtschaft und dem Gesamtrohstoffbedarf hat.

Um sich der Frage der Kritikalität eines Rohstoffes, bezogen auf ein zukünftiges Energiesystem, zu nähern, identifiziert das Wuppertal Institut zunächst kritische Rohstoffe anhand des Abgleichs von Analysen. Anschließend werden diese kritischen Rohstoffe mit deren Einsatz in zukünftig wichtigen Energietechnologien und deren potenziellen Entwicklungsmöglichkeiten (auf Basis von ausgewählten Energieszenarien) bis zum Jahr 2050 korreliert. Der so entlang möglicher Technologieentwicklungspfade definierte Bedarf für einen Rohstoff wird schließlich in Bezug zu den heutigen Marktverhältnissen gesetzt. Dabei wird Deutschland auf Basis einer globalen Verteilungsgerechtigkeit ein Rohstoffanspruch im Verhältnis zu seinem Anteil an der Weltbevölkerung zugedacht. Dies entspricht etwa einem Prozent. Das Wuppertal Institut leitet daraus eine „Ein-Prozent-Regel“ für den Anteil Deutschlands an der Weltproduktion und den zurzeit bekannten globalen Rohstoffreserven ab. Weiter wird davon ausgegangen, dass sich die Rohstoffnachfrage in dem berücksichtigten Zeitraum von 2011 bis 2050 bei den meisten Rohstoffen problemlos decken lässt.

³³⁷ Moss et al. 2013, S. 11.

Die hinter der Analyse des Wuppertal Instituts stehenden Überlegungen und Kriterien, die sich sowohl auf die Produktion als auch auf die Reserven beziehen, können wie folgt zusammengefasst werden: Die Klassifizierung potenziell kritischer Rohstoffe hängt nicht nur von der Abschätzung des Rohstoffbedarfs in dieser Zeit ab, sondern auch von den Produktionszuwächsen bei der Rohstoffgewinnung und der Dynamik der Rohstoffreserven. Die Entwicklungen dieser Größen sind für den Betrachtungszeitraum von 2011 bis zum Jahr 2050, also von etwa 40 Jahren, mit großen Unsicherheiten behaftet. Um eine unsichere Zahl nicht mit zwei anderen unsicheren Zahlen zu vergleichen, wird somit als Filtermethode alles auf die bekannten Reserven von heute und die heutige Förderung bezogen:

Stufe 1: Es wird zunächst gefragt, ob der über 40 Jahre hochgerechnete Bedarf für einen Rohstoff 40 Prozent der heutigen Weltjahresproduktion übersteigt. Dabei ergibt sich die Vergleichszahl von 40 Prozent aus dem Produkt des deutschen Anteils von einem Prozent und der betrachteten Zeitspanne von 40 Jahren.

Stufe 2: Es wird angenommen, dass zehn Prozent der globalen Reserven für erneuerbare Energie zur Verfügung stehen. Wird dies auf das Ein-Prozent-Konzept übertragen, heißt das, dass 0,1 Prozent der globalen Reserven für Deutschland für die nächsten 40 Jahre für erneuerbare Technologien zur Verfügung stehen sollten. In einer Sensitivitätsanalyse wird auch die Zahl 50 Prozent für erneuerbare Energien, also 0,5 Prozent für Deutschland, in die Prüfung miteinbezogen.

Die Prüfung der Kriterien durch das Wuppertal Institut erfolgt in der Regel konsequent. Wenn ein Element die erste Prüfstufe nicht passiert, erfolgt eine eingehende Prüfung in der zweiten Stufe. Die Ergebnisse der Untersuchungen auf Basis der zweiten Prüfstufe sind in Tabelle 5.1. zusammengefasst.

Dass einige Elemente trotz der insgesamt positiven Einschätzung der künftigen Rohstoffversorgung kritisch werden könnten, lässt sich an Nickel verdeutlichen. Nickel wird heute unter anderem für die Stromspeicherung in Akkumulatoren und Batterien benötigt, vor allem aber als wichtiges Legierungselement für Stahl. Bis 2050 dürfte Nickel aber auch für die Nickel-Elektroden von Elektrolyse-Anlagen immer wichtiger werden. In diesen Anlagen soll künftig mithilfe des Stroms Wasserstoff erzeugt werden, der dann als Energieträger gespeichert werden kann. Der Bedarf an Energiespeichern hängt von verschiedenen Faktoren, wie zum Beispiel der Art und dem Umfang der fluktuierenden Stromerzeugung, ab. Gemäß den Annahmen für ein Szenario mit maximalem Speichereinsatz wird bis 2050 ein kumulierter Nickel-Gesamtbedarf von 176.000 Tonnen für Deutschland erwartet. Dies entspricht neun Prozent der Jahresproduktion von 2011 und 0,23 Prozent der globalen Reserven. Obwohl das erste Kriterium (Anteil an der Weltproduktion von weniger als 40 Prozent) erfüllt ist, wurde das Reserven-Kriterium dennoch überprüft. Bezogen auf die globalen Reserven ist der oben definierte Schwellenwert von 0,1 Prozent überschritten. Somit wird Nickel als kritisch beurteilt.³³⁸ Ergänzend sollte man hierbei berücksichtigen, dass es noch weitere energierelevante Anwendungen, wie beispielsweise die Akkumulatoren gibt, bei denen Nickel auch eine Rolle spielt. Diese sind aber in dem berechneten Nickelbedarf dieses Speicherszenarios nicht berücksichtigt (siehe Tabellen A2.3, A2.5). Allerdings erhöht sich dadurch die rohstoffkritische Relevanz von Nickel noch weiter.

Die vom Wuppertal Institut definierten Schwellenwerte erscheinen sehr gering, sind aber richtig, wenn man da-

³³⁸ Wuppertal Institut 2014, S. 224f. (ergänzend: S. 98, 200f.).

Sektor der erneuerbaren Energien	Rohstoff	Anteil an gegenwärtig ausgewiesenen Reserven je nach Szenario [%]	Kritikalität anhand „1-„Prozent-Regel“	Kritisch/unkritisch?
Windkraft	Neodymium	0,005 - 0,094		unkritisch
	Dysprosium	0,02 - 0,5		unkritisch? ³³⁹
Photovoltaik	Indium	0,2 - 1,2 bis 1,7 - 8,6	kritisch	kritisch
	Gallium	0,00014 - 0,0009 bis 0,0016 - 0,009		unkritisch
	Selen	0,013 - 0,07 bis 0,12 - 0,66	unsicher	kritisch?
Stromspeicherung	Lithium	0,024 - 0,48		unkritisch im Vergleich zur Nachfrage aus anderen Bereichen
	Vanadium	0,58 - 1,16		kritisch
	Nickel	0,23		kritisch
	Kalium	0,00047		unkritisch
	Lanthan und Yttrium	0,07 - 0,08		unkritisch

Tabelle 5.1: Kritikalitätsbewertung einzelner Rohstoffe, untergliedert nach ihrem technologischen Einsatz bei erneuerbaren Energien.³⁴⁰ Die Werte in der dritten Spalte beziehen sich auf den Bedarf für den Umbau des Energiesystems in Deutschland bis 2050.

von ausgehen will, dass die Deckung ohne Störung des Marktgleichgewichtes stattfinden soll, die den Regelkreis der Rohstoffversorgung in Gang setzt. Schon geringe zusätzliche Nachfragemengen – oft wenige Prozent – haben große Preisausschläge in den Rohstoffmärkten zur Folge.³⁴¹ Der Studie des Wuppertal Instituts liegt also ein konservativerer Ansatz zugrunde. Nimmt man hingegen kurzzeitige Preisausschläge in Kauf, so ist es nicht unbedingt problematisch, wenn für neue Technologien überproportional große Rohstoffmengen benötigt werden. Dies würde dann eine Veränderung und Neuregulierung des Rohstoffmarktes bewirken – die Reserven würden entsprechend der Dynamik des Systems mit der Produktion mitwachsen.

5.2 Reaktionsfähigkeit des globalen Rohstoffsystems

Im Hinblick auf den Rohstoffbedarf der Energiesysteme der Zukunft ist es wichtig zu erkennen, welche Rohstoffe kritisch werden könnten. Es muss aber auch beachtet werden, wie schnell das Weltrohstoffsystem auf neue Rohstoffanforderungen reagieren kann, die sich durch den Umbau des Energiesystems ergeben. In diesem Zusammenhang meint der Begriff „Weltrohstoffsystem“ im Sinne des Regelkreises der Rohstoffversorgung (siehe Kapitel 2.4) sowohl die Angebots- als auch die Nachfrageseite. Wie sich in der Vergangenheit gezeigt hat, waren Preispeaks nur von kurzer Dauer. Das ist ein Indiz dafür, dass das Weltrohstoffsystem bisher relativ schnell auf Preisreize reagieren konnte. Die folgenden beiden Beispiele verdeutlichen das:

1. Mit mehr als 95 Prozent der Weltbergwerksproduktion ist China der dominierende Versorger bei den Seltenen-Erden-Elementen. Diese starke Position nutzte das Land in der Vergangenheit mehrfach aus. So kürzte

³³⁹ Die angegebenen Zahlenwerte des Wuppertal Instituts ergeben sich entsprechend den Szenarien und geben die Bandbreite wieder; wir haben dies mit „?“ quotiert, da diese Rubrik vom Wuppertal Instituts als unkritisch eingestuft wird, obwohl der obere Wert mit 0,5 Prozent über dem kritischen Niveau von 0,1 Prozent liegt.

³⁴⁰ Wuppertal Institut 2014, S. 205ff.

³⁴¹ Am Beispiel von Schwefel ist dies etwa dargestellt in Kesler 1994, S. 106.

China seine Exportquoten 2009 um 12 Prozent und 2010 um 40 Prozent. Die Seltene-Erden-Preise schnellten daraufhin in die Höhe, im Extremfall sogar um den Faktor 100 beim Dysprosium³⁴². Ein Grund dafür waren vor allem auch Preisspekulationen, die in einer derartigen Nachfragesituation immer einsetzen. Da China der bei weitem größte Lieferant ist, bedeuten diese reduzierten Exportquoten praktisch einen ungedeckten Bedarf außerhalb von China von 15 bis 20 Prozent.³⁴³ Letztlich dauerte es zwei Jahre, bis sich die Situation in etwa normalisiert hatte (Abbildung 5.2). Diese Normalisierung ist darauf zurückzuführen, dass die Nachfrage tatsächlich nicht so hoch war, wie von den Spekulanten vorhergesehen. Zur Preisberuhigung trug auch bei, dass Seltene-Erden-Elemente bei bestimmten Technologien substituiert werden konnten. Zudem entwickelten sich außerhalb Chinas neue Bergbauproduktionen, die trotz ihres vergleichsweise kleinen Umfangs zur Deckung des Bedarfs beitrug. Mitt-

lerweile ist allerdings eine dieser Gruben wieder stillgelegt worden.

2. In China hat in den vergangenen Jahrzehnten eine rasante Industrialisierung stattgefunden. In der Folge hat auch die dortige Rohstoffnachfrage enorm zugenommen, sodass China inzwischen bei allen wesentlichen Rohstoffen außer Erdöl und Erdgas der weltgrößte Rohstoffverbraucher ist. Bereits 2003 kam es aufgrund der starken Rohstoffnachfrage in China zu einem weltweiten Rohstoffpreissboom. Die Bergbauindustrie reagierte darauf, indem sie Förderkapazitäten ausbaute – nicht zuletzt bei Eisen und Aluminium, jenen Metallen, von denen weltweit die größten Mengen verarbeitet werden. Beim Eisenerz wurde die Förderung von 2001 bis 2011 um den Faktor 3,2 gesteigert, beim Bauxit, dem Aluminiumerz, um den Faktor 1,8. Die im Folgenden behandelten möglichen kritischen Rohstoffe stellen im Vergleich zu Eisenerz und Bauxit mengenmäßig Nischenprodukte dar.

Konkurrierender Bedarf bei kritischen Rohstoffen für Energietechnologien

Die Kritikalität eines Rohstoffes hinsichtlich der Versorgungssicherheit ergibt sich aus dem Verhältnis von Rohstoffbedarf und Rohstoffangebot. Dieses Verhältnis kann sich ständig ändern, sodass Studien zur Versorgungssicherheit von Rohstoffen nur Momentaufnahmen sein können.

Die Einschätzung, dass ein Rohstoff kritisch ist beziehungsweise werden könnte, kann zu vorsorgenden Maßnahmen führen, sodass Störungen des Marktgleichgewichtes, die zu Preispeaks führen und die Mechanismen des Regelkreises der Rohstoffversorgung aktivieren und so wieder zu einem neuen Marktgleichgewicht führen, nicht auftreten. Ein prognostiziertes Versorgungsrisiko muss daher nicht eintreten. Möchte man also Ungleichgewichte und somit das Auftreten von Preispeaks im Markt vermeiden, sind gute Analysen und zusätzliche vorsorgende Maßnahmen zur Sicherung der Versorgung erforderlich.

³⁴² BGR 2014-1.

³⁴³ Kingsnorth 2014.

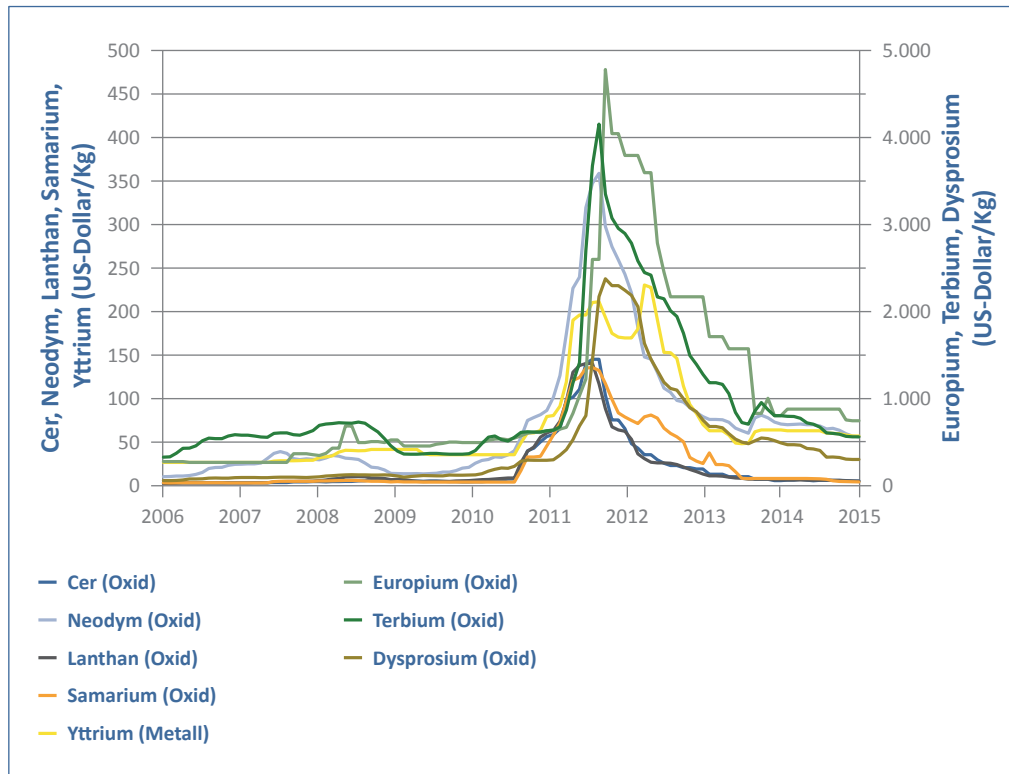


Abbildung 5.2: Preisentwicklung der Seltene-Erden-Elemente im Zeitraum von 2006 bis 2014.³⁴⁴ Die Kurven verdeutlichen die „Preisexplosion“, die durch eine Verringerung der chinesischen Exportquoten und die steigende Rohstoffnachfrage Chinas ab 2009 ausgelöst wurde. Mit Nachlassen des Hypes sind die Preise wieder gesunken.

Das Weltrohstoffsystem ist höchst flexibel und kann relativ schnell auf plötzliche Nachfrageänderungen reagieren, wenn es möglich ist, bestehende Kapazitäten auszuweiten, und damit die langen Vorlaufzeiten für neue Bergbauprojekte vermieden werden können. Für das Rohstoffangebot sind daher generell keine langanhaltenden Engpässe zu befürchten. Auslöser für kurz- bis mittelfristige Engpässe auf der Angebotsseite können ein Mangel an Fachkräften (Ingenieuren) und Ausrüstungsgegenständen, langwierige Genehmigungsverfahren sowie verzögerte oder unterbliebene Investitionen in Zeiten eines Angebotsüberhangs sein, nach dem Motto: „Der Überfluss von heute ist immer der Mangel von morgen.“ Preisausschläge sind ein wesentliches Element, um den Mechanismus des Regelkreises der Rohstoffversorgung in Gang zu setzen. Entsprechend gibt es auch Anpassungsmechanismen auf der Nachfrageseite.

5.3 Kritische Ressourcen für die Energiewende

5.3.1 Rohstoff-Kritikalitätsstudien: Metastudien im Vergleich

In den letzten Jahren sind drei Metastudien erschienen, in denen eine große Zahl von Kritikalitätsstudien miteinander verglichen wird. Im Einzelnen sind dies die Untersuchung von sieben Kritikalitätsstudien durch Erdmann und Graedel³⁴⁵, die KRESSE-Studie des Wuppertal Instituts³⁴⁶, die zwölf Kritikalitätsstudien miteinander vergleicht, und die Studie des UKERC³⁴⁷, in der elf Studien verglichen werden.

Alle drei Metastudien verwenden ein Ranking der Kritikalität (Tabelle 5.2). Zudem berücksichtigen alle die Studie

³⁴⁴ Auf Basis BGR 2014-1.

³⁴⁵ Erdmann/Graedel 2011.

³⁴⁶ Wuppertal Institut 2014.

³⁴⁷ UKERC 2013.

des National Research Council³⁴⁸ über kritische Rohstoffe in der US-Wirtschaft sowie die EU-Studie aus dem Jahr 2010 für die EU-14-kritischen Rohstoffe³⁴⁹. Die von Erdmann und Graedel ausgewählten Studien betrachten jeweils die generelle wirtschaftliche Bedeutung von Rohstoffen in der EU, in Deutschland, Großbritannien, Japan, Korea und den USA sowie im Bundesland Bayern. Sie umfassen die Jahre 2008 bis 2010. Die KRESSE-Studie des Wuppertal Instituts betrachtet Studien für Deutschland, die USA und die EU, die relevant für die Transformation des deutschen Energieversorgungssystems sind. Diese Studien stammen aus den Jahren 2007 bis 2012. Die Metaanalyse des UKERC schließlich betrachtet Studien aus den Jahren 2007 bis 2011. Dies sind die US-amerikanischen NRC- und DOE-Studien³⁵⁰, EU-Studien sowie insbesondere Studien, die relevant für das Vereinigte Königreich (UK) sind. Das UKERC führt einen Normierungsprozess durch, der die Anzahl der berücksichtigten Studien schließlich eingrenzt. Anhand dieses normierten Vergleichs werden neun Rohstoffe als besonders kritisch für zukünftige erneuerbare Energietechnologien erachtet.

Nicht berücksichtigt wurden bei den drei Metaanalysen unter anderem die Studie des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) und adelphi³⁵¹, die Germanium, Rhenium und Antimon als kritischste Rohstoffe für Deutschland einschätzen. Bei dieser Studie werden nicht nur Rohstoffe betrachtet, die für die Energiesysteme relevant sind, sondern auch solche, die für die gesamte deutsche Volkswirtschaft wichtig sind. Unberücksichtigt bleiben in den drei Metaanalysen auch Studien³⁵², die

Handlungsempfehlungen für Forschung und Entwicklung geben, ohne dass sie vorher eine eigene Liste kritischer Rohstoffe erarbeitet haben. Dies ist aber für einen Vergleich unterschiedlicher Kritikalitätsbewertungen eine notwendige Voraussetzung. Die Resnick-Studie baut zum Beispiel auf den vom US Department of Energy³⁵³ definierten kritischen Rohstoffen auf.

Die KRESSE-Studie des Wuppertal Instituts wiederum berücksichtigt als einzige der drei Metaanalysen eine Studie der Universität Augsburg³⁵⁴, die für jeden Rohstoff eine Reihe von „Nachhaltigkeitsfaktoren“ angibt. Untersucht wurden dafür die Aspekte Reserven, Handel, Umweltauswirkungen, Aufbereitung und Verhüttung, Substituierbarkeit, Rezyklierbarkeit. Eine Gesamteinstufung der Rohstoffe nimmt sie aber nicht vor und ist daher mit anderen Kritikalitätsstudien nicht vergleichbar.

Kritikalitätseinschätzungen

In den von Erdmann und Graedel³⁵⁵ betrachteten sieben Studien (Tabelle 5.2, Abbildung A2.1) sind vor allem die am häufigsten gebrauchten Seltene-Erden-Elemente und auch die Platingruppenelemente kritisch. Auch das Elektronikmetall Indium, der Stahlveredler Niob und das Refraktärmetall Wolfram werden als kritisch eingestuft. In den zwölf von der KRESSE-Studie³⁵⁶ betrachteten Studien (Tabelle 5.2, Abbildung A2.2) werden die Seltene-Erden-Elemente einzeln untersucht. Hier wird Neodym im Hinblick auf Magnete in Windkraftanlagen bei

348 NRC 2008.

349 EC 2010.

350 NRC 2008; DOE 2010.

351 Erdmann et al. 2011.

352 Resnick Institute 2011; Fraunhofer ISI 2010; APS/MRS 2011.

353 DOE 2010.

354 Achzet et al. 2011.

355 Erdmann/Graedel 2011.

356 Wuppertal Institut 2014.

357 Nach Wuppertal Institut 2014; Moss et al. 2013; Achzet et al. 2011.

358 Erdmann/Graedel 2011.

359 Wuppertal Institut 2014.

360 UKERC 2013.

Studie	Erdmann/Graedel 2011		Wuppertal Institut 2014		UKERC 2013	
	gesamte Wirtschaft		Energiesysteme		Energiesysteme	
Kritikalitätsranking	0 bis 4	Quote	1 bis 7	Quote	0 bis 10	Quote
Niob	4	5/7	(2)	1-2/12	(nicht betrachtet)	
alle Platinmetalle (nicht einzeln unterschieden)	(s. u. 4-3)		(2-3)		6,7	2/11
Ruthenium	4	2/2	(2)	1-2/12	(nicht betrachtet)	
Rhodium ⁵	4	2/2	(2)	1-2/12	(nicht betrachtet)	
Platin ⁵	4	6/7	(3)	3-4/12	(nicht betrachtet)	
Wolfram ^{3,4}	4	5/6	(2)	1-2/12	(nicht betrachtet)	
Indium ^{2,4}	4	5/7	6	9-10/12	6	8/11
alle Seltene-Erden-Elemente (nicht einzeln unterschieden) ^{1,3,4,5}	4		(getrennt betrachtet)		7	5/11
Scandium ²	4	3/3	(3)	3-4/12	(nicht betrachtet)	
Yttrium ^{1,4}	4	5/5	(4)	5-6/12	(nicht betrachtet)	
Neodym ³	(s. o. SEE)	6/6	7	>10/12	(nicht betrachtet)	
Dysprosium ³	(s. o. SEE)	4/4	6	9-10/12	(nicht betrachtet)	
Praseodym ³	(s. o. SEE)	3/3	5	7-8/12	(nicht betrachtet)	
Terbium ⁴	(s. o. SEE)	5/6	5	7-8/12	(nicht betrachtet)	
Tellur ^{2,4}	(2)	0/5	5	7-8/12	5	5/11
Silber ^{1,2,3,4}	(2)	1/4	(4)	5-6/12	4	5/11
Kobalt ^{1,3,5}	(3)	3/6	(4)	5-6/12	2,7	5/11
Gallium ^{2,4}	(3)	3/7	(4)	5-6/12	7	5/11
Germanium ²	(3)	3/6	(4)	5-6/12	5	4/11
Lithium ^{1,4}	(3)	3/6	(3)	3-4/12	4	3/11

Beispielhafte Anwendungsgebiete im Energiesektor³⁵⁶: ¹Batterien, ²Photovoltaik, ³Motoren/Generatoren/Turbinen, ⁴Elektrizitätsanwendung, ⁵Katalysatoren/Raffination

Tabelle 5.2: Vergleich der Metastudien von Erdmann und Graedel³⁵⁷, Wuppertal Institut³⁵⁸ und UKERC³⁵⁹. Die jeweiligen Ergebnisse sind im Detail in den Abbildungen A2.1 bis A2.3 dargestellt. Das Ranking der Rohstoffe in den Studien für die jeweils am kritischsten eingestuften Rohstoffe ist in Fettschrift angegeben. Um den Vergleich zwischen diesen Studien zu ermöglichen, ist die Position im Ranking der jeweils anderen Studien normal in Klammern angegeben. In der zweiten Zeile ist das Bezugssystem der jeweiligen Analyse angegeben. Die Skalen des jeweiligen Kritikalitätsrankings sind in der dritten Zeile der Tabelle angegeben. Die jeweils angegebene Quote bezieht sich auf die Anzahl der Nennungen als „kritischer“ Rohstoff in Bezug zur Gesamtzahl der jeweils untersuchten Einzelstudien beziehungsweise bei Erdmann und Graedel nur in Bezug zu der Anzahl der Studien, in denen ein Rohstoff tatsächlich untersucht wurde. Die Quote ist in den Metaanalysen unterschiedlich aufgeschlüsselt (die Studie des Wuppertal Instituts gibt nur Bandbreiten an) worden und abhängig von der Betrachtungsweise in den jeweils untersuchten Einzelstudien. Allein bei der Studie von Erdmann und Graedel ist ausgewertet worden, ob zum Beispiel bei den Platinmetallen oder Seltene-Erden-Elementen ein Rohstoff elementar oder als Bestandteil einer Rohstoffgruppe betrachtet wurde. Die Tabelle fasst die höchste Kategorie (höchste Gefährdungsstufe für die Rohstoffversorgung) aus der Studie von Erdmann und Graede (Vergleich von sieben Studien) und die drei obersten Kategorien der KRESSE-Studie des Wuppertal Instituts (Vergleich von zwölf Studien) zusammen. In der Studie des UKERC (Vergleich von elf Studien) ist von vornherein eine Rohstoffauswahl getroffen, die hier wiedergegeben ist. Die diesen Metastudien jeweils zugrunde liegenden Studien, sind in Anhang 3 aufgelistet.

weitem als das kritischste Element beurteilt, gefolgt von Dysprosium, Terbium und Praseodym. Da die KRESSE-Studie nur die erneuerbaren Energien untersucht, spielen die Platingruppenelemente für Katalysatoren und Brennstoffzellen keine Rolle. Auch werden Indium und Tellur als hochkritisch eingestuft.

In dem normierten Vergleich der UKERC-Metaanalyse wird für jedes kritische Element angegeben, in wie vielen der elf untersuchten Kritikalitätsstudien es als kritisch angesehen wird (Abbildung A2.3). Dabei ist zu betonen, dass ein Element nicht automatisch umso kritischer ist, je mehr Studien es als kritisch betrachten. Das bebrechende Element Gallium etwa wird nur in fünf der von der UKERC untersuchten Kritikalitätsstudien als kritisch eingestuft, ist aber trotzdem das kritischste Element, weil beim Gallium eine Reihe von Hochtechnologieanwendungen berücksichtigt werden, die über die Energietechnologien hinaus gehen.³⁶¹ Auf der normierten Kritikalitätsskala folgen dann die Seltene-Erden-Elemente, die Platingruppenmetalle, Indium, Germanium und Tellur. Fünf der elf Elemente sind bebrechende Elemente, wobei Silber, das zwar auch eigenständig auftritt, überwiegend aber aus der Blei- und Zinkproduktion gewonnen wird, hier als bebrechend gezählt wird. Indium wird von der größten Zahl der Studien als kritisch angesehen (8 von 11), hat aber nur den vierthöchsten Kritikalitätswert.

Ansonsten gibt es viele Spezifika in den einzelnen untersuchten Studien. So wird in der von Erdmann und Graedel mit- einbezogenen Studie für das Bundesland Bayern³⁶² zum Beispiel Phosphor als kritisch eingestuft, vermutlich da Bayern ein großes Agrarland ist. Es ist die einzige Studie in diesem Zeitraum, die Phosphor als kritisch ansieht. Aktuell taucht Phosphor auch bei den EU-20-kritischen Rohstoffen

auf³⁶³, die in den Metaanalysen aber nicht berücksichtigt wurden. Begründet wird dies allerdings nicht mit einem heute bereits abzusehenden Versorgungsproblem. Vielmehr wird Phosphor grundsätzlich als kritisch eingestuft, weil es für das Pflanzenwachstum unabdingbar und nicht substituierbar ist.

Die Studien der DERA

Einen wesentlichen Beitrag zur Kritikalitätsdiskussion in Deutschland hat die Deutsche Rohstoffagentur mit ihren Rohstoffstudien geliefert. In der ersten Studie³⁶⁴ aus dem Jahr 2012 hat sie 35 Primärrohstoffe (Metalle und Industriemineralien) auf ihre Kritikalität hin untersucht. Dabei wurde die globale Angebotskonzentration im Hinblick auf die Länderkonzentration der Produktion mittels Herfindahl-Hirschman-Index untersucht, ferner das Länderrisiko mittels Weltbankindikatoren und zum Teil auch die globale Firmenkonzentration. Diese Studie kam in Bezug auf versorgungskritische Rohstoffe zu einem ähnlichen Ergebnis wie die EU-Kommission mit Ihrer EU-14-Liste³⁶⁵. In ihrer zweiten Studie³⁶⁶ aus dem Jahr 2015 untersuchte die DERA sogar 61 Primärrohstoffe und weitete ihre Analyse auf über 213 rohstoffspezifische Produkte der höheren Wertschöpfungsstufen aus. Die jüngste DERA-Studie zeigt, dass solche Rohstoffe besonders kritisch sind, für die sowohl im Bergbau als auch bei mehreren Zwischenprodukten der Wertschöpfungskette hohe Angebotskonzentrationen (bei mittlerem bis hohem Länderrisiko der Bergbau- oder Exportnationen) vorliegen.

5.3.2 Analysen zu kritischen Rohstoffen für die Energiewende im Vergleich

Nach der Auswertung der Metastudien, die verschiedene Einschätzungen bündeln, soll auf die drei weltweit wichtigsten Rohstoffstudien im Hinblick auf

³⁶¹ Angerer et al. 2009-2; Angerer et al. 2009-3.

³⁶² Pflieger et al. 2009.

³⁶³ EC 2014.

³⁶⁴ Buchholz et al. 2012-1.

³⁶⁵ Vergleiche EC 2010.

³⁶⁶ Buchholz et al. 2015.

kurz- und mittelfristige Kritikalitätseinstufung (in Jahren)					
kritisch		nahe kritisch		Schlüsselement, aber unkritisch	
(0 bis 5)	(5 bis 15)	(0 bis 5)	(5 bis 15)	(0 bis 5)	(5 bis 15)
Yttrium	Yttrium	Cerium	Lithium	Lithium	Indium
Neodym	Neodym	Lanthan	Tellur	Nickel	Nickel
Dysprosium	Dysprosium	Tellur		Kobalt	Kobalt
Europium	Europium	Indium		Gallium	Gallium
Terbium	Terbium			Mangan	Mangan
				Praseodym	Praseodym
				Samarium	Samarium
					Cer

Tabelle 5.3: Zeitskalen für die Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen nach DOE.³⁶⁷ Das DOE berücksichtigt bei der Bewertung von Verfügbarkeit und Kritikalität von Rohstoffen für die Energiesysteme der Zukunft verschiedene Zeithorizonte.

hoch	mittel bis hoch	mittel	mittel bis gering	gering
SEE: Dysprosium, Europium, Terbium, Yttrium	Grafit	SEE: Lanthan, Cer, Samarium, Gadolinium	Lithium	Nickel
SEE: Praseodym, Neodymium	Rhenium	Kobalt	Molybdän	Blei
Gallium	Hafnium	Tantal	Selen	Gold
Tellur	Germanium	Niob	Silber	Cadmium
	Platin	Vanadium		Kupfer
	Indium	Zinn		
		Chrom		

Tabelle 5.4: Untersuchung und Kritikalitätseinstufung von 32 für Energiesysteme wichtigen Rohstoffen durch das Joint Research Center für Energie und Transport³⁶⁸

die Energiesysteme der Zukunft auf ihre Einzelergebnisse eingegangen werden. Dies sind die Studie des US-Departments of Energy (DOE)³⁶⁹, die Studie des Joint Research Centers am Institut für Energie und Transport (JRC-IET) der Europäischen Kommission³⁷⁰ und die KRESSE-Studie des Wuppertal-Instituts³⁷¹. Während die KRESSE-Studie im Auftrag des Deutschen Bundestags erstellt wurde, sind die Studien des JRC-IET und des DOE hier hervorzuheben, da sie in den drei wesentlichen Metastudien, die hier betrachtet wurden, Berücksichtigung

gefunden haben. Die Studie des DOE ist die älteste Studie dieser Art. Sie umfasst alle Energietechnologien, nicht nur die erneuerbaren Energien. Allerdings sind alle in der Studie als kritisch eingestuft Elemente auch für die Energiesysteme der Zukunft relevant (Tabelle 5.3).

Die JRC-IET-Studie klassifiziert eine Liste von 32 Schlüsselementen auf der Basis einer Kombination von Marktfaktoren und geopolitischen Faktoren. Die Marktfaktoren sind beispielweise Begrenzungen für die Ausweitung des Angebotes oder die Wahrscheinlichkeit einer starken Nachfragesteigerung. Geopolitisch spielen die Länderkonzentration des Angebotes oder das politische Risiko der Lieferländer eine Rolle (Tabelle 5.4).

³⁶⁷ DOE 2011-1.

³⁶⁸ Moss et al. 2013.

³⁶⁹ DOE 2011-1.

³⁷⁰ Moss et al. 2013.

³⁷¹ Wuppertal Institut 2014.

Kritische Ressourcen für die Energiewende

Viele der Seltene-Erden-Elemente – Platinmetalle, Indium, Niob, Wolfram, Gallium, Germanium und Tellur – sind Rohstoffe, die derzeit am häufigsten als versorgungskritisch eingestuft werden.

Kritikalitätsstudien können – je nach Verwendung und Einschätzung von Marktdikatoren sowie Zielsetzung – zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Dennoch sind sie ein wichtiger Bestandteil in der Diskussion um mögliche Versorgungspässe. Ihre wesentliche Aufgabe besteht darin, Preis- und Lieferrisiken auf den Rohstoffmärkten frühzeitig zu erkennen und durch regelmäßige Detailanalysen zu untersuchen. Somit liefern sie Entscheidern in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft wichtige Anhaltspunkte, um sich auf zukünftige Änderungen in der Versorgungslage einzustellen und Vorsorgemaßnahmen zu treffen.

Die KRESSE-Studie³⁷² schließlich, die im Wesentlichen die geologische Verfügbarkeit berücksichtigt, kommt zu folgendem Schluss:

1. „Die geologische Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe stellt für den geplanten Ausbau der erneuerbaren Energien grundsätzlich keine limitierende Größe dar. Dabei kann jedoch möglicherweise nicht jede Technologievariante unbeschränkt zum Einsatz kommen“.
2. „Als ‚kritisch‘ in Bezug auf die Versorgung mit mineralischen Rohstoffen wurden einzelne Komponenten beziehungsweise Subtechnologien der Windkraft, der Photovoltaik sowie der Batteriespeicherung identifiziert [...]. Für diese Technologien bestehen jedoch unkritische Alternativen, die verstärkt zum Einsatz kommen könnten oder bereits heute marktdominierend sind.“

5.4 Eigene Kritikalitätseinschätzungen

5.4.1 Rohstoffe aus eigenständigen Lagerstätten, insbesondere die Seltene-Erden-Elemente, und beibrechende Elemente

Betrachtet man die DOE-Studie³⁷³, die JRC-IET-Studie³⁷⁴ sowie die Metastudien von Erdmann und Graedel³⁷⁵, vom Wuppertal Institut³⁷⁶ und vom UKERC³⁷⁷ zusammen, so zeigen sich große Übereinstimmungen. Die Seltene-Erden-Elemente etwa werden überall als kritische Rohstoffe eingestuft, Indium und Tellur wiederum als kritisch bis nahe kritisch.³⁷⁸ Insgesamt fällt die große Zahl der beibrechenden Elemente auf. Dabei werden die als kritisch und nahe kritisch eingestuften Rohstoffe weiter danach unterteilt, wie sie in Lagerstätten vorkommen – „eigenständig in Lagerstätten auftretend“ beziehungsweise „als beibrechendes Element“ (Tabelle 5.5).

³⁷³ DOE 2010.

³⁷⁴ Moss et al. 2013.

³⁷⁵ Erdmann/Graedel 2011.

³⁷⁶ Wuppertal Institut 2014.

³⁷⁷ UKERC 2013.

³⁷⁸ In der Studie des JRC-IET (Moss et al. 2013) ist die Kritikalität (im Englischen) in die Klassen „medium“ (mittel), „medium-to-high“ (mittel bis hoch) und „high“ (hoch) eingeteilt. Die Stufe „medium-to-high“ ist der Einteilung „nahe kritisch“ gleichzusetzen.

³⁷² Wuppertal Institut 2014, S. 241f.

Vorkommensart von Rohstoffen	Studienrelevanz		
	DOE	JRC-IET	DOE + JRC-IET
eigenständig in Lagerstätten auftretend	Cer*, Lanthan*, Lithium	Praseodym*, Grafit, Platin	Yttrium*, Neodym*, Dysprosium*, Europium*, Terbium*
als beibrechendes Element		Gallium, Rhenium, Hafnium, Germanium	Indium, Tellur

* Seltene-Erden-Elemente

Tabelle 5.5: Auftreten von als kritisch und nahe kritisch eingestuften Rohstoffen – beibrechend oder in eigenständigen Lagerstätten³⁷⁹

Die Versorgung von Rohstoffen aus eigenständigen Lagerstätten reguliert sich in marktwirtschaftlichen Systemen entsprechend des Regelkreises der Rohstoffversorgung.³⁸⁰ Rohstoffanalysen, wie sie von der Deutschen Rohstoffagentur im Auftrag der Bundesregierung³⁸¹ durchgeführt werden, liefern wertvolle methodische Grundlagen und Praxisbeispiele. Das Rohstoffmonitoring, wie zum Beispiel in Form der DERA Rohstofflisten, behandelt in regelmäßigen Abständen dabei zunächst übergeordnet die Entwicklung auf den Rohstoffmärkten und zunehmend auch den Bereich erster Rohstoffveredelungsstufen (vergleiche Kapitel 2.3), also Angebot, Nachfrage und Preise. Darauf aufbauend werden vor allem potenziell als versorgungskritisch bewertete Rohstoffe oder Rohstoffgruppen und ihre Zwischenprodukte dann in Detailanalysen, den „DERA Rohstoffinformationen“, vertieft betrachtet. Einzelne Analysen gibt es zum Beispiel bereits für Kupfer, Zinn, Antimon, Wolfram, Bismut oder die Platinmetalle. Dies ermöglicht schließlich, die jeweilige Marktsituation besser einzuschätzen. So können mögliche Schwachstellen bei der Rohstoffversorgung und alternative Bezugsmöglichkeiten aufge-

zeigt werden. Ferner ist die DERA damit befasst, die Methodik zur Identifizierung und Bewertung von Preis- und Lieferrisiken im Kontext der Versorgung Deutschlands mit Rohstoffen und Zwischenprodukten zu verbessern und zu erweitern. Die Ergebnisse und die zugrunde liegende Methodik zur Kritikalitätsbetrachtung werden durch die DERA in Form von Publikationen und Informationsveranstaltungen frei und öffentlich zur Verfügung gestellt. Adressat ist hierbei vornehmlich die betroffene Wirtschaft. Zudem geben sie wichtige Hinweise auf möglicherweise auftretende Engpässe.³⁸²

Vorbeugung durch politische Intervention?

Im Falle kritischer Versorgungssituation ist zu analysieren, was im Detail zu der Situation geführt hat. Hier können ein erhöhter Nachfrageschub oder auch politische Interessen ursächlich sein. Politische Maßnahmen können hierbei entsprechend vorbeugend unterstützen oder konkret ergriffen werden. Das Vorgehen Österreichs im Falle der Grube Mittersill ist hier als ein mögliches Maßnahmenmodell zu nennen. Die Wolframgrube Mittersill in Österreich konnte trotz einbrechender Wolframpreise auf Care-and-Maintenance-Basis mit staatlicher Unterstützung 1992/93 offengehalten werden und ist heute wieder ein bedeutender Wolframproduzent in der EU.

³⁷⁹ DOE 2010; Moss et al. 2013.

³⁸⁰ Vergleiche Bast et al. 2012.

³⁸¹ CDU/CSU/SPD 2013: Unter der Überschrift „Monitoring ausbauen“ heißt es: „Wir werden die Deutsche Rohstoffagentur beauftragen, ein Monitoring kritischer Rohstoffe durchzuführen und regelmäßig über die Verfügbarkeit der für die deutsche Wirtschaft kritischen Rohstoffe zu berichten.“

³⁸² Zum Beispiel Rosenau-Tornow et al. 2009; Buchholz et al. 2012-1; Dorner et al. 2014; Elsner et al. 2014; Liedtke/Schmidt 2014.

Hierbei stellt sich natürlich die Frage, ob es in einem marktwirtschaftlichen System gerechtfertigt ist, eine Grube mit staatlichen Mitteln offen zu halten? Hierzu muss zunächst auf den grundsätzlichen Unterschied zwischen einem normalen Industriebetrieb (wie zum Beispiel einer Autofabrik) und einem Bergwerk eingegangen werden: Für normale Industriebetriebe, an welchem Standort auch immer, können im Grunde immer ähnliche Inputfaktoren wie Arbeitsleistung, Werkstoffe, Betriebsmittel oder menschliches Wissen geschaffen werden. Das ist bei einem Bergwerk ganz anders. Dies ist durch die Lagerstätte immer standortgebunden und damit räumlich fixiert. Zum anderen ist jede Lagerstätte ein „Individuum“: Jede Lagerstätte definiert sich individuell durch unterschiedliche Vorräte, Gehalte und viele weitere Parameter, die die Wirtschaftlichkeit bestimmen. Diese Parameter können unter dem Begriff „Bonität“ zusammengefasst werden.³⁸³ Diese Lagerstättenbonität ist überwiegend geologisch begründet. Die Konsequenz ist, dass es für jeden Rohstoff eine Merit Order (von Niedrigkosten- zu Hochkostenbergwerken) gibt, die durch besseres Management, Rationalisierung etc. nur bedingt beeinflusst werden kann. Da im Gegensatz zu Industrieprodukten die Rohstoffpreise schwanken wie Fieberkurven (vergleiche Kapitel 3.2), eröffnen sich damit in Niedrigpreisphasen für Firmen oder Länder mit Niedrigkostenlagerstätten – manchmal noch unterstützt durch bewusstes Preisdumping – die Möglichkeit, Monopole oder Oligopole aufzubauen. Daher stellt sich konkreter die Frage, ob ein Rohstoffverbraucherland wie Deutschland bei kritischen oder wirtschaftsstrategischen Rohstoffen, die eine besondere Bedeutung für Hightech-Produkte, auch für die Energiesysteme der Zukunft haben, nicht Maßnahmen ergreifen sollte, um sich gegen derartige

Monopol- oder Oligopolbildungen, die geologisch und nicht durch wirtschaftliche Überlegenheit verursacht sind, zu schützen.

Aufgrund von Preisdumping sind zukünftig beispielsweise stets Konstellationen denkbar, die zum Schließen konkurrierender Minen führen können. In diesen Fällen kann nur in beschränktem Umfang davon ausgegangen werden, dass Rohstoffkunden für eine stabile Diversifizierung ihrer Bezugsmöglichkeiten, quasi als „Versicherungsprämie“, bei einem alternativen Produzenten teurer einkaufen. Denn auch diese müssen wiederum auf dem Weltmarkt mit ihren Produkten konkurrieren können und sind daher nur in einem bestimmten Maße in der Lage, höhere Rohstoffkosten zu kompensieren. Konzertierte Aktionen, beispielsweise in Form staatlicher Unterstützung – auch auf internationaler Ebene, wie zum Beispiel der EU – sind daher denkbar, um dafür Sorge zu tragen, dass auf derartige Weise aus dem Markt gedrängte Produzenten ihre Gruben nicht schließen, sondern nur stunden. Das heißt, dass diese auf Care-and-Maintenance-Basis ihre Gruben offenhalten. Ziehen die Preise wieder an, könnten sie dann sofort wieder produzieren und eine Monopolstellung so verhindert werden. Die Gegenleistung auf der Abnehmerseite wäre der Abschluss langfristiger Lieferverträge im Vorfeld der Unterstützungsmaßnahmen: für die Abnehmer als Schutz vor einer drohenden Monopolsituation, für die Bergwerke als Hilfe für ihre Offenhaltung.

**Komplexe Anpassung von Gewinnungsraten:
Beispiel Platinmetalle**

Hinsichtlich beibrechender Elemente ist der Regelkreis der Rohstoffversorgung nur eingeschränkt wirksam (Kapitel 2.4, BOX I). Bei den beibrechenden Elementen gibt es große Informationsdefizite hinsichtlich der zukünftigen Verfügbarkeit und der Markttransparenz. Es gibt zum

³⁸³ Fettweis et al. 1985.

Beispiel immer wieder Warnungen vor Indium-Knappheiten, da die Reservesituation völlig unklar ist. Der US Geological Survey stellt in dem Standardwerk über Reserven, den *Minerals Commodity Summaries*, fest: „Quantitative estimates of reserves are not available.“³⁸⁴

Anhand des Beispiels der Platingruppenelemente³⁸⁵ lässt sich verdeutlichen, wie komplex das Auftreten von Rohstoffen und die Anpassung von Gewinnungsraten an veränderte Rohstoffbedürfnisse ist. Platinmetalle spielen zum Beispiel als Katalysatoren bei der Elektrolyse und Gewinnung von Wasserstoff eine bedeutende Rolle. Sie sind möglicherweise als Speichertechnologien (Power-to-Gas) für die Energiesysteme der Zukunft von Bedeutung. Insbesondere Iridium ist hier zu erwähnen, da es bisher in gewissen Anwendungsbereichen nicht substituiert werden kann; auch nicht durch andere Platinelemente.

Ergibt sich plötzlich eine steigende Nachfrage nach Iridium wirkt wieder der Regelkreis der Rohstoffversorgung. Die Iridiumpreise, die bisher in der Regel niedriger lagen als die Platinpreise, werden dann steigen und wirtschaftlichen Anreiz bieten, mehr Iridium zu produzieren. Diese zusätzliche Nachfrage kann relativ schnell aus den sogenannten Intermediates gedeckt werden. Dabei handelt es sich um Zwischenprodukte, die bei Abtrennvorgängen während der Platinproduktion entstehen. Die sechs Platinmetalle treten grundsätzlich gemeinsam auf. Da Platin bisher das begehrtere dieser beiden Pla-

tinmetalle ist, ist Iridium somit ein Nebenprodukt der Platingewinnung. Je nachdem, wie die Nachfrage nach einzelnen Elementen ist, werden diese Intermediates von den Betreibern von Platinschmelzen eingelagert oder weiter aufbereitet. Da Iridium, Ruthenium und Osmium am Ende des Trennvorgangs stehen, sind sie, sofern keine Nachfrage besteht, Bestandteil dieser Intermediates und werden mit diesen zunächst eingelagert.

Eine höhere Iridium-Nachfrage lässt sich auch decken, indem man Lagerstätten oder Lagerstättenteile mit relativ höheren Iridium-Gehalten für den Abbau erschließt. In der Regel werden Lagerstätten mit hohem Platin-Gehalt abgebaut, da sich dieses zu besonders hohen Preisen verkaufen lässt. Steigt aber der Iridium-Preis aufgrund hoher Nachfrage sehr stark, kann es sich lohnen, auf Lagerstätten mit höherem Iridium-Gehalt umzusteigen, umso mehr Iridium zu gewinnen – während die Menge des gewonnen Platins abnimmt. In der größten bekannten Lagerstätte und dem Hauptlieferanten von Platingruppenmetallen, dem Merensky-Reef im Bushveld-Komplex in Südafrika, beträgt das Iridium-Platin-Verhältnis 1:50. In dem UG-2-Reef, einer weiteren Lagerstätte im Bushveld-Komplex, tritt Iridium mit 1:20 zweieinhalbmal häufiger auf. Steigt der Iridium-Preis, wird entsprechend stärker im UG-2-Reef abgebaut. Dass sich ein Nebenprodukt bei der Metallgewinnung zu einem Treiber entwickelt, lässt sich auch bei der Gewinnung von Seltene-Erden-Elementen beobachten: Früher war der Treiber Europium, heute ist es eher Dysprosium – nicht mengenmäßig, sondern aufgrund der gestiegenen Nachfrage und damit einhergehend des hohen Preises.

Bei stark gestiegenen Iridium-Preisen kann es sogar attraktiv werden, Lagerstättentypen mit viel höheren Iridium-Gehalten zu explorieren und in Betrieb

³⁸⁴ USGS 2015.

³⁸⁵ Vergleichbar mit den Seltene-Erden-Elementen treten die sechs Platinmetalle (siehe Kapitel 3.1) in Lagerstätten immer zusammen als gekoppelte Elemente auf. Die Verhältnisse variieren lagerstättenspezifisch. Wirtschaftlich mit Abstand am bedeutendsten sind Platin, mit einer Weltbergbauproduktion von 190 Tonnen pro Jahr, und Palladium, mit 210 Tonnen pro Jahr. Die anderen Platingruppenelemente werden nur untergeordnet produziert, Iridium beispielsweise mit drei bis vier Tonnen pro Jahr. Die Gewinnung geschieht überwiegend aus eigenständigen Lagerstätten, untergeordnet beibehrend bei Nickellagerstätten (siehe Abbildung 4.12).

zu nehmen, also Lagerstätten, die aus wirtschaftlicher Sicht heute als „unkonventionell“ einzustufen sind. Vorkommen mit sehr viel höheren relativen Iridium-Gehalten sind aufgrund geochemischer Anreicherungsprozesse zum Beispiel aus Ophioliten³⁸⁶ bekannt.³⁸⁷

Neben der primären Rohstoffgewinnung müssen auch die Potenziale in der Technosphäre in die Betrachtung einbezogen werden. Im Falle der Platinmetalle beziehungsweise von Iridium ist beispielsweise die technisch gute Recyclingfähigkeit PGE-haltiger Katalysatoren der Wasserstoffelektrolyse von Bedeutung. Ähnlich wie PGE-Katalysatoren in der Petrochemie lassen sich diese industriellen Kreisläufe so gestalten, dass über den Lebenszyklus nur sehr geringe Verluste auftreten. Zunächst entsteht durch die Verwendung in neuen Technologien, wie zum Beispiel in Elektrolyseanlagen, in denen verstärkt Iridium als Katalysator eingesetzt wird, ein steigender Iridiumbedarf, der durch Primärgewinnung gedeckt werden muss. Dadurch wird in der Technosphäre in Form von Produkten ein Iridium-Vorrat, ein sogenannter Stock, aufgebaut. Am Ende des Produktlebenszyklus können die Platinmetalle praktisch immer wieder recycelt werden. Der relative Anteil an der Bedarfsdeckung aus diesem Stock heraus ist allerdings von der weiteren Nachfrageentwicklung abhängig (vergleiche Abbildung 3.27).

Markttransparenz in Nischenmärkten schaffen

Die Grenzen zwischen Reserven, Ressourcen und Geopotenzialen sind dynamisch. Mit dem Fokus auf der Beurteilung zukünftiger Rohstoffversorgungssituationen, muss das Ziel von Rohstoffanalysen sein, das jeweilige Geopotenzial,

auf das in Zukunft zugegriffen werden kann, zu identifizieren. Das Geopotenzial ist aber „die große Unbekannte“ und unter heutigen technischen Voraussetzung noch nicht abzuschätzen. Die bisherige Entwicklung zeigt aber, dass der Marktbedarf stets gedeckt werden konnte. Die Gruppe der beibrechend vorkommenden Rohstoffe stellt hierbei einen Sonderfall dar. Denn, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, können hierfür selbst die Reserven und Ressourcen kaum bestimmt werden. Am Beispiel von Germanium ist allerdings kürzlich eine präzisere Abschätzung durchgeführt worden.³⁸⁸

Bei den beibrechenden Elementen – und übrigens auch bei den Seltenerden-Elementen – handelt es sich um sehr enge Märkte und Marktnischen. Der Handel findet hierbei in der Regel nicht über die großen Börsen statt, sondern beschränkt sich auf wenige Rohstoffproduzenten und eine geringe Anzahl von Abnehmern. Derartige Märkte zeichnen sich daher oftmals durch eine hohe Markttransparenz aus. Entsprechend ist die Eintrittsschwelle³⁸⁹ in den Markt sehr hoch.³⁹⁰ Die Überwindung der Markteintrittsschwelle für einen möglichen neuen Produzenten kann durch die Erhöhung der Markttransparenz erniedrigt werden. Zur Schaffung von Markttransparenz ist daher die direkte Verbindung zwischen Produzenten und Verarbeitern besonders wichtig. Ein Informationsaustausch könnte über

³⁸⁸ Frenzel et al. 2014; Melcher/Buchholz 2014.

³⁸⁹ Mit der Eintrittsschwelle in den Markt wird die Schwierigkeit bezeichnet, dass ein Bergbauproduzent auch einen Markt für seine Produkte findet. Dies ist schon zu Beginn die Voraussetzung für eine Projektfinanzierung. Beispiele: Ein Goldbergbauprojekt hat überhaupt keine Eintrittsschwelle, da Gold Geld ist (Goldbergbau = Geldbergbau) und das Produkt sofort bei Banken gegen Geld eingetauscht werden kann. An Börsen gehandelte Metalle, wie Kupfer oder Zink, haben mit den Börsen auch immer einen Markt und damit eine sehr niedrige Eintrittsschwelle. Die Märkte von Seltenen-Erden- oder beibrechenden Elementen, wie Indium und Germanium, sind Nischenmärkte, bei denen wenige Abnehmer den Zugang kontrollieren. Hier ist die Eintrittsschwelle für einen Bergbauproduzenten also sehr hoch.

³⁹⁰ Siehe zum Beispiel Wellmer et al. 2008.

³⁸⁶ Ophiolite sind Gesteinskomplexe, die aus ehemaligen Meeresbodengesteinen, sogenannter ozeanischer Lithosphäre, bestehen, die durch gebirgsmechanische Prozesse (Plattentektonik) nun an Land vorzufinden sind.

³⁸⁷ Wellmer 2008, S. 587.

eine international von Verbrauchern und Abnehmern besetzte Studiengruppe geschehen. Derartige sogenannte Commodity Study Groups existieren beispielsweise für Blei, Zink, Kupfer und Nickel.

In diesem Kontext haben vonseiten der Politik und der Wirtschaft die Bereitstellung von ausreichend Forschungsmöglichkeiten und -mitteln ebenfalls eine große Bedeutung, auch um die Versorgungssicherheit Deutschlands mit Rohstoffen zukünftig zu gewährleisten. Forschung und Entwicklung bilden die Basis für die Entwicklung von marktreifen Ausweichstrategien, alternativen Produktionsrouten und effizienten Produktdesigns sowie für die Verbesserung von Recyclingmöglichkeiten. Der Aspekt der gesellschaftlichen Akzeptanz ist hierbei stets ein integrativer Bestandteil, der für das Gelingen der praktischen Umsetzung eine zunehmende Bedeutung erlangt – nicht zuletzt, da sich in den Energiesystemen der Zukunft der klassische Verbraucher oftmals zum Prosumer³⁹¹ entwickelt.

5.4.2 Phosphor und das Edelgas Helium

Befasst man sich mit der langfristigen Sicherung der Rohstoffversorgung, ist der Fokus ausführlicher auch auf das Edelgas Helium und das Element Phosphor zu richten. Der Grund dafür ist, dass man weder bei Helium noch bei Phosphor von einer marktwirtschaftlichen Selbstregulierung ausgehen kann. Somit ist zu erwarten, dass diese Rohstoffe ohne das Ergreifen einer entsprechenden langfristig orientierten Sicherungsmaßnahme hinsichtlich der Versorgung der Volkswirtschaft zunehmend kritisch werden können.

Helium – Verloren ans Weltall

Helium beispielsweise tritt in keiner der hier betrachteten Kritikalitätsuntersuchungen als kritischer Rohstoff auf. Dennoch sollte man langfristig mit einer gewissen Kritikalität auch im Kontext von Energietechnologien rechnen: Das Edelgas Helium wird in großen Mengen für Kälteprozesse, also zum Beispiel zur Kühlung in technischen Anlagen (kryogene Systeme), eingesetzt und ist daher auch für die Energiesysteme der Zukunft von Bedeutung.³⁹² Eine regelmäßige Potenzialüberprüfung ist daher auch für diesen Rohstoff notwendig. Helium wurde von den USA bereits 1925 als strategischer Rohstoff angesehen. Es tritt in geringen Mengen in Erdgaslagerstätten auf. Da Helium in Erdgaslagerstätten in den südwestlichen USA in einer ungewöhnlich hohen Konzentration vorkommt und es seinerzeit von kritischer Bedeutung für die Füllung von Zeppelinen war, wurde es seit 1925 in einem bundesstaatlichen Programm aus dem Erdgas abgetrennt und in einem geologischen Speicher gesammelt.³⁹³ 1996 beschloss der amerikanische Kongress, die Heliumreserven zu privatisieren. Die American Physical Society (APS) und die Materials Research Society (MRS), ein internationaler Materialforscher-Verband, schlugen allerdings 2011 vor, die Heliumspeicherung wieder in staatliche Hände zu legen.³⁹⁴ Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass in Hinblick auf eine langfristige Rohstoffsicherung die wirtschaftlichen Interessen eines privaten Betreibers, nämlich die betriebswirtschaftliche Gewinnmaximierung, oftmals im Konflikt mit volkswirtschaftlichen Interessen stehen, also der Wahrung einer kostengünstigen Souveränität des Rohstoffbezugs.

³⁹¹ Unter dem Begriff Prosumer versteht man die Doppelfunktion eines Akteurs oder Individuums, zugleich Konsument und Produzent zu sein. Im Kontext der Energiewende sind dies beispielsweise die einzelnen Haushalte, die eigene Energieerzeugungsanlagen besitzen, somit also Energieverbraucher und -erzeuger zugleich sind.

³⁹² Bradshaw/Hamacher 2013.

³⁹³ Die deutschen Zeppeline mussten mit Wasserstoff gefüllt werden, da die USA Deutschland den strategischen Rohstoff Helium nicht verkauften; in diesem Kontext ist das Unglück des Zeppelins Hindenburg, der am 06.05.1937 in Lakehurst bei New York in Flammen aufging, bekannt.

³⁹⁴ APS/MRS 2011.

Kommerziell wird Helium heute in den USA, Algerien, Katar, Russland und Polen produziert. Die Kritikalität des Heliums, das leichter als Luft ist, ist darin zu sehen, dass es als irdischer Rohstoff verloren gehen kann. Trennt man das Helium bei der Erdgasproduktion nicht ab, entweicht es in die Atmosphäre, vermischt sich dort mit der Luft – wird in der Konzentration also stark verdünnt – und steigt auf, bis es schließlich die Erdatmosphäre verlässt.

Phosphor ist nicht ersetzbar

Phosphor ist ein wichtiger Pflanzennährstoff, der durch keine andere Substanz ersetzbar ist. Daher wird Phosphor auch als ein bioessenzielles Element bezeichnet. Die Kritikalität besteht darin, dass für Phosphor höherhaltige, schichtförmige Lagerstätten nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen. Im Gegensatz etwa zum bioessenziellen Stickstoff, der in großen Mengen als Luftstickstoff zur Verfügung steht und durch chemische Verfahren (Haber-Bosch-Verfahren) quasi unbegrenzt nutzbar gemacht werden kann, sind diese geogenen Potenziale endlich. Eine weitgehende Wiedergewinnung von Phosphat in einer Art Nutzungskreislauf ist, obwohl bereits technische Verfahren entwickelt wurden, derzeit wirtschaftlich nicht möglich. Ein gängiges Verfahren, um diesen Pflanzennährstoff erneut zu nutzen, ist zum Beispiel die Verwendung von Jauche als Dünger (siehe Kapitel 4.3.6). Innerhalb der EU fordern Politiker daher immer wieder, hinsichtlich der zukünftigen Verfügbarkeit von Phosphor (Phosphorreserven) für mehr Klarheit zu sorgen.³⁹⁵ So ist es wohl allein auf diesen Sachverhalt zurückzuführen, dass Phosphor derzeit zu den EU-20-kritischen Rohstoffen³⁹⁶ gezählt wird, obwohl in dem Bericht der EU augenblicklich keine

Versorgungsprobleme gesehen werden. Generell wird bei den aktuellen Analysen die Gesamtheit der geologischen Verfügbarkeiten, also das Geopotenzial, betrachtet. Bezüglich Phosphor gibt es in der Historie ein adaptierfähiges Vorbild: das Projekt 156 „Phosphate deposits of the world“ des International Geological Correlation Programme von 1977 bis 1984.³⁹⁷ Bezogen auf den damaligen Kenntnisstand, trug dieses Projekt eine außerordentliche Datenbasis zusammen. Hinsichtlich der Geopotenziale von Phosphor beziehungsweise Phosphat ist kürzlich ein entsprechender Vorschlag entwickelt worden, die kontinuierliche Beobachtung dieses Rohstoffes international gemeinsam in den Fokus zu nehmen.³⁹⁸

5.4.3 Die Elemente Lithium und Kupfer

Lithium und Kupfer werden in der Öffentlichkeit immer wieder als Elemente diskutiert, die hinsichtlich der Nutzung in Energiesystemen versorgungskritisch sind. Kupfer ist als elektrischer Leiter das Elektrizitätsmetall per se; und Lithium könnte eine bedeutende Rolle als Batteriemetall bei der Elektrifizierung des Autoverkehrs spielen.

Lithium

Lithium wird in der DOE-Studie von 2011³⁹⁹ für den Zeitraum der nächsten 5 bis 15 Jahre als „nahe kritisch“ eingestuft (Kapitel 5.3.2). In dem von Erdmann und Graedel⁴⁰⁰ durchgeführten Vergleich tritt es dreimal als kritisch auf, in der vergleichenden KRESSE-Studie⁴⁰¹ drei bis viermal. Und in der Metaanalyse des UK Energy Research Centre⁴⁰² wird es in vier von elf Studien als kritisch bezeichnet (Abbildungen A2.1 bis A2.3). Darüber

397 Cook/Shergold 1986.

398 Wellmer/Scholz 2015.

399 DOE 2011-1.

400 Erdmann/Graedel 2011.

401 Wuppertal Institut 2014.

402 UKERC 2013.

395 Zum Beispiel Rosemarin/Jensen 2013.

396 EC 2014.

hinaus wurde es kürzlich in einer vom World Wide Fund For Nature (WWF) in Auftrag gegebenen Studie⁴⁰³ ebenfalls als kritisch eingestuft. Unter den EU-20-kritischen Rohstoffen ist es dagegen nicht vertreten.

Das Problem von Analysen wie zum Beispiel der WWF-Studie besteht darin, dass die Reserven und Ressourcen nicht als dynamische, sondern als statische Größe angesehen werden. Die Ressourcen werden sogar als „everything that is expected to exist“⁴⁰⁴ betrachtet. Dabei werden das Geopotenzialfeld und damit auch die Ergebnisse zukünftiger Exploration völlig außer Acht gelassen (siehe Kapitel 2.2 und Abbildung 2.3). So spricht nichts dafür, dass der Regelkreis der Rohstoffversorgung bei Lithium nicht funktionieren sollte. Auch die Studie des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI kommt zu dem Schluss, dass „selbst unter extremen Annahmen in den nächsten vier Jahrzehnten nicht mit einer Knappheit an Lithium-Reserven zu rechnen ist“⁴⁰⁵.

Kupfer

Auch beim Kupfer ist nicht davon auszugehen, dass es in den nächsten Jahrzehnten zu einer Verknappung kommen könnte.⁴⁰⁶ Weder in der Metaanalyse von Erdmann und Graedel noch in der KRESSE-Studie oder der Studie des UKERC tritt Kupfer als ein kritisches Element auf (Tabelle 5.2, Abbildungen A2.1 bis A2.3).⁴⁰⁷ Allerdings ist Kupfer eines der bedeutenderen Metalle, bei dem verschiedene Autoren immer wieder am ehesten Begrenzungen in der längerfristigen Verfügbarkeit sehen, dem dann stets immer wieder

auch von renommierten Rohstoffwirtschaftlern widersprochen wird.⁴⁰⁸

Schließlich endet die Diskussion an dem Punkt, ob das Geopotenzial eines Rohstoffes bestimmt werden kann. Die Diskussion um einen „Peak Minerals“ kann generell aber als ungeeignet angesehen werden (Kapitel 3.1, BOX III), denn letztlich muss die Frage beantwortet werden, ob immer genügend Kupfer aus der Geosphäre und der Technosphäre zur Verfügung stehen wird. Wie beim Aluminium gezeigt (Abbildung 3.26), nimmt der Anteil von Sekundärmetall aus der Technosphäre stetig zu. Das gilt naturgemäß auch für Kupfer, wobei Kupfer als relativ edles Metall noch den Vorteil hat, dass es anders als Aluminium immer wieder zur gleichen Qualität recycelt werden kann. Damit gibt es auch kein Downgrading. Zum anderen müssen mögliche Technologiesprünge berücksichtigt werden. Der verstärkte Einsatz von Glasfaserkabeln, der ab den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts Fahrt aufnahm, hatte einen signifikanten Einfluss auf den Kupferverbrauch. Ähnliches könnte zum Beispiel bei Fortschritten mit der Supraleitfähigkeit geschehen. Alle diese Effekte kommen in den Marktmechanismen des Regelkreises der Rohstoffversorgung zum Tragen.⁴⁰⁹

403 WWF/Ecofys 2014.

404 WWF/Ecofys 2014, S. 28.

405 Angerer et al. 2009-1, S. 1.

406 Vergleiche Angerer et al. 2010.

407 Erdmann/Graedel 2011; Wuppertal Institut 2014; UKERC 2013.

408 Bekannt geworden ist zum Beispiel ein Disput zwischen Thomas E. Graedel von der Yale University und John Tilton, einem weltweit führenden Rohstoffwirtschaftler (Gordon et al. 2006; Tilton/Lagos 2007): Während Graedel und seine Anhänger davon ausgehen, dass die Gesamtressourcenbox (siehe Abbildung 2.3) für Kupfer abgeschätzt werden kann, bestreitet Tilton diesen Ansatz und geht von einem Opportunity Cost Paradigm aus, das in etwa dem Regelkreis der Rohstoffversorgung entspricht. Kürzlich wurde in Science News Focus ein Kupferpeak diskutiert (Kerr 2014), der von australischen Forschern in etwa für 2050 vorhergesagt wird. Dem wird sowohl von Tilton als auch von Schodde (2010; 2012-1; 2012-2), einem der international besten Kupferkennner, und weiteren widersprochen.

409 Siehe auch Dorner 2013.

Eigene Kritikalitätseinschätzungen

Es ist abzuwägen, ob bei Marktverzerrungen beispielsweise durch Preisdumping oder politisch initiiert, von politischer Seite zum Schutz von Bergbaubetrieben interveniert werden sollte.

Die Schaffung von Markttransparenz durch internationale und unabhängige Expertengruppen kann dazu beitragen, Marktverzerrungen und Versorgungsrisiken insbesondere in Nischenmärkten vorzubeugen.

Die weltweiten Phosphorvorkommen der Geosphäre sind nach aktuellem Kenntnisstand groß. Sie werden auf Basis der aktuellen statischen Reichweite von mindestens 300 Jahren auf längere Sicht als ausreichend eingeschätzt, um die Nachfrage zu decken. Der Pflanzennährstoff Phosphor (Phosphat) ist allerdings nicht substituierbar und erfordert daher eine Langfriststrategie. Sowohl bisher als auch in absehbarer Zukunft konnte und kann der globale, anthropogene Stoffkreislauf nicht geschlossen werden, womit Phosphat in gewisser Weise endlich ist. Daher besteht erheblicher Forschungsbedarf in zweierlei Hinsicht: Zum einen ist Klarheit über die tatsächlichen Geopotenziale von Phosphor beziehungsweise des für die Pflanzen nutzbaren Phosphats zu schaffen. Zum anderen ist zu ergründen, wie sich Phosphat sekundär wirtschaftlich zurückgewinnen lässt. Es gilt hier, eine Kreislaufwirtschaft zu schaffen, durch die Phosphat in die Nutzungsketten zurückgeführt wird.

Helium könnte aufgrund seiner Verwendung in Kälteprozessen ein wichtiges Element für den Ausbau künftiger Energietechnologien werden. Da Helium aus der Atmosphäre ins Weltall entweichen kann, sind besondere technische Vorkehrungen notwendig, um diesen Rohstoff zu bewahren.

Sowohl bei der Lithium- als auch bei der Kupferversorgung wird für die „Energiesysteme der Zukunft“ kein wesentliches Problem gesehen. Es gibt keine Anhaltspunkte, warum die Mechanismen des Regelkreises der Rohstoffversorgung bei diesen Elementen nicht ausreichen sollten, um die zukünftige Nachfrage zu bedienen – auch wenn im Falle von Lithium allein auf Basis der aktuellen Reserven- und Ressourcensituation in einigen Studien ein anderes Bild skizziert wird.

6 Fazit

Für die Energiesysteme der Zukunft sind insbesondere drei Rohstoffgruppen von Bedeutung: fossile Rohstoffe, Biomasse und mineralische Rohstoffe, insbesondere Metalle. Letztere werden für den Bau von Anlagen benötigt. Insbesondere während des Umbaus der Infrastruktur hin zu einer klimafreundlichen Energieversorgung wird daher ein erhöhter Bedarf auftreten.

Dabei werden die zukünftigen Energiesysteme im Gegensatz zum heutigen deutlich vielfältiger sein. Zu Kohle- und Gaskraftwerken, die das heutige System dominieren, kommen Windkraft- und Photovoltaikanlagen und andere Technologien zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien hinzu. Auch Speichertechnologien wie verschiedene Batteriesysteme, Pumpspeicherwerke, Wasserstoffspeicher und Druckluftspeicher werden langfristig eine wichtige Rolle spielen. Auf der Verbraucherseite findet mit Elektrofahrzeugen, Leuchtdioden (LEDs) und supraleitenden Magnetheizverfahren in der Buntmetallverarbeitung, um nur einige Beispiele zu nennen, ebenfalls ein umfassender technischer Wandel statt. Insgesamt gibt es etwa 45 Technologien, die für den Umbau des Energiesystems voraussichtlich wichtig sind.

Diese technologische Vielfalt spiegelt sich auch im Rohstoffbedarf wieder. So werden für die neuen Energietechnologien – wie auch für andere High-Tech-Produkte – in zunehmendem Maße Sondermetalle wie die Seltene-Erden-Elemente und Technologiemetalle wie Indium, Tellur, Gallium und Germanium benötigt. Für die Herstellung eines Computerchips sind beispielsweise sechzig Elemente erforderlich. Für

die meisten Rohstoffe sind die Energietechnologien nicht das einzige Einsatzgebiet. Meist ist der Bedarf in der Automobilindustrie und im Elektronik-, Informations- und Kommunikationssektor höher. Der Energiesektor konkurriert daher auch mit diesen Sektoren um Rohstoffe.

Bei den **Primärmetallen** ist Deutschland zu hundert Prozent von Importen abhängig. Da die inländische Sekundärproduktion auf absehbare Zeit den Bedarf nicht alleine decken kann, sind globale offene Rohstoffmärkte entscheidend für die zukünftige Rohstoffverfügbarkeit in Deutschland.

Aus geologischer Sicht sind, trotz global steigender Rohstoffnachfrage, ausreichend Metalle für die Umsetzung der Energiewende vorhanden. Da neue Bergbauprojekte von der Entdeckung bis zur Inbetriebnahme eines Bergwerkes aber Vorlaufzeiten von etwa 10 bis 15 Jahren benötigen, auch die Ausweitung bestehender Kapazitäten Vorlaufzeiten benötigt und es für fast alle Rohstoffe heute globale Märkte gibt, können teilweise schon kleine Nachfrageschübe irgendwo auf der Welt zu signifikanten Preisanstiegen auf den globalen Rohstoffmärkten führen. Auch Konzentrationstrends in der Bergbauwirtschaft – immer mehr Rohstoffvorkommen gehören immer weniger Firmen in immer weniger Förderländern – können zu Preis- und Lieferrisiken führen, da sie die Bildung von Oligopolen begünstigen.

Langfristig haben sich die realen Preise fast aller Rohstoffe seit etwa hundert Jahren kaum erhöht. Rationalisierungseffekte durch techni-

sche Weiterentwicklung bei Exploration, Bergbau und Aufbereitung haben die schwieriger werdenden Lagerstättenverhältnisse durch niedrigere Konzentrationen und größere Tiefen bisher kompensiert.

Allerdings könnten auch kurzfristige **Preispeaks und Lieferrisiken** die Umsetzung der Energiewende verzögern. Derzeit steigt durch den rasanten Nachfrageschub in China die Konkurrenz auf den internationalen Rohstoffmärkten. Deutsche Unternehmen müssen sich in diesem Wettbewerb behaupten. Um sich gegen Versorgungsrisiken abzusichern und Ausweichstrategien zu entwickeln, braucht die Wirtschaft Informationen darüber, welche Rohstoffe kritisch sind.

Potenziell **kritische Rohstoffe** sind solche, die gleichzeitig ein hohes Versorgungsrisiko und eine hohe wirtschaftliche Bedeutung haben. Das Versorgungsrisiko ist hoch, wenn ein Rohstoff zu einem großen Teil aus wenigen Lieferländern bezogen wird und deren Lieferungen durch mögliche politische Krisen, Handelshemmnisse oder andere Faktoren als unzuverlässig bewertet werden. Zur Kritikalität trägt auch bei, wenn ein Rohstoff nicht substituierbar ist und nur in geringem Maße durch Recycling wiedergewonnen wird.

Welche Rohstoffe für die Energiesysteme der Zukunft in den nächsten Jahren oder Jahrzehnten kritisch werden, hängt zum einen von den zukünftigen technologischen Entwicklungen im Energiesektor, zum anderen von der Verfügbarkeit der verschiedenen Rohstoffe auf dem Weltmarkt ab. Auch technologische Entwicklungen in anderen Sektoren, die mit dem Energiesektor um Rohstoffe konkurrieren, spielen eine Rolle. Daher überrascht es nicht, dass verschiedene Studien bezüglich der Kritikalität einzelner Rohstoffe teilweise zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen.

Große Übereinstimmung zeigt sich bei den Seltene-Erden-Elementen, Platingruppenelementen, Indium und Tellur. Diese Elemente werden in fast allen aktuellen Studien, die die Kritikalität von Rohstoffen für die Energiesysteme der Zukunft untersuchen, als kritisch oder nahezu kritisch beurteilt.

Zu den **Seltene-Erden-Elementen** gehören unter anderem Scandium, Yttrium, Neodym, Dysprosium, Praseodym, Terbium, Europium, Cerium, Lanthan, Samarium.⁴¹⁰ Sie werden für verschiedene Energietechnologien, wie Batterien, LEDs, Magnete in Windenergieanlagen, Motoren und Generatoren benötigt. Versorgungsrisiken bestehen unter anderem dadurch, dass die Länderkonzentration mit 95 Prozent der Weltbergwerksproduktion in einem Land – China – besonders hoch ist. Die Recyclingraten sind zudem noch unzureichend, da Seltene-Erden-haltige Bauteile wie zum Beispiel Magnete bisher kaum aus Altgeräten separiert werden und es nur eine eingeschränkte metallurgische Infrastruktur zur Gewinnung dieser Elemente gibt.

Die **Platingruppenelemente** umfassen Platin, Palladium, Rhodium, Ruthenium, Iridium und Osmium. Sie spielen für Brennstoffzellen (Elektrofahrzeuge) und für die Wasserstoffelektrolyse – und damit für einige mögliche Schlüsseltechnologien der Energiewende wie Langzeitspeicher und Power-to-Gas – eine wichtige Rolle. Iridium ist dabei derzeit in bestimmten Anwendungsbereichen (PEM-Elektrolyseure⁴¹¹ für die Herstellung von Wasserstoff) zurzeit nicht substituierbar.

Die große Bedeutung von **Indium** und **Tellur** liegt für die Energiesysteme der Zukunft bei der Photovoltaik. Indium stammt überwiegend aus der

⁴¹⁰ Nicht alle Seltene-Erden-Elemente werden als kritisch bewertet. Bei Samarium beispielsweise sind keine Versorgungsrisiken zu befürchten.

⁴¹¹ PEM steht für „Proton Exchange Membrane“ oder „Polymer Electrolyte Membrane“.

Zinkproduktion, untergeordnet aus bestimmten Flugaschen von Kohlekraftwerken in China, Tellur überwiegend aus der Kupferproduktion. Indium kommt überwiegend aus China, während bei Tellur die Versorgungslage relativ divers ist mit den Hauptversorgungsländern China, Japan und Belgien.

Indium, Tellur, Iridium und einige andere möglicherweise kritische Elemente sind beibrechend, das heißt sie werden als Nebenprodukt im Bergbau eines anderen Metalls gewonnen. Bei **beibrechenden Metallen** funktioniert der Regelkreis der Rohstoffversorgung nur eingeschränkt. Ein Produzent des Hauptmetalls, bei Indium zum Beispiel Zink, wird die Hauptmetallproduktion kaum bei einer Knappheit des beibrechenden Metalls ausweiten. Es gibt oft nur wenige Produzenten und Abnehmer, wodurch der Markt weniger transparent ist als bei Rohstoffen, die über große Börsen gehandelt werden. Zudem ist auch die zukünftige Verfügbarkeit oft schwer einzuschätzen.

Ein Vorteil der Platingruppenelemente ist ihre gute Recyclingfähigkeit. So werden Platingruppenelemente, die zum Beispiel in der Petrochemie als Katalysatoren verwendet werden, mit hohen Ausbeuten ohne Qualitätsverlust wiedergewonnen. Es haben sich dort bereits industrielle Stoffkreisläufe etabliert, bei denen über den gesamten Lebenszyklus nur sehr geringe Verluste auftreten. Man kann davon ausgehen, dass sich ähnlich effiziente Stoffkreisläufe auch für Iridium und andere Platingruppenelemente entwickeln lassen, die als Katalysatoren für die Wasserstoffelektrolyse verwendet werden, sofern die Altprodukte den geeigneten metallurgischen Recyclingprozessen zugeführt werden. Die Rohstoffpotenziale in der Technosphäre können für diese Elemente also eine sehr wichtige Rolle spielen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Wiedergewinnung erst am Ende der Produktlebenszeit stattfindet. Bei einem schnellen Ausbau neuer Technologien wie zum Beispiel der

Wasserstoffelektrolyse sind daher die Vorräte an wiedergewinnbarem Material in der Technosphäre zunächst gering, und der Bedarf muss überwiegend über die Primärgewinnung gedeckt werden. Alternativ müsste man auf weniger effiziente Technologien ausweichen, die ohne oder mit anderen Platinmetallen auskommen. Der Anteil, den die **Sekundärproduktion** decken kann, hängt daher auch vom zeitlichen Verlauf des Umbaus des Energiesystems ab.

Bei einer Reihe von weiteren Elementen ist die Bewertung nicht eindeutig. Je nach Annahmen zur Entwicklung des zukünftigen Bedarfs und Methode zur Bewertung der Kritikalität werden sie von einem Teil der Rohstoffstudien als kritisch oder nahezu kritisch eingestuft, von anderen als unkritisch. Dies betrifft Nickel, den Stahlveredler Niob, das Refraktärmetall Wolfram sowie Gallium, Germanium, Selen, Vanadium, Silber, Graphit, Rhenium und Hafnium.

Für zukünftige Energietechnologien wird eine Reihe weiterer Elemente benötigt, die jedoch als weniger kritisch bewertet werden. Diese umfassen unter anderem Mangan, Tantal, Molybdän, Blei, Kupfer und Lithium.

Lithium wird für Batterien von Elektrofahrzeugen benötigt und könnte daher eine wichtige Rolle für den Umbau des Verkehrssektors spielen. Einige Rohstoffstudien bewerten Lithium als kritisch. In diesen Studien werden jedoch die Ergebnisse zukünftiger Exploration außer Acht gelassen. Aus Sicht der Autoren dieser Analyse ist dieser Ansatz nicht gerechtfertigt, da durch den Regelkreis der Rohstoffversorgung neue Lithiumreserven aus dem Geopotenzialfeld erschlossen werden können. In den nächsten Jahrzehnten ist daher insgesamt nicht mit einer Lithium-Knappheit, gegebenenfalls aber zwischenzeitlich aufgrund möglicher Versorgungsengpässe am Markt mit steigenden Lithium-Preisen zu rechnen.

Auch bei Kupfer, das als elektrischer Leiter eine sehr wichtige Rolle im Elektrizitätssektor spielt, wird von einigen Rohstoffforschern eine Begrenzung der langfristigen Verfügbarkeit gesehen. Auch hier gehen jedoch die Autoren dieser Analyse nicht von einer drohenden Verknappung aus, zumal Kupfer – wie die Platingruppenelemente – mit hohen Ausbeuten durch Recycling zurückgewonnen werden kann.

Eine gewisse Kritikalität besteht hingegen bei **Helium**, auch wenn dieses in den meisten Kritikalitätsuntersuchungen nicht als kritischer Rohstoff aufgeführt wird. Zukünftige Energiesysteme könnten Helium in größeren Mengen für Kälteprozesse benötigen. Um für solche Entwicklungen technologieoffen zu sein, sind Vorsorgemaßnahmen erforderlich. Helium tritt in geringen Mengen in Erdgaslagerstätten auf. Trennt man das Helium bei der Erdgasförderung nicht ab, so steigt es auf und verlässt die Erdatmosphäre. Damit ist es selbst unter günstigeren wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nicht wiedergewinnbar.

Phosphor ist, auch wenn in den nächsten Jahrzehnten keine Versorgungsengpässe zu erwarten sind, in gewisser Weise kritisch. Wie auch die anderen essenziellen Pflanzennährstoffe Kalium und Stickstoff ist Phosphor nicht durch andere Substanzen substituierbar. Anders als bei Kalium und Stickstoff gibt es jedoch keine unbegrenzten Potenziale. Es gibt derzeit Ansätze, die Verfügbarkeit anhand der Geopotenziale international in den Fokus zu nehmen und zu beobachten. Etwa die Hälfte des Phosphatbedarfs der deutschen Landwirtschaft muss derzeit importiert werden. Eine Wiedergewinnung von Phosphat aus Klärschlamm ist technisch teilweise möglich, derzeit aber nicht wirtschaftlich.

Da deutsche Unternehmen im Bereich der Metalle und Industrieminerale verstärkt **Zwischenprodukte** höherer

Wertschöpfungsketten verarbeiten, können auch diese für die Industrie kritisch sein. Zu den Versorgungsrisiken dieser Produkte stehen den Unternehmen aber kaum Informationen zur Verfügung. Die Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe hat daher damit begonnen, auch wichtige Zwischenprodukte in Kritikalitätsanalysen zu erfassen.

Trotz aller Kritikalitätsstudien und Szenarien bleiben **Nachfragetrends** und die damit einhergehenden Änderungen des Rohstoffbedarfs immer zu einem gewissen Grad unvorhersehbar. Die Herausforderung für die Industrie besteht also darin, beim Rohstoffeinsatz flexibel zu sein. Durch Lagerhaltung, Diversifizierung von Bezugsquellen, Entwicklung von Substitutionsmöglichkeiten und inner- sowie außerbetrieblichen Recyclingmaßnahmen können Firmen Versorgungsengpässen vorbeugen. Dazu gehört auch, dass Kunden vorab davon überzeugt werden, eine andere Materialzusammensetzung in den Produkten zu akzeptieren („Produktfreigabe“). Auch die Bildung von Käufergemeinschaften, langfristige Lieferverträge mit Preisgleitklauseln und Hedgingmaßnahmen können das wirtschaftliche Risiko abfedern. Unterstützt werden können die Bemühungen der Unternehmen von politischer Seite zum Beispiel dadurch, dass die EU und die WTO Maßnahmen ergreifen, um Wettbewerbsverzerrungen und Handelshemmnisse auf den globalen Rohstoffmärkten zu beseitigen.

Derzeit werden in der EU **Substitutionsmöglichkeiten** für Materialien mit hohem Risiko diskutiert. Einige für die Energiesysteme der Zukunft kritische oder nahezu kritische Elemente sind jedoch kaum substituierbar. Dazu zählen die Seltene-Erden-Elemente Dysprosium, Yttrium, Europium und Lanthan und die Platingruppenelemente Rhodium

und Iridium. Andere – darunter Neodym, Praseodym und Tellur – können in vielen Anwendungen durch andere Elemente ersetzt werden. Da jedes Element spezifische Eigenschaften hat, gibt es jedoch selbst bei insgesamt gut substituierbaren Rohstoffen auch immer Anwendungen, für die keine Alternativen bekannt sind.

Lieferrisiken und hohe Preise eines Rohstoffs lösen oft eine intensive Suche nach Substitutionsmöglichkeiten aus. Dies kann zur Entwicklung von Technologien führen, die ohne den entsprechenden Rohstoff auskommen. Beispielsweise konnten in den letzten Jahren Legierungskombinationen gefunden werden, die ohne Rhenium auskommen. Auch in der Produktion hochwertiger Stähle, die bei vielen Energietechnologien benötigt werden, können Preisbewegungen durch einen Wechsel beim Einsatz von Hochtemperatur-Legierungsmetallen abgefangen werden. Teilweise können ganze Produkte, die auf kritische Elemente angewiesen sind, durch alternative Technologien ersetzt werden. So können Käfigläufer-Asynchronmotoren Synchronmotoren ersetzen. Der Vorteil: Im Gegensatz zu letzteren erhalten erstere keine Seltene-Erden-Elemente. Um ein alternatives Produkt bis hin zum Großserieneinsatz zu entwickeln, vergehen allerdings oft mehrere Jahre.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Substitution ist die Erhöhung der **Materialeffizienz**, also die Herstellung eines Produktes mit weniger Rohstoffen. Dies mag für die einzelnen Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien gelingen – gesamtwirtschaftlich aber sind diese Technologien zunächst einmal rohstoffintensiver als die konventioneller Energieanlagen, denn für die Herstellung der Anlagen wird bezogen auf die damit erzeugte Energieeinheit mehr Material benötigt. Erst bei der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus, von der Inves-

tion bis zum Betriebsende, ergibt sich eine Verbesserung der Rohstoffeffizienz, da bei erneuerbaren Energien keine fossilen Energierohstoffe verbraucht werden. Es muss also zunächst mehr in Rohstoffe investiert werden, um das Energiesystem umzubauen und damit letztendlich die Rohstoffeffizienz zu verbessern.

Eine gute Möglichkeit, sich von kritischen Primärrohstoffen unabhängiger zu machen, ist **Recycling**. Zunehmend steht eine Rohstoffbasis in Altprodukten wie Autos und Computern und Infrastruktur wie Stromleitungen und Gebäuden – sogenannte sekundäre Lagerstätten – zur Verfügung. Mit modernen metallurgischen Prozessen können Metalle aus Sekundärmaterialien grundsätzlich in der gleichen Qualität gewonnen werden wie aus Primärquellen. Zudem sind die Vorlaufzeiten und der Investitionsbedarf oft geringer als bei Primärlagerstätten, und die gesellschaftliche Akzeptanz für das Recycling ist höher als für den Bergbau.

Dennoch werden hohe Recyclingquoten bisher nur für Haupt- und Edelmetalle erreicht. Ein Grund ist, dass es für viele der potenziell kritischen Rohstoffe wie die Seltene-Erden-Elemente oder Indium, Germanium, Gallium, Tellur bisher wenig etablierte Recyclingprozesse gibt und sie im Rahmen von Recyclingprozessen mit Schwerpunkt für andere Metalle zum Teil in die Schlacke gehen und damit verloren sind.

Ein weiteres Problem ist, dass die **Sammeleffizienz** oft gering ist. Während sich in der Industrie – beispielsweise für Platingruppenelemente in Prozesskatalysatoren – sehr effiziente Recyclingprozessketten etabliert haben, fehlt bei Verbraucherprodukten oft der ökonomische Anreiz, diese am Ende ihrer Nutzung dem Recycling zuzuführen. Hier spielen die politisch-gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, insbesondere Abfallgesetze und ihr Vollzug, eine wichtige Rolle.

Auch wenn für viele Rohstoffe das Recycling erheblich ausgeweitet werden kann, eine hundertprozentige Rückgewinnung ist aus physikalischen Gründen meist nicht möglich und im Hinblick auf den Energiebedarf auch nicht sinnvoll. Dabei wird die Wiedergewinnung ineffizienter und energieintensiver, je komplexer die Verbindungen sind, in denen der Rohstoff vorliegt. Das **Produktdesign** kann dazu beitragen, die Recyclingfähigkeit zu verbessern, in dem zum Beispiel, Bauteile, die wertvolle Elemente enthalten, leicht ausgebaut werden können.

Recycling kann einen erheblichen Beitrag zur Versorgung mit wichtigen Metallen leisten, alleine kann es den Bedarf jedoch nicht decken. Der Umbau des Energiesystems ist – gerade auch durch den zunächst ansteigenden Bedarf an Metallen – weiterhin auf den Bergbau angewiesen.

Um auch in Zukunft neue Primärlagerstätten zu entdecken und zu nutzen, sind **Innovationen in Exploration und Bergbau** erforderlich. Wurden zunächst die oberflächennahen Lagerstätten ausgebeutet, so liegen die Potenziale zunehmend in größerer Tiefe. Diese Erzkörper zu entdecken, ermöglicht unter anderem die Weiterentwicklung elektromagnetischer Explorationstechnik. Längerfristig dürften für die Gewinnung von Kupfer, Nickel, Kobalt und verschiedene andere High-Tech-Elemente auch marine Rohstoffe eine Rolle spielen – polymetallische Knollen (Manganknollen), Kobaltkrusten und Massivsulfide. Es besteht jedoch noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei deren Gewinnung und Verarbeitung.

Auch bei den fossilen Energieträgern erschließen technologische Weiterentwicklungen neue Rohstoffvorkommen. Hier sind insbesondere **Schiefergas und Schieferöl** zu nennen, die durch die in der Öffentlichkeit sehr kontrovers diskutierte Hydraulic-Fracturing-Technologie (Fracking) gefördert werden können. Die derzeit

niedrigen Preise von Erdöl und Erdgas auf dem Weltmarkt werden auf die gestiegene Förderung von Schieferöl und Schiefergas in den USA zurückgeführt. Auf lange Sicht könnte auch den **Methanhydraten** in der Tiefsee eine Bedeutung zukommen.

Selbst wenn die Förderung aus unkonventionellen Lagerstätten deutlich zunehmen sollte, bleiben **Erdgas und Erdöl** jedoch knappe Rohstoffe. Daher ist auch weiterhin – trotz des aktuellen Preisverfalls – mit hohen beziehungsweise auf lange Sicht noch steigenden Preisen für diese Energieträger zu rechnen. Deutschland ist bei Erdöl und Erdgas sehr stark von Importen aus wenigen Lieferländern abhängig. Einheimische Quellen decken lediglich 12 Prozent des deutschen Verbrauchs beim Erdgas und zwei Prozent beim Erdöl.

Beim Erdgas könnte die Abhängigkeit insbesondere von Russland reduziert werden durch die verstärkte Nutzung von verflüssigtem Erdgas (LNG), das über Tanker von anderen Ländern hertransportiert werden kann. Eine weitere Alternative ist die Nutzung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten in Deutschland mithilfe von Fracking.

Auch wenn die Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik weiterhin rasant ausgebaut wird und sich dadurch langfristig der Bedarf an fossilen Brennstoffen reduziert, so müssen doch – solange es keine Langzeitspeicher für Strom gibt – auf absehbare Zeit entweder Kohle- oder Erdgaskraftwerke als Reserve bereitgehalten werden. Erdgaskraftwerke haben dabei den Vorteil, dass sie flexibler sind als Kohlekraftwerke und daher die fluktuierende Einspeisung aus Windkraft- und Photovoltaik gut ausgleichen können. Zudem verbrennt Erdgas deutlich sauberer als Kohle und verursacht geringere CO₂-Emissionen. Demgegenüber ist Kohle wesentlich billiger, auf lange Sicht verfügbar und kann im Falle von Braunkohle aus einheimischen Lagerstätten gewonnen werden.

Während bei den metallischen Rohstoffen Knappheitssituationen in erster Linie auf Entwicklungen auf den Rohstoffmärkten zurückgehen, sind der Verfügbarkeit von **Bioenergie** physikalische Grenzen gesetzt. Die Schätzungen, wie viel Bioenergie aus agrarischer Biomasse im Jahr 2050 weltweit zur Verfügung stehen wird, gehen allerdings weit auseinander – von 50 bis 500 Exajoule pro Jahr. Berücksichtigt man neben dem steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln die Umweltfolgen der intensiven Landwirtschaft – Treibhausgasemissionen, Biodiversitätsverlust, hoher Wasserverbrauch, Gewässerkontamination und Bodendegradation – so lässt sich aus Sicht der Autoren die verfügbare Menge an agrarischer Bioenergie nicht wesentlich steigern. Maßnahmen zur Sicherung der Versorgung setzen daher sinnvollerweise eher bei der Nachfrage an – etwa indem Biomasse in allen Sektoren möglichst effizient genutzt wird und Bioenergie nur dort eingesetzt wird, wo es dem Gesamtsystem den größten Nutzen bringt.

Nicht unerhebliche Potenziale für die energetische Nutzung bieten agrarische **Biomasseabfälle**. Auch durch effizientere Herstellungsketten von Nahrungsmitteln – derzeit gehen weltweit circa sechzig Prozent der Ernte durch Verluste in der Landwirtschaft und in den Lieferketten sowie durch Wegwerfen in Supermärkten und Haushalten verloren – und durch eine Ernährungsweise mit weniger tierischen Produkten könnten agrarische Flächen frei werden und gegebenenfalls für die Erzeugung von Bioenergie genutzt werden.

Im Vergleich zu Photovoltaik- und Windkraftanlagen hat die Bioenergie eine geringe Flächeneffizienz und, außer bei Holz aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern, auch eine ungünstigere Treibhausgasbilanz. Durch ihre Speicherbarkeit und hohe Energiedichte kann die Bioenergie jedoch Funktionen im Energiesystem übernehmen, für die Wind und

Solarenergie weniger geeignet sind – etwa zur Überbrückung langer Flauten und als Kraftstoff im Lastverkehr.

Die Verfügbarkeit von **Wasser** spielt in vielen Regionen eine limitierende Rolle für die landwirtschaftliche Produktivität. Derzeit werden etwa siebenzig Prozent der weltweiten Süßwasserentnahmen für die Bewässerung verwendet. In Form von Salzwasser ist Wasser praktisch unbegrenzt verfügbar und kann durch den energieaufwändigen Prozess der Entsalzung in Süßwasser umgewandelt werden. Die Wasserfrage verlagert sich damit auf eine Frage der Energieverfügbarkeit.

Auch im Bergbau sehen manche Fachleute die Wasserverfügbarkeit als einen limitierenden Faktor, da viele Grubendistrikte in ariden oder semiariden Gebieten liegen. Teilweise kann der Einsatz von Süßwasser reduziert werden, indem brackisches oder salziges Wasser verwendet wird. Auch entsalztes Meerwasser wird im Bergbau eingesetzt.

Für die Umweltbilanz der Rohstoffgewinnung ist auch der **Energieaufwand** von Bedeutung. Da zunehmend tiefer liegende Lagerstätten ausgebeutet und komplexere Erze aufbereitet werden müssen, wird er in Zukunft pro Tonne Metall wahrscheinlich steigen. Den damit verbundenen höheren CO₂-Emissionen könnte man entgegenwirken, indem im Bergbau gezielt Energie aus erneuerbaren Energien eingesetzt wird. Denkbar ist, dass Bergbauunternehmen preisgünstigen überschüssigen Wind- und Solarstrom einsetzen, um Erze mit besonders niedrigen Metallgehalten aufzubereiten. Auf diese Weise könnten Sie ihre Stromabnahme flexibilisieren und zum Ausgleich der fluktuierenden Einspeisung beitragen.

Neben den technischen und ökonomischen Voraussetzungen für ein Bergbauprojekt gibt es eine weitere, wichtige Bedingung: die **gesellschaftliche**

Legitimation. Das heißt, die Bevölkerung muss den Bergbau befürworten oder zumindest tolerieren. Diese gesellschaftliche Legitimation für den Rohstoffabbau, die sogenannte „Social Licence to Operate“ zu bekommen beziehungsweise aufrechtzuerhalten, stellt eine zunehmend große Herausforderung für den Bergbau dar. Wie stark eine Bevölkerung den Bergbau im eigenen Land akzeptiert oder ablehnt, hängt von vielerlei Faktoren ab: vom Entwicklungsstadium des Landes und der wirtschaftlichen Abhängigkeit von der Rohstoffproduktion, von Devisen- und Steuereinnahmen, Arbeitsplätzen und Infrastrukturentwicklung, die der Bergbau generiert. Eine nachhaltige und sozioökologisch akzeptable Rohstoffgewinnung lässt sich nur etablieren, indem die verschiedenen Interessen diskutiert und abgewogen werden. Eine soziale Akzeptanz für die Rohstoffgewinnung wird letztlich nur erreicht werden können, wenn die Bevölkerung überzeugt werden kann, dass ihre Werte geachtet, die Umwelteingriffe minimiert sowie wirtschaftliche Vorteile für sie durch Arbeitsplätze und bessere Infrastruktur geschaffen werden.

Tagebauprojekte stoßen wegen des größeren Eingriffs in die Landschaft und Umsiedelung von Menschen oft auf größere Widerstände als Tiefbauprojekte. Die Tendenz zu immer größeren Tagebauen umzukehren, könnte dazu beitragen, die Akzeptanz für den Bergbau zu erhalten oder zu steigern – allerdings stehen dem die höheren Kosten des Tiefbaus entgegen.

Insbesondere in vielen außereuropäischen Ländern hat der Bergbau oft immer noch gravierende Folgen für die menschliche Gesundheit, Umwelt und Sozialsysteme. Aber auch in der Recyclingwirtschaft sind illegale und dubiose Exporte von Elektronikschrott beziehungsweise Altprodukten in Regionen mit unzureichenden Recyclingstandards ein Problem. Die weltweite Etablierung hoher **Umwelt- und Sozialstandards**

dürfte für die Rohstoffwirtschaft eine große, wenn nicht die größte Zukunftsaufgabe sein.

Die Rohstoffindustrie selber kann zur Lösung des Problems beitragen, indem sich Firmen zusammenschließen und verbindliche Standards definieren. Während dies von den großen internationalen Bergbauunternehmen bereits praktiziert wird, halten sich viele kleine und mittelgroße Bergbauunternehmen oft nicht an solche Standards und verursachen überproportionale Umweltschäden im Verhältnis zu ihrer Rohstoffproduktion. Auch die internationalen Banken können über eine entsprechende Steuerung der Bergbaufinanzierung Standards erzwingen. Ihnen kommt daher eine besondere sozioökologische Verantwortung zu.

7 Anhang

Anhang 1

Gruppe nach IUPAC beziehungsweise CAS

	1/IA	2/IIA	3/IIIB	4/IVB	5/VB	6/VIB	7/VIIB	8/VIII	9/IX	10/VIII	11/IB	12/IIB	13/IIIA	14/IVA	15/VA	16/VIA	17/VIIA	18/VIIIA
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
				57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
				89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

1 ← Ordnungszahl
 ← Elementsymbol

Spezialitäten
 Nichteisenmetalle
 Edelmetalle
 Seltene-Erden-Metalle
 Eisenmetalle
 Nichtmetalle oder bedeutungslos für Energiesysteme

Abbildung A1.1: Einteilung der Elemente entsprechend ihrer Metallart und Anwendung.⁴¹² Hierbei ist zu beachten, dass viele in der Anwendung übliche Begriffe wie Technologie- und Hightechmetalle, Elektronikmetalle, Sondermetalle, Refraktärmetalle etc. oder die exakten chemischen Klassifizierungen keine Berücksichtigung gefunden haben, da sich diese oftmals überschneiden.

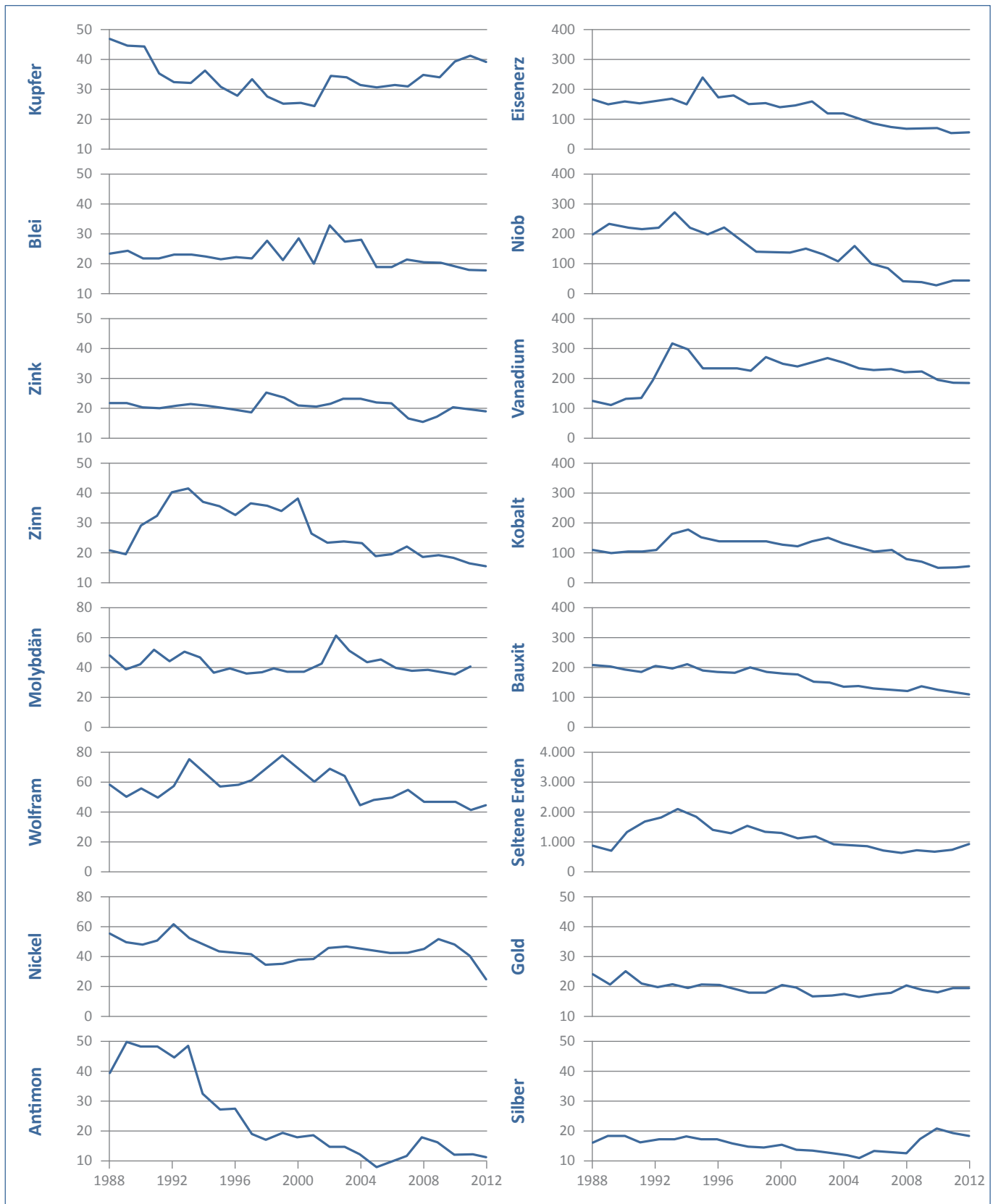


Abbildung A1.2: Verhältnis aus Reserven zu Produktion (in Jahren) für ausgewählte metallische Rohstoffe, die zumeist für die Energiesysteme der Zukunft relevant sind.⁴¹³ Für die meisten Rohstoffe sind die Werte in den letzten Jahren gesunken, was im Wesentlichen auf die erhöhte Nachfrage Chinas zurückzuführen ist. Die Exploration und ihre Erfolge folgen immer mit einer Zeitverzögerung. Das Absinken deutet auf eine Verknappung des Rohstoffs hin. Unter dem Gesichtspunkt der durchschnittlichen Vorlaufzeiten für Bergbauprojekte von etwa zehn Jahren können hieraus entsprechend Kritikalitäten für die Versorgung abgeleitet werden.

Studie	DOE 2010	JRC-IET 2013	WI 2014	
			WI-1	WI-2
Erzeugungstechnologien zentral (Regelenergie)				
Kohlen-Dampfkraftwerk		x		
Gaskraftwerk		x		
Gas- und Dampfkraftwerk (GuD)		x		
IGCC-Kraftwerk (Integrated Gasification Combined Cycle)		x		
Carbon Capture and Storage (CCS)		x		
Erzeugungstechnologien dezentral				
Blockheizkraftwerk (BHKW) mit Verbrennungsmotor		x		
Blockheizkraftwerk (BHKW) mit Stirlingmotor		x		
Polymerelektrolytmembran (PEM)-Brennstoffzelle		x		
Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC = Solid Oxide Fuel Cell)		x	x	
Erzeugungstechnologien dezentral				
Windgenerator mit Getriebe	x	x	x	
Windgenerator direkt betrieben	x	x	x	
Wasserkraftanlagen (Kaplan, Francis, Pelton)		x		x
Gezeitenkraftwerk		x		
Geothermiekraftwerk		x		x
Silizium-Solarzellen (Photovoltaik PV)	x	x		x
Cadmiumtellurid (CdTe)-Solarzellen (PV)	x	x	x	
Kupfer-Indium-Diselenid (CIS)-Solarzellen (PV)	x	x	x	
Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS)-Solarzellen (PV)	x	x	x	
Galliumarsenid (GaAs)-Solarzellen (PV)		x		
Concentrating Solar Power (CSP)		x	x	
Thermal Solar Power		x	x	
Speichertechnologien				
Pumpspeicher		x		x
Druckluftspeicher (CAES = Compressed Air Energy Storage)		x		x
Wasserstoffspeicher		x		x
Blei-Säure-Batterie		x		
Nickel-Cadmium-Batterie	x	x		
Nickel-Metallhydrid-Batterie	x			
Lithium-Ionen-Batterie	x	x		x
Natrium-Schwefel-Batterie		x		x
Redox-Flow-Batterie		x	x	
Stromnetze				
Freileitungen (Aluminium Al)				
Erdkabel (Kupfer Cu)				x

Studie	DOE 2010	JRC-IET 2013	WI 2014	
			WI-1	WI-2
Elektromobilität				
Hybridfahrzeuge	x	x	x	
Batterie-Elektrofahrzeuge	x	x	x	
Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge		x	x	
Schwungradspeicher		x		
Superkondensatoren		x		
Energieträgergewinnung				
Synthetische Biokraftstoffe (BtL = Biomass to Liquid)				x
Bioethanol Fermentation				x
Bioerdgas (Biogasveredlung mit Membranverfahren)				x
Power to Gas (Elektrolyse)			x	
Effizienztechnologien – Querschnitt				
Leuchtstofflampen	x	x		
LED-Lampen (Leuchtdiode; LED = Light Emitting Diode)	x	x		
Synchronmotoren (Permanentmagnete)	x			
Effizienztechnologien- Industrie (Auszug)				
Supraleitende Magnetheizverfahren (Buntmetallverarbeitung)		x		

Tabelle A1.1: Rohstoff-relevante erneuerbare Energietechnologien, die in Studien des DOE, des JRC-IET und des Wuppertal Instituts analysiert wurden.⁴¹⁴ Die Technologienennungen des Wuppertal Instituts sind unterteilt in WI-1: Technologien, die hinsichtlich kritischer Rohstoffe mehr oder weniger tief bilanziert wurden; und WI-2: Technologien, die auf Relevanz für kritische Rohstoffe geprüft, aber nicht tiefer analysiert wurden, da keine Rohstoffrelevanz festgestellt wurde.

Anhang 2: Quantifizierungsbeispiele des Rohstoffbedarfs einzelner Energietechnologien anhand der Studien von Wuppertal Institut und JRC-IET⁴¹⁵

Generatortyp	Rohstoff	IST	2025	2050
		[kg/MW]		
Synchrongenerator, permanent erregt				
Direktantrieb	Neodym	201,5	162,5	130,0
(Direct Drive – DD)	Dysprosium	15,0	11,7	11,7
Mittelgeschwindigkeitsgetriebe	Neodym	49,6	40,0	32,0
(Middle Speed – MS)	Dysprosium	3,7	2,9	2,9
Hochgeschwindigkeitsgetriebe	Neodym	24,8	20,0	16,0
(High Speed – HS)	Dysprosium	1,8	1,4	1,4
Synchrongenerator, elektrisch erregt				
Hochtemperatur-Supraleiter	Yttrium	-	2,3	2,3

Tabelle A2.1: Spezifischer Bedarf kritischer mineralischer Rohstoffe für den Bau von Windenergieanlagen⁴¹⁶

⁴¹⁴ DOE 2010; JRC-IET 2013; Wuppertal Institut 2014.

⁴¹⁵ Wuppertal Institut 2014; Moss et al. 2013.

⁴¹⁶ Wuppertal Institut 2014, S. 167.

Element	Symbol	Polykristallines Silizium (c-Si)	Amorphes Silizium (a-Si)			Cadmiumtellurid (CdTe)			Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid [CIGS]		
		[kg/MW _p]									
		2013	2013	2025	2050	2013	2025	2050	2013	2025	2050
Silizium	Si	6.000	37			-			-		
Silber	Ag	62	-			-			-		
Kupfer	Cu	630	k.A			206			21		
Cadmium	Cd	-	-			116,7 – 143	63,8	33,0	- bis 1,3	1,3	0
Tellur	Te	-	-			99,7 – 135	43,1	35,3	-		
Indium	In	-	4,0 - 5	0	0	- bis 15,5	15,5	0	55,5 – 75	45,0	3,0
Gallium	Ga	-	-						2–7,2	3,2	1,2
Selen	Se	-	-						10 – 39,3	17,4	6,3
Germanium	Ge	-	-			-			-		

Tabelle A2.2: Spezifischer Bedarf kritischer mineralischer Rohstoffe für heutige und zukünftige Photovoltaik-Anlagen.⁴¹⁷

Vergleich des heutigen spezifischen Materialbedarfs in Kilogramm pro Megawatt photovoltaischer Stromleistung sowie eine Abschätzung des Bedarfs für als kritisch angesehene Rohstoffe (gefettet). In den von der KRESSE-Studie genutzten Quellen (*kursiv* = Werte nach Schlegl) bestehen zum Teil unterschiedliche Einschätzungen für den heutigen Rohstoffbedarf, wodurch sich durch die hier getroffene Zusammenfassung bei einigen kritischen Rohstoffen Bandbreiten ergeben. Die Abschätzung des Indiumbedarfs für die Zukunft schließt die mit Zinn dotierten Indiumoxide (ITO, Indiumzinnoxid) aufgrund von anzunehmenden technischen Entwicklungen und damit einhergehender Materialsstitution aus.

geothermisches Kraftwerk			Brennstoffzelle		
Element	Symbol	Materialbedarf	Element	Symbol	Materialbedarf
		[kg/MW]			[kg/MW]
Kupfer	Ta	64	Platin	Pt	67,9
Nickel	Ni	120.155	Ruthenium	Ru	22,0
Molybdän	Mo	7.209	Chrom	Cr	48.323,2
Chrom	Cr	64.405	Nickel	Ni	282,0
Niob	Nb	128	Yttrium	Y	8,4
Titan	Ti	1.634	Lanthan	La	38,0
Kupfer	Cu	3.605	Gadolinium	Gd	1,2
Mangan	Mn	4.325	Samarium	Sm	1,2
			Cer	Ce	8,0
			Kobalt	Co	10,8

Tabelle A2.3: Spezifischer Bedarf kritischer mineralischer Rohstoffe für geothermische Kraftwerke und Brennstoffzellentechnologien.⁴¹⁸ Spezifischer Bedarf an Stahl-Legierungselementen von EGS-Kraftwerken (Enhanced Geothermal Systems)⁴¹⁹ mit einer Auslegung von 50 MW_{el} basierend auf 25 Bohrungen mit je 5 Kilometern Bohrtiefe⁴²⁰ beziehungsweise das Beispiel Brennstoffzelle: spezifischer Materialbedarf in Kilogramm pro Megawatt Leistung.

⁴¹⁷ Aus Wuppertal Institut 2014, S. 156ff.; modifiziert nach Schlegl 2013.

⁴¹⁸ Nach Moss et al. 2013, S. 23 und S. 31.

⁴¹⁹ Enhanced Geothermal System ist der Fachbegriff für eine tiefengeothermische Anlage zur Energiegewinnung, bei der durch technische Maßnahmen, wie der hydraulischen Stimulation (Fracking), die Durchlässigkeit der Gesteine für das Wärmeträgermedium (in der Regel Wasser) im Untergrund verbessert wurde.

⁴²⁰ Aus Moss et al. 2013, S. 66; vergleiche Wuppertal Institut, S. 83.

Motortyp	Metall/ Material	HEV (2012)	HEV (2020-)	PHEV	BEV	FCV	Mild- Hybrid
Permanent- magnet	Neodym (Nd)	0,76	0,91	1,46	2,55	2,92	0,36
	Eisen (Fe)	2,25	2,25	3,6	7,65	8,1	0,90
	Dysprosi- um (Dy)	0,29	0,14	0,22	0,38	0,38	0,05
	Bor (B)	0,025	0,025	0,04	0,085	0,09	0,01
Induktion	Kupfer (Cu)	25	25	40	70	80	10

Tabelle A2.4: Spezifischer Bedarf kritischer mineralischer Rohstoffe für Elektroautos (ohne Batteriesysteme).⁴²¹

Metallischer Rohstoffbedarf in Kilogramm pro Fahrzeug.

Batteriesystem	Metall/Material	BEV	HEV	PHEV-50	FCV
Nickel-Metall- hydrid (NiMH)	Nickel (Ni)	-	6,67	-	-
	Kobalt (Co)	-	1,16	-	-
	Lanthan (La)	-	1,16	-	-
	Cer (Ce)	-	0,77	-	-
	Neodym (Nd)	-	0,23	-	-
	Praseodym (Pr)	-	0,08	-	-
	Samarium (Sm)	-	0,08	-	-
Nickel-Kobalt-Alumi- nium (NCA)	Kupfer (Cu)	6,23	0,13	1,06	0,17
	Kobalt (Co)	46,65	0,97	7,97	1,26
	Lithium (Li)	8,44	0,18	1,44	0,23
	Aluminium (Al)	1,35	0,03	0,23	0,04
	Grafit	72,19	1,50	12,33	1,96
	Kupfer (Cu; Anode)	66,82	1,39	11,41	1,81
Lithium-Eisen- Phosphat (LFP)	Lithium (Li)	4,52	0,09	0,77	0,12
	Eisen (Fe)	39,08	0,81	6,68	1,06
	Grafit	85,94	1,79	14,68	2,33
	Kupfer (Cu; Anode)	79,54	1,66	13,59	2,15
Lithium-Mangan- Spinell (LMS)	Lithium (Li)	7,81	0,16	1,33	0,21
	Mangan (Mn)	60,07	1,25	10,26	1,63
	Kupfer (Cu; Anode)	71,08	1,48	12,14	1,93
	Titan (Ti)	38,78	0,81	6,63	1,05
Nickel-Kobalt- Mangan (NCM)	Lithium (Li)	4,64	0,10	0,79	0,13
	Nickel (Ni)	14,43	0,30	2,46	0,39
	Kobalt (Co)	13,91	0,29	2,38	0,38
	Mangan (Mn)	12,88	0,27	2,20	0,35
	Grafit	53,08	1,11	9,07	1,44
	Kupfer (Cu; Anode)	49,13	1,02	8,39	1,33

Tabelle A2.5: Spezifischer Bedarf kritischer mineralischer Rohstoffe für Fahrzeug-Batteriesysteme.⁴²² Metallischer Rohstoffbedarf in Kilogramm pro Fahrzeug.

⁴²¹ Nach Moss et al. 2013, S. 56.

⁴²² Nach Moss et al. 2013, S. 52 ff.

Gruppe nach IUPAC beziehungsweise CAS

	1/IA	2/IIA	3/IIIB	4/IVB	5/VB	6/VIB	7/VIIB	8/VIII	9/IX	10/VIII	11/IB	12/IIIB	13/IIIA	14/IVA	15/VA	16/VIA	17/VIIA	18/VIIIA
1	1 H																	2 He
2	3 Li 3(6)	4 Be 2(5)											5 B 0(5)	6 C 1(3)a 0(1)b	7 N 0(1)	8 O 0(0)	9 F 2(4)	10 Ne
3	11 Na 0(1)	12 Mg 2(4)											13 Al 1(3)	14 Si 1(3)c 0(1-3)d	15 P 1(1)	16 S 0(0)	17 Cl 0(0)	18 Ar
4	19 K 0(1)	20 Ca 0(1)e 0(2)f	21 Sc 1(1)g 2(2)h	22 Ti 1(6)	23 V 0(6)	24 Cr 2(6)	25 Mn 2(7)	26 Fe 0(3)	27 Co 3(6)	28 Ni 1(6)	29 Cu 0(5)	30 Zn 0(4)	31 Ga 3(7)	32 Ge 3(6)	33 As 0(1)	34 Se 1(4)	35 Br 0(1)	36 Kr
5	37 Rb 0(2)	38 Sr 1(3)	39 Y 2(2)g 3(3)h	40 Zr 2(4)	41 Nb 5(7)	42 Mo 1(6)	43 Tc	44 Ru 0(1)i 2(2)k	45 Rh 0(1)i 2(2)k	46 Pd 1(4)j 3(3)k	47 Ag 1(4)	48 Cd 0(2)	49 In 5(7)	50 Sn 2(4)	51 Sb 3(5)	52 Te 0(5)	53 I 0(1)	54 Xe
6	55 Cs 0(2)	56 Ba 0(5)	57-71 La-Lu	72 Hf 0(3)	73 Ta 2(6)	74 W 5(6)	75 Re 1(5)	76 Os 0(1)i 2(2)k	77 Ir 0(1)i 2(2)k	78 Pt 3(4)j 3(3)k	79 Au 1(2)	80 Hg 1(2)	81 Tl 0(2)	82 Pb 0(3)	83 Bi 1(4)	84 Po 0(0)	85 At 0(0)	86 Rn
7	87 Fr 0(0)	88 Ra 0(0)	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
				57 La 1(1)g 3(3)h	58 Ce 1(1)g 3(3)h	59 Pr 0(0)g 3(3)h	60 Nd 3(3)g 3(3)h	61 Pm	62 Sm 2(2)g 3(3)h	63 Eu 2(3)g 3(3)h	64 Gd 0(1)g 3(3)h	65 Tb 2(3)g 3(3)h	66 Dy 1(1)g 3(3)h	67 Ho 0(1)g 3(3)h	68 Er 0(0)g 3(3)h	69 Tm 0(0)g 3(3)h	70 Yb 1(1)g 3(3)h	71 Lu 0(1)g 3(3)h
				89 Ac 0(0)	90 Th 0(0)	91 Pa 0(0)	92 U 0(0)	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

1 ← Ordnungszahl
 H ← Elementsymbol
 0(0) ← Anzahl Studien*

■ ≤ 1/3 ■ Datenabdeckung unzureichend
 ■ > 1/3, ≤ 2/3 □ Keine Berücksichtigung
 ■ > 2/3

*in einigen Studien wurden mineralische Rohstoffe oder Metallgruppen anstatt als einzelnes Element nach folgender Systematik analysiert:

Kohlenstoff: a – Diamant, b – Grafit; Silizium: c – elementar, d – Silikate und Ton;

Kalzium: e – Kalkstein, f – Gips; Elemente der Seltenen-Erden-Elemente: g – elementar, h – als Bestandteil der Gruppe der Seltenen-Erden-Elemente;

Platingruppenmetalle (PGM): i – elementar, k – als Bestandteil der Platingruppenmetalle

Abbildung A2.1: Erdmann und Graedel-Studie⁴²³ – Vergleich von sieben Kritikalitätsstudien. Im Vergleich zu Abbildung A2.2 wurden hier Elemente zum Teil nur in Form des mineralischen Vorkommens des Rohstoffes oder im Kontext einer gesamten Metallgruppe betrachtet (siehe entsprechende Kennzeichnung a bis k; dies gilt vor allem für die Seltene-Erden-Elemente und die Platingruppenmetalle).

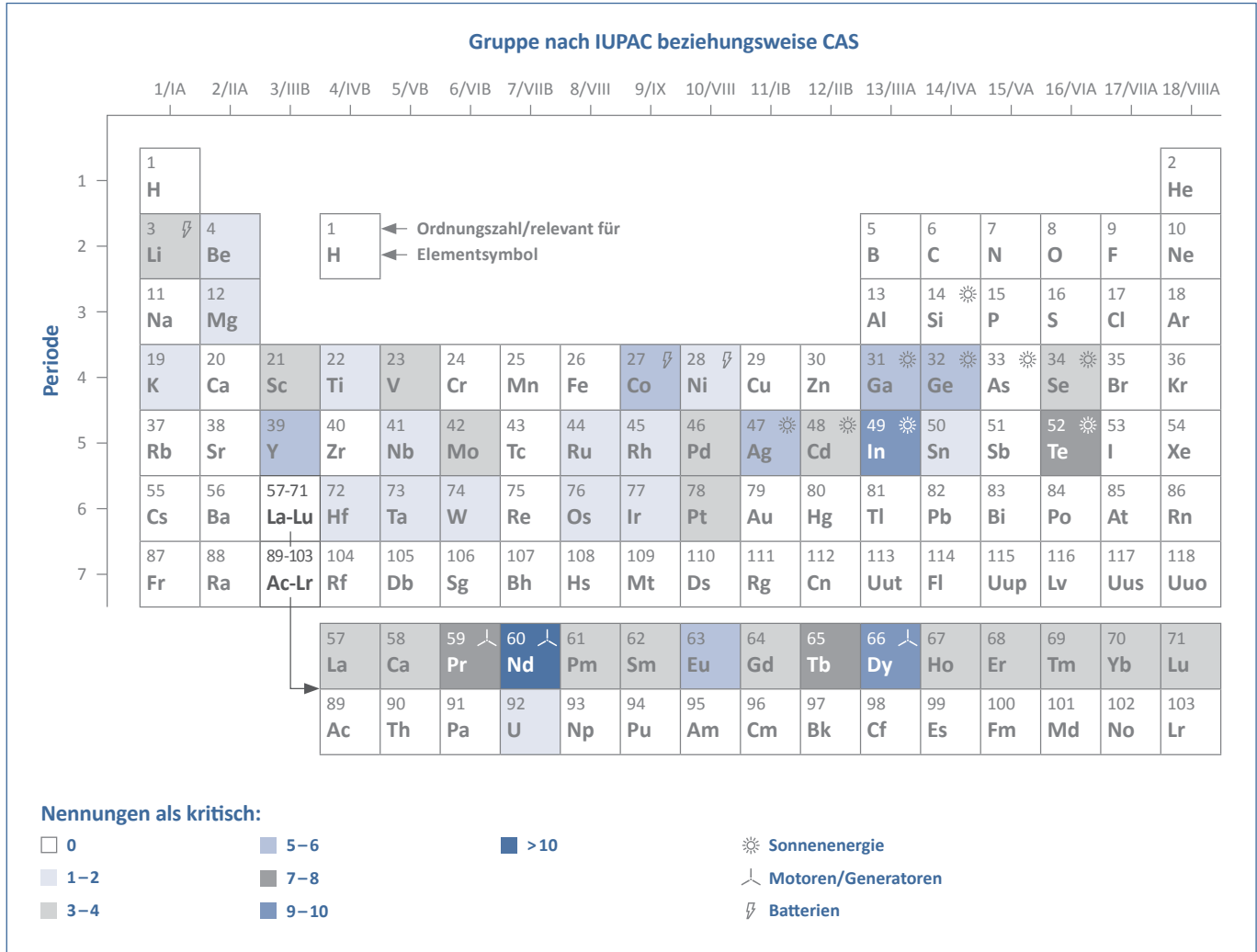


Abbildung A2.2: Metaanalyse des Wuppertal Instituts.⁴²⁴ Vergleich von zwölf Studien über kritische Rohstoffe, die für die Transformation des deutschen Energieversorgungssystems relevant sind.

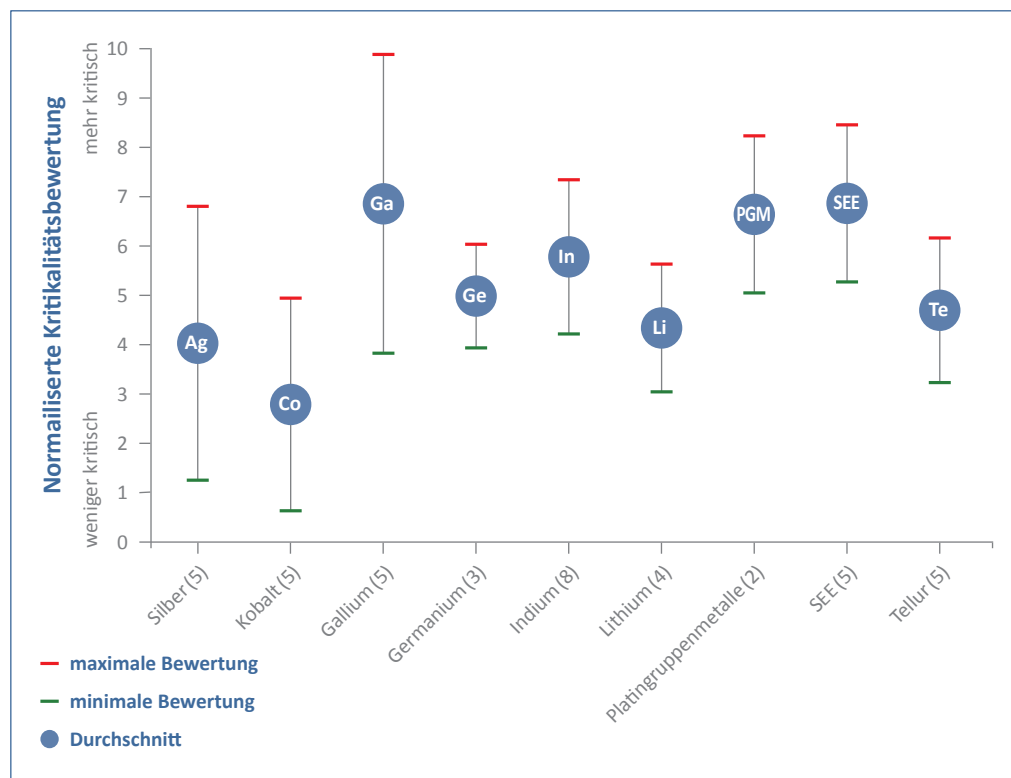


Abbildung A2.3: Metaanalyse des UK Energy Research Centre.⁴²⁵ Hier wurden aus 11 Studien normalisierte Kritikalitätsbandbreiten für 9 Elemente von Niedrigkohlenstoff-Energetechnologien abgeleitet. Die Werte in Klammern geben an, in wie vielen der Kritikalitätsstudien das jeweilige Element als kritisch eingestuft wurde.

Anhang 3: Liste der Studien, die von der KRESSE-Studie⁴²⁶, von Erdmann und Graedel⁴²⁷ und vom UK Energy Research Centre⁴²⁸ für ihre Vergleichsstudien benutzt wurden

(Unterstrichen sind die Studien, die in mindestens zwei der betrachteten Metastudien verwendet wurden; aufgrund von Abweichungen durch unterschiedliche Zitierweisen werden für die KRESSE-Studie zunächst jeweils der Titel und das Zitat entsprechend den Angaben in der Studie genannt.)

⁴²⁵ UKERC 2013, S. 19.

⁴²⁶ Wuppertal Institut 2014.

⁴²⁷ Erdmann und Graedel 2011.

⁴²⁸ UKERC 2013.

1) KRESSE-Studie des Wuppertal Instituts (2014)

Achzet et al. 2011

Achzet, B./Reller, A./Zepf, V./Rennie, C./Ashfield, M./Simmons, J.: Materials critical to the Energy Industry. An introduction (Report for the BP Energy Sustainability Challenge), Universität Augsburg 2011. URL: http://www.physik.uni-augsburg.de/lehrstuehle/rst/downloads/Materials_Handbook_Rev_2012.pdf [Stand: 28.10.2014].

APS/MRS 2011

American Physical Society/Material Research Society (APS/MRS): Securing Materials for Emerging Technologies (Bericht der APS Panel on public affairs und der MRS), Washington DC 2011.

Angerer et al. 2009-2

Angerer, G./Erdmann, L./Marscheider-Weidemann, F./Lullmann, A./Scharp, M./Handke, V./Marwede, M.: Raw Materials for emerging Technologies (englische Zusammenfassung des Bericht des Fraunhofer ISI (Institut für System- und Innovationsforschung) und des IZT (Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung) im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2009. URL: <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-en/service/presseinfos/2009/prio9-02.php> [Stand: 27.10.2014].

Angerer et al. 2009-3

Angerer, G./Erdmann, L./Marscheider-Weidemann, F./Lullmann, A./Scharp, M./Handke, V./Marwede, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage (Bericht des Fraunhofer ISI (Institut für System- und Innovationsforschung) und IZT (Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung) im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2009. URL: <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-en/service/presseinfos/2009/prio9-02.php> [Stand: 27.10.2014].

BGS 2012

British Geological Survey: *Risk List 2012 – Current supply risk index for chemical elements or element groups which are of economic value*, Nottingham, UK.: British Geological Survey 2012. URL: <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/risklist.html> [Stand: 04.12.2014].

DOE 2010

US Department of Energy: *Critical Materials Strategy*, Washington DC 2010. URL: http://www.energy.gov/sites/prod/files/piprod/documents/cms_dec_17_full_web.pdf [Stand: 28.10.2014].

EC 2010

European Commission: *Critical raw materials for the EU* (Report of the Ad-hoc-Working Group on defining critical Raw Materials), Brüssel 2010. URL: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf [Stand: 01.05.2014].

- Future Metal Demand from Photovoltaic Cells and Wind Turbines, Investigating the Potential Risk of Disabling a Shift to Renewable Energy Systems (European Parliament 2011a)

European Parliament 2011

European Parliament 2011: Future Metal Demand from Photovoltaic Cells and Wind Turbines Investigating the Potential Risk of Disabling a Shift to Renewable Energy Systems, Brüssel: Science and Technology Options Assessment (STOA) 2011. URL: http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOLJOIN_ET%282011%29471604_EN.pdf [Stand: 13.05.2014; aktuell nicht mehr gültig].

Frondel et al. 2006

Frondel, M./Grösche, P./Huchtemann, D./Oberheitmann, A./Peters, J./Angerer, G./Sartorius, C./Buchholz, P./Röhling, S./Wagner, M.: *Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen*, (Endbericht an das BMWi, Forschungsprojekt Nr.09/05), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)/ Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI)/Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) 2006.

Moss et al. 2011

Moss, R.L./Tzimas, E./Kara, H./Willis, P./Kooroshy, J.: *Critical Metals in Strategic Energy Technologies* (Report EUR 24884 EN), Petten, Niederlande: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport (JRC-IET): 2011.

NRC 2007

National Research Council of the National Academies: *Minerals, critical minerals, and the U.S. economy. Prepublication Version*, Washington D.C.: The National Academies Press 2007. URL: http://www.nma.org/pdf/101606_nrc_study.pdf [Stand: 27.10.2014].

Schüler 2011

Schüler, D.: *Seltene Erden – Daten & Fakten* (Hintergrundpapier), Berlin: Öko-Institut e.V. 2011.

Supersberger/Ritthoff 2010

Supersberger, N./Ritthoff, M.: *Rohstoffkonflikte nachhaltig vermeiden: Rohstoffe zwischen Angebot und Nachfrage - Teilbericht 2* (Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie und adelphi im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 370819 102), Wuppertal 2010.

2) Erdmann und Graedel (2011)

Bae 2010

Bae, J.-C.: „Strategies and Perspectives for Securing Rare Metals in Korea“. In: *Critical Elements for New Energy Technologies* (Tagungsband des Energy Initiative Workshops, 29. April 2010), Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology (MIT) 2010. URL: http://web.mit.edu/miteicomm/web/reports/critical_elements/CritElem_Report_Final.pdf [Stand: 04.12.2014].

EC 2010

European Commission: Critical raw materials for the EU (Report of the Ad-hoc-Working Group on defining critical Raw Materials), Brüssel 2010. URL: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf [Stand: 01.05.2014].

Halada et al. 2008

Halada, K./Shimida, M./Ijima, K.: „Forecasting of the Consumption of Metals up to 2050“. In: *Mater. Trans.*, 49: 3, 2008, S. 402–410. URL: <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.ML200704>.

Morley/Eatherley 2008

Morley, N./Eatherley, D.: Material Security: Ensuring resource availability to the UK economy, Chester, UK: Resource Efficiency KTN/Oakdene Hollins/C-Tech Innovation 2008.

Shinko Research 2009

Shinko Research (Mitsubishi UFJ Research and Consulting): *Trend Report of Development in Materials for Substitution of Scarce Metals* (Report 08007835-0080078380), Tokio: New Energy and Industrial Technology Development Organisation (NEDO) 2009.

NRC 2008

National Research Council of the National Academies: Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy, Washington, D.C.: The National Academies Press 2008.

Pfleger et al. 2009

Pfleger, P./Lichtblau, K./Bardt, H./Reller, A.: *Rohstoffsituation Bayern: Keine Zukunft ohne Rohstoffe. Strategien und Handlungsoptionen* (Studie der IW Consult GmbH), München: Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V. 2009.

3) UK Energy Research Centre (2013) (Unterstrichen sind die Studien, die auch im Vergleich der KRESSE-Studie und von Erdmann und Graedel (2011) verwendet wurden.)

AEA Technology Plc 2010

AEA Technology Plc: *Review of the Future Resource Risks Faced by UK Business and an Assessment of Future Viability* (Department for Environment, Food and Rural Affairs, Defra) London, UK: Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra) 2010.

Angerer et al. 2009-2

Angerer, G./Erdmann, L./Marscheider-Weidemann, F./Lullmann, A./Scharp, M./Handke, V./Marwede, M.: Raw Materials for emerging Technologies (englische Zusammenfassung des Bericht des Fraunhofer ISI (Institut für System- und Innovationsforschung) und des IZT (Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung) im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2009. URL: <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-en/service/presseinfos/2009/pri09-02.php> [Stand: 27.10.2014].

Angerer et al. 2009-3

Angerer, G./Erdmann, L./Marscheider-Weidemann, F./Lullmann, A./Scharp, M./Handke, V./Marwede, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage (Bericht des Fraunhofer ISI (Institut für System- und Innovationsforschung) und IZT (Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung) im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2009. URL: <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-en/service/presseinfos/2009/pri09-02.php> [Stand: 27.10.2014].

BGS 2011

British Geological Survey: *Risk List 2011*, Nottingham, UK: BGS 2011.

DOE 2010

US Department of Energy: *Critical Materials Strategy*, Washington DC 2010. URL: http://www.energy.gov/sites/prod/files/piprod/documents/cms_dec_17_full_web.pdf [Stand: 28.10.2014].

DOE 2011-1

US Department of Energy: *Critical Materials Strategy*, Washington DC 2011. URL: http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf [Stand 27.06.14].

EC 2010

European Commission: *Critical raw materials for the EU* (Report of the Ad-hoc-Working Group on defining critical Raw Materials), Brüssel 2010. URL: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf [Stand: 01.05.2014].

Graedel et al. 2012

Graedel, T. E./Barr, R./Chandler, C./Chase, T./Choi, J./Christoffersen, L./Friedlander, E./Henly, C./ Jun, C./Nassar, N. T./Schechner, D./Warren, S./Yang, M.-Y./Zhu, C.: „Methodology of Metal Criticality Determination“. In: *Environmental Science & Technology*, 46: 2, 2012, S. 1063–1070.

Moss et al. 2011

Moss, R. L./Tzimas, E./Kara, H./Willis, P./Kooroshy, J.: *Critical Metals in Strategic Energy Technologies* (Report EUR 24884 EN), Petten, Niederlande: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport (JRC-IET): 2011.

Morley/Eatherley 2008

Morley, N./Eatherley, D.: *Material Security: Ensuring resource availability to the UK economy*, Chester, UK: Resource Efficiency KTN/Oakdene Hollins/C-Tech Innovation 2008.

NRC 2007

National Research Council of the National Academies: *Minerals, critical minerals, and the U.S. economy. Prepublication Version*, Washington D.C.: The National Academies Press 2007. URL: http://www.nma.org/pdf/101606_nrc_study.pdf [Stand: 27.10.2014].

SEPA 2011

Scottish Environmental Protection Agency: *Raw materials critical to the Scottish economy* (Report by AEA Technology for the SEPA and the Scotland and Northern Ireland Forum For Environmental Research, SNIF-FER), Edinburgh, Scotland 2011.

Glossar

Bauwürdigkeitsschwelle

Bei Metallagerstätten gibt es normalerweise Zonierungen, die sich durch den jeweiligen Rohstoffgehalt und damit hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit einer Gewinnung unterscheiden. Dazwischen muss die Grenze definiert werden, bis zu der es sich lohnt, die Erze abzubauen. Dies ist die Bauwürdigkeitsgrenze oder Bauwürdigkeitsschwelle. Die niedrigste Bauwürdigkeitsgrenze ist diejenige, bei der gerade noch die Betriebskosten erwirtschaftet werden.

beibrechende Elemente

Die Vorkommen beibrechender Elemente sind an einen anderen Hauptwertstoff (Primärrohstoff) gebunden. Die mineralischen Erzphasen von Hauptwertstoff und Beiprodukt können dabei eng miteinander verwachsen sein, oder das beibrechende Element ist fest im Kristallgitter des Primärrohstoffs eingebaut. Eine Trennung der Elemente kann dann oftmals nur unter sehr hohem Energieaufwand möglich sein. Die Gewinnung eines beibrechenden Elements ist somit zwangsläufig an die Gewinnung des Primärrohstoffs gekoppelt. Sie werden daher von Rohstoffen unterschieden, die eigenständig in Lagerstätten auftreten.

Fracking

Fracking (Hydraulic Fracturing) ist eine hydraulische Stimulationsmethode, um wenig durchlässige Gesteine unter hohem Flüssigkeitsdruck aufzubrechen und dadurch zum Beispiel die im Gestein vorhandenen Kohlenwasserstoffe gewinnen zu können. Die Technik wird in Bohrungen der Kohlenwasserstoffgewinnung und Tiefengeothermie angewendet. In der jeweiligen Umsetzung gibt es aber erhebliche Unterschiede, beispielsweise in der Zusammensetzung und dem Volumen der eingesetzten Frackingflüssigkeit.

Gewichtetes Länderrisiko (GLR)

Das gewichtete Länderrisiko für einen Rohstoff oder ein Zwischenprodukt setzt die individuellen Risikoeinschätzungen der einzelnen Lieferländer, die auf Basis

des World Governance Index bestimmt werden, ins Verhältnis zu deren Anteil an der Weltproduktion.

Good Governance

Vereinfacht als „gute Regierungsführung“ übersetzt, adressiert Good Governance zunächst die Bedeutung der Verantwortung der Regierung, also den Führungsstil im Sinne des gesellschaftlichen Allgemeinwohls zu erachten. Ein umfassendes Verständnis von Good Governance geht über das Handeln von Regierungen allein hinaus und bezieht das Verhältnis zu staatlichen und nicht-staatlichen Akteuren mit ein. Der Begriff „Governance“ umfasst die Art und Weise, wie in einem Staat Entscheidungen getroffen, politische Inhalte formuliert und umgesetzt werden – also alle Steuerungsprozesse, die eingeleitet werden, um kollektive Aufgaben technischer- und gesellschaftlicherseits im Zusammenspiel von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft zu identifizieren und umzusetzen. Während der Begriff des Regierens und Steuerns („Government“, „Governing“) den Fokus auf Regierungsakteure legt, bezieht sich der Begriff „governance“ auf die Prozesse zur Erreichung der Ziele und die Beziehungen zwischen den verschiedenen Akteuren, die daran beteiligt sind – Regierungsakteure, Industrieakteure, Wissenschaftsakteure und die Zivilgesellschaft.⁴²⁹

Die Förderung von Good Governance bedeutet, die politischen Rahmenbedingungen für eine sozial, ökologisch und marktwirtschaftlich erfolgreiche Entwicklung zu schaffen.

Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI)

Der Herfindahl-Hirschmann-Index ist eine Kennzahl zur Konzentrationsmessung. Der Absatz eines Produktes teilt sich auf die Anzahl der jeweiligen Produzenten auf. Diese Verteilung ist in der Regel nicht gleichmäßig. Die resultierende Konzentration der

⁴²⁹ Vgl. Renn 2015: In Teilen angelehnt an die Analyse der AG Gesellschaft des ESYs-Projektes.

Weltproduktion lässt sich berechnen, indem man den Marktanteil jedes Wettbewerbers quadriert und anschließend alle Werte summiert. In den Wirtschaftswissenschaften ist es üblich, den Index nicht in Prozent, sondern mit Werten zwischen 0 und 10.000 anzugeben, wobei 10.000 einem Monopol entspricht. Werte über 2.500 gelten als kritisch.

Kritikalität

Wenn es um die Verfügbarkeit von Rohstoffen geht, werden häufig die Begriffe „kritische“ und „wirtschaftsstrategische“ Rohstoffe verwendet. Die Bezeichnung „kritisch“ bezieht sich dabei nicht auf den jeweiligen Rohstoff an sich oder die Größe der Reserven oder Ressourcen, sondern darauf, inwieweit der Rohstoff verfügbar und wie wichtig er für die Wirtschaft ist. Hierbei spielen die Herkunftsländer und ihre politische Stabilität als auch Angebotskonzentrationen eine wichtige Rolle. Auch der Umwelteinfluss bei der Gewinnung von Rohstoffen wird oftmals in die Bewertung miteinbezogen. Im englischsprachigen Raum hat sich in Bezug auf die Rohstoffverfügbarkeit die Verwendung des Begriffs „criticality“ durchgesetzt. Er wurde hier daher im Sprachgebrauch auch im Deutschen übernommen. Es ist in diesem Kontext aber anzumerken, dass die Verwendung des Begriffs „Kritikalität“ im Kontext von Rohstoffverfügbarkeiten nichts mit der klassischen Definition in der Physik gemein hat.

Lead Time (Vorlaufzeit)

Die Vorlaufzeit für ein Bergbauprojekt ist die Zeit, die seit der Entdeckung einer Lagerstätte bis zu Beginn der Produktion hieraus benötigt wird. Aktuell beträgt sie durchschnittlich etwa zehn Jahre. Die Lead Time kann aufgrund der Veränderungen von wirtschaftlichen (Preisverfall oder -steigerung), technischen (andere Umweltauflagen, Verbesserung von Gewinnungstechnologien) oder gesellschaftlichen Rahmenbedingungen (Widerstände der Bevölkerung) beeinflusst werden. Entsprechend kann die Entwicklung von Bergbauproduktionen auch vollständig unterbrochen werden.

Nachhaltige Rohstoffversorgung

Unter einer nachhaltigen Rohstoffversorgung wird hier verstanden, dass die Gewinnung von Rohstoffen mit möglichst geringen Einwirkungen auf die Umwelt und die Gesellschaft verbunden ist. Im Zuge des Bergbaus, also der primären Rohstoffgewinnung, der weiterhin unverzichtbar für unsere Rohstoffversorgung sein wird, ist vor allem die Umweltbeeinflussung

nicht zu vermeiden. Es können jedoch Maßnahmen in Form von Umweltauflagen ergriffen werden, die hier insgesamt mindernd wirken. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist die von Bergbau betroffene Gesellschaft in den Entscheidungsprozess miteinzubeziehen und an den Gewinnen zu beteiligen. Somit ist kontextbezogen auch der wirtschaftliche Aspekt der Nachhaltigkeit enthalten, in dem Sorge getragen werden sollte, dass der Bergbau nicht nur einzelnen Akteuren Gewinne einbringt, sondern auch dem Allgemeinwohl der rohstofffördernden Gesellschaft dient.

Peak

Der Begriff Rohstoffpeak steht für das Maximum der Förderbarkeit eines Rohstoffes aufgrund ausgehender Rohstoffvorkommen. Der Begriff ist im Wesentlichen aus dem Kontext der von M. K. Hubbert 1956 prognostizierten Endlichkeit der Erdölvorkommen – Peak Oil – entstanden und wird mittlerweile auch in Hinsicht auf andere Rohstoffe, insbesondere die mineralischen Rohstoffe, wie zum Beispiel Phosphor, verwendet.

Primäre Rohstoffgewinnung

Der Begriff bezieht sich auf die Gewinnung von Rohstoffen durch Bergbau. Er unterscheidet sich von der sekundären Rohstoffgewinnung.

Reserven, Ressourcen, Geopotenziale

Reserven sind bekannte unter aktuellen Bedingungen wirtschaftlich abbaubare Rohstoffvorkommen; sie können sich durch Zufunde erhöhen oder beispielsweise durch Preisverfall verringern. Ressourcen sind bekannte Vorkommen, die aber nach aktuellem technischem Stand nicht wirtschaftlich abgebaut werden können. Geopotenziale sind Vorkommen, die entweder noch nicht oder nur zum Teil entdeckt sind. Somit sind über deren wirtschaftliche Abbaubarkeit und Umfang zum jeweils aktuellen Zeitpunkt keine Aussagen machbar. Sie stellen also die große Unbekannte dar. Alle drei Größen sind dynamisch und verändern sich ständig. Ihre Entwicklung hängt dabei beispielsweise von den aktuellen wirtschaftlichen Bedingungen (wie Preisen), technischem Fortschritt oder auch Umweltauflagen ab.

Regelkreis der Rohstoffversorgung

Der Regelkreis der Rohstoffversorgung beschreibt die Marktmechanismen auf Angebots- und Nachfrageseite, die aufgrund von Preissignalen beziehungsweise Rohstoffverknappungen eingesetzt werden, um ein neues Marktgleichgewicht zu erlangen.

Rückwärtsintegration

Rückwärtsintegration bedeutet, dass ein Unternehmen eine oder mehrere vorgelagerte Fertigungsstufe(n) selbst übernimmt (Änderung der Input-Situation des Unternehmens): Das Unternehmen gewinnt oder stellt die bisher zugekauften Güter, die dann anschließend vom Unternehmen weiterverarbeitet werden, nun selbst her.

Sekundäre Rohstoffgewinnung

Die sekundäre Rohstoffgewinnung ist die Gewinnung von Rohstoffen aus Altmaterialien, wie zum Beispiel Produkten (Autos, Computer) und Infrastruktureinrichtung (Straßen, Versorgungsleitungen), die in der Technosphäre als Abfälle und Schrotte anfallen.

„Shelved“ Lagerstätten

Der Begriff „shelved“ wird im Zusammenhang mit einer Lagerstätte verwendet, wenn im Laufe der Exploration oder der Erarbeitung der Machbarkeitsstudie für einen Rohstoffabbau Situationen eintreten (meist Verschlechterung der wirtschaftlichen Aussichten oder negative Erkenntnisse über die Lagerstätte selbst), die zu einer Unterbrechung der Arbeiten führen. Die Lagerstätte steht dann sozusagen „im Regal“ und kann jederzeit wieder in Angriff genommen werden. Die Vorlaufzeiten bis zur Produktionsaufnahme aus einer im Status „shelved“ befindlichen Lagerstätte können daher unter Umständen sehr viel kürzer sein als bei neuen Bergbauprojekten.

Technosphäre

Technosphäre oder auch Anthroposphäre sind Synonyme für den Bereich des menschlichen Handelns. Sie umfassen alles, was der Mensch geschaffen hat, und beinhalten zum Beispiel Massenprodukte wie Autos oder Elektronik, Infrastrukturen wie Bauwerke oder Versorgungssysteme, Maschinen, aber auch Abfall- oder Bergehalden.

World Governance Index (WGI)

Der World Governance Index der Weltbank ist ein für jedes Land abgeleiteter Index, der folgende sechs Indikatoren als Bewertungsgrundlage heranzieht: 1) „voice and accountability“ (Mitspracherecht und Verantwortung) misst, inwieweit die Bürger eines Landes in der Lage sind, an der Wahl der Regierung zu partizipieren, ferner werden die Faktoren Meinungs-, Presse- und Versammlungsfreiheit berücksichtigt; 2) „political stability and absence of violence“ (politische

Stabilität) drückt die Wahrscheinlichkeit aus, ob die Regierung durch nicht-konstitutionelle oder gewalttätige Mittel (einschließlich Terrorismus) destabilisiert werden kann; 3) „government effectiveness“ (Leistungsfähigkeit der öffentlichen Hand) bewertet die Qualität der öffentlichen Dienste und Behörden sowie ihre Unabhängigkeit gegenüber politischer Einflussnahme; 4) „regulatory quality“ (regulatorische Qualität) bewertet die Fähigkeit der Regierung, die Entwicklung des privaten Sektors durch Erlass von Gesetzen und Vorschriften zu ermöglichen; 5) „rule of law“ (Rechtsstaatlichkeit) bewertet das Vertrauen in und die Einhaltung gesellschaftlicher Regeln. Darin eingeschlossen ist die Durchsetzung von Verträgen und Eigentumsrechten. Zudem fließen die Qualität von Gerichten und Polizei sowie die Wahrscheinlichkeit von Verbrechen und Gewalt ein; 6) „control of corruption“ (Korruptionskontrolle) erfasst, inwieweit die öffentliche Hand durch private Profitinteressen bestimmt wird. Dies umfasst Korruption aller Größenordnungen sowie die Vereinnahmung des Staates durch Eliten und private Interessen. Generell gilt: Je niedriger der World Governance Index ist, desto höher ist das Länderrisiko.

Literatur

acatech 2015

Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech): *Hydraulic Fracturing – Eine Technologie in der Diskussion* (acatech Position), 2015. URL: <http://www.acatech.de/de/projekte/laufende-projekte/hydraulic-fracturing-eine-technologie-in-der-diskussion.html> [Stand: 01.10.2015].

Achzet et al. 2011

Achzet, B./Reller, A./Zepf, V./Rennie, C./Ashfield, M./Simmons, J.: *Materials critical to the Energy Industry. An introduction* (Report for the BP Energy Sustainability Challenge), Augsburg: Universität Augsburg 2011. URL: http://www.physik.uni-augsburg.de/lehrtstuehle/rst/downloads/Materials_Handbook_Rev_2012.pdf [Stand: 28.10.2014].

AGEB 2015

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.: *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2014*, Berlin 2015. URL: <http://www.ag-energiebilanzen.de/> [Stand: 23.03.2015].

Andrulleit et al. 2010

Andrulleit, H./Babies, H. G./Cramer, B./Krüger, M./Meßner, J./Rempel, H./Schlömer, S./Schmidt, S.: „Konventionell versus nicht-konventionell: Weltweite Ressourcen und Entwicklungen des ‚Hoffnungsträgers‘ Erdgas“. In: *DGMK-Tagungsbericht*, Celle, 12.–13. April 2010.

Anger 1990

Anger, G.: „Deutscher Auslandsbergbau – unternehmerische Aktivitäten und verbandliche Gemeinschaftsaufgaben“. In: *Jahrbuch Bergbau, Öl und Gas, Elektrizität, Chemie*, 1990/91, S. 1–26.

Angerer et al. 2009-1

Angerer, G./Marscheider-Weisemann, F./Wendl, M./Wietschel, M.: *Lithium für Zukunftstechnologien – Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität*, Karlsruhe 2009. URL: <http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn:nbn:de:0011-n-1233149.pdf> [Stand: 28.10.2014].

Angerer et al. 2009-2

Angerer, G./Erdmann, L./Marscheider-Weidemann, F./Lullmann, A./Scharp, M./Handke, V./Marwede, M.: *Raw Materials for emerging Technologies*, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2009. URL: <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-en/service/presseinfos/2009/pri09-02.php> [Stand: 27.10.2014].

Angerer et al. 2009-3

Angerer, G./Erdmann, L./Marscheider-Weidemann, F./Lullmann, A./Scharp, M./Handke, V./Marwede, M.: *Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage*, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2009. URL: <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-en/service/presseinfos/2009/pri09-02.php> [Stand: 27.10.2014].

Angerer et al. 2010

Angerer, G./Mohring, A./Marscheider-Weidemann, F./Wietschel, M.: *Kupfer für Zukunftstechnologien – Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität*, Karlsruhe 2010.

APS/MRS 2011

American Physical Society/Material Research Society: *Securing Materials for Emerging Technologies*, Washington DC 2011.

Banwart 2011

Banwart, S.: „Save our Soils“. In: *Nature*, 474, 2011, S. 151–152.

Barthel et al. 1991

Barthel, F./Busch, K./Könnecker, K./Thoste, V./Wagner, H.: „Zwanzig Jahre Explorationsförderung für mineralische Rohstoffe“. In: *Geologisches Jahrbuch Reihe A*, Heft 127, 1991, S. 271–288.

Bast et al. 2012

Bast, U./Treffer, F./Thüringen, C./Elwert, T./Marscheider-Weidemann, F.: „Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrantrieben“. In: Thomé-Kozmiensky, K.J./Goldmann, D.: *Recycling und Rohstoffe* (Bd. 5), Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky 2012, S. 699–706.

BDI 2015

Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.: *Anforderungen an eine ganzheitliche und nachhaltige Rohstoffpolitik – BDI Grundsatzpapier zur Rohstoffpolitik im 21. Jahrhundert*, Berlin: BDI 2015.

Béland/Tiagi 2009

Béland, L. P./Tiagi, R.: *Economic Freedom and the „Resource Curse“ – An Empirical Analysis* (Studies in Mining Policy), Vancouver, Kanada: Fraser Institute 2009. URL: <http://www.fraserinstitute.org/research-news/display.aspx?id=12972> [Stand: 15.01.2015].

BGR/DIW 1999

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe/
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung: *Auswirkungen der weltweiten Konzentrierung in der Bergbauproduktion auf die Rohstoffversorgung der deutschen Wirtschaft* (Gemeinsamer Bericht zum Forschungsvorhaben Nr. 26/97, Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung 1999, S. 253–269.

BGR 2012

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe:
Abschätzung des Erdgaspotenzials aus dichten Tongesteinen (Schiefergas) in Deutschland, Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2012.

BGR 2014-1

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: *BGR-Datenbank*, Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2014.

BGR 2014-2

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe:
Deutschland – Rohstoffsituation 2013, Hannover 2014.

BGR 2014-3

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: *Energiestudie 2014: Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen* (18), Hannover 2014.

BGR 2015

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: *BGR-Datenbank*, Hannover 2015.

BGR 2016-1

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): *Human Rights Risks in Mining. A Baseline Study*. Studie erstellt durch die Max-Planck-Stiftung für Internationalen Frieden und Rechtsstaatlichkeit, 2016.

BGR 2016-2

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: *Schieferöl und Schiefergas in Deutschland – Potenziale und Umweltaspekte*, Hannover 2016.

Bizzi 2007

Bizzi, L.: „Minerals Exploration in Brazil: the Perspective of a major Mining Company“. In: *BHP Billiton South American Minerals Exploration Group, ADIMB – Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira Exploration manager's meeting*, April 2007. URL: <http://www.adimb.com.br/eventos/gerentes/pdf/bizzi.pdf> [Stand: 21.10.2014].

Bleischwitz 2010

Bleischwitz, R.: „International Economics of Resource Productivity – Relevance, Measurement, empirical Trends, Innovation, Resource Policies“. In: *Int. Economics and Economic Policy*, 7: 2–3, 2010, S. 227–244.

Bley 2009

Bley, T. (Hrsg.): *Biotechnologische Energiewandlungen: Gegenwärtige Situation, Chancen und künftiger Forschungsbedarf* (acatech Diskutiert), Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2009.

BMBF 2003

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft (WING) – Rahmenprogramm des BMBF*, Bonn: BMBF 2003. URL: http://www.bmbf.de/pub/rahmenprogramm_wing.pdf [Stand: 29.10.2014].

BMBF 2009

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Forschung für nachhaltige Entwicklungen (FONA) – Rahmenprogramm des BMBF*, Bonn, Berlin: BMBF 2009, S. 59. URL: http://www.fona.de/mediathek/pdf/forschung_nachhaltige_entwicklungen_neu.pdf [Stand: 29.10.2014].

BMBF 2010-1

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Ideen. Innovation. Wachstum - Hightech-Strategie 2020 für Deutschland*, Bonn: BMBF 2010. URL: http://www.bmbf.de/pub/hts_2020.pdf [Stand: 22.10.2014].

BMBF 2010-2

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Ressourceneffizienz potenzieren. Broschüre zum Förderschwerpunkt „Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – rohstoffintensive Produktionsprozesse“* (r²), Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI 2010. URL: http://www.rzwei-innovation.de/_media/r2_broschuere_web.pdf [Stand: 29.10.2014].

BMBF 2012

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland* (r⁴), Bonn: BMBF 2012.

BMBF 2013

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *r³ – Strategische Metalle und Mineralien – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz*, Bonn: BMBF 2013. URL: http://www.fona.de/mediathek/r3/pdf/131126_r3_Broschuere_barrierefrei.pdf [Stand: 29.10.2014].

BMBF 2014

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Die Neue Hightech-Strategie – Innovationen für Deutschland*, Berlin: BMBF 2014. URL: http://www.bmbf.de/pub/hts/HTS_Broschure_Web.pdf [Stand: 16.09.2015].

BMEL 2013

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.): *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2013*, Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH 2013. URL: www.bmelv-statistik.de; http://www.bmelv-statistik.de/fileadmin/sites/010_Jahrbuch/Stat_Jahrbuch_2013.pdf [Stand: 27.01.2015].

BMEL 2014

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.): *Der Wald in Deutschland – Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur*, Berlin 2014. URL: http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Bundeswaldinventur3.pdf?__blob=publicationFile [Stand: 13.03.2015].

BMEL 2015

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft: *Statistischer Monatsbericht 03/2015 – Daten und Tabellen*, Berlin 2015. URL: <http://www.bmelv-statistik.de/index.php?id=139&ab=66> [Stand: 10.04.2015].

BMU/BMELV 2010

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit/Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.): *Nationaler Biomasseaktionsplan für Deutschland – Beitrag der Biomasse für eine nachhaltige Energieversorgung*, Berlin 2010.

BMUB 2012

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen*, Berlin: BMUB 2012. URL: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_dt_bf.pdf [Stand: 29.10.2014].

BMW 2014

Bayerische Motoren Werke AG: *Persönliche Mitteilung*, 11.07.2014.

BMWi 2010

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Rohstoffstrategie der Bundesregierung – Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen*, Berlin: BMWi 2010.

BMWi 2012

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Bekanntmachung im Rahmen der Rohstoffstrategie der Bundesregierung: Richtlinien über die Gewährung von bedingt rückzahlbaren Zuwendungen zur Verbesserung der Versorgung der Bundesrepublik Deutschland mit kritischen Rohstoffen (Explorationsförderrichtlinien)*, Berlin: BMWi 2012.

BMZ 2015

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung: *Gute Regierungsführung und nachhaltige Entwicklung lassen sich nicht trennen*, BMZ 2015. URL: http://www.bmz.de/de/was_wir_machen/themen/goodgovernance/ [Stand: 19.02.2015].

BÖR 2012

BioÖkonomieRat: *Empfehlungen 3 – Nachhaltige Nutzung von Bioenergie*, Berlin: Forschungs- und Technologie-rat Bioökonomie 2012. URL: <http://www.biooekonomierat.de/fileadmin/templates/publikationen/empfehlungen/BioOekonomierat-Empfehlungen-Bioenergie.pdf> [Stand: 29.10.2014].

BP 2015

British Petroleum: *Statistical Review of World Energy*, London 2015. URL: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf> [Stand: 28.08.2015].

Bradshaw/Hamacher 2013

Bradshaw, A. M./Hamacher, T.: „Nuclear fusion and the helium supply problem“. In: *Fusion Engineering and Design*, 88, 2013, S. 2694–2697.

Bradshaw et al. 2013

Bradshaw, A. M./Reuter, B./Hamacher, T.: „The Potential Scarcity of Rare Elements for the Energiewende“. In: *GREEN*, 3: 2, 2013, S. 93–111.

Bräuninger et al. 2013

Bräuninger, M./Leschus, L./Rossen, A.: „Ursachen von Preispeaks, -einbrüchen und -trends bei mineralischen Rohstoffen“. In: *DERA Rohstoffinformationen Nr. 17*, Auftragsstudie erstellt durch das Hamburgische WeltWirtschaftsinstitut (HWWI), Berlin: Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2013.

Bringezu et al. 2009

Bringezu, S./Schütz, H./Arnold, K./Merten, F./Kabasci, S./Borelbach, P./Michels, C./Reinhardt, G. A./Rettenmaier, N.: „Global Implications of Biomass and Biofuel Use in Germany – Recent Trends and future Scenarios for domestic and foreign agricultural Land Use and resulting GHG Emissions“. In: *Journal Cleaner Production*, 17, Elsevier Ltd., 2009, S. 57–68.

Buchholz et al. 2012-1

Buchholz, P./Huy, D./Sievers, H.: „DERA Rohstoffliste 2012, Angebotskonzentration bei Metallen und Industriemineralen – Potenzielle Preis- und Lieferrisiken“, In: *DERA Rohstoffinformationen Nr. 10*, Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2012.

Buchholz et al. 2012-2

Buchholz, P./Liedtke, M./Gernuks, M.: „Evaluating Supply Risk Patterns and Demand Trends for Mineral Raw Materials: Assessment of the Zinc Market“. In: Sinding-Larsen, R./Wellmer, F.-W. (Hrsg.): *Non-Renewable Resource Issues – Geoscientific and Societal Challenges*, Dordrecht, Heidelberg: Springer Verlag 2012, S. 157–181.

Buchholz 2013-1

Buchholz, P.: „Entwicklung von Frühwarnindikatoren für die Rohstoffrisikoanalyse“, In: *BGR- Rohstoffkonferenz 2013*, Hannover, 4. November 2013.

Buchholz 2013-2

Buchholz, P.: *Marktüberblick, Preisentwicklung und Erhöhung der Versorgungssicherheit*, Vortrag beim Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik, Chemie Einkauf, Frankfurt am Main, 20. November 2013.

Buchholz et al. 2015

Buchholz, P./Huy, D./Liedtke, M./Schmidt, M.: *DERA-Rohstoffliste 2014, Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – Potenzielle Preis- und Lieferrisiken* (DERA Rohstoffinformationen Nr. 24), Berlin, Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2015. URL: http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Publikationen/Schriftenreihe/schriftenreihe_node.html [Stand: 15.04.2015].

Buijs et al. 2012

Buijs, B./Sievers, H./Tercero Espinoza, L. A.: „Limits to the critical raw material approach“. In: *Waste and Resource Management*, 165: WR4, 2012, S. 201–208.

Bundesregierung 2002

Bundesregierung 2002: *Perspektiven für Deutschland – Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung*. Berlin: Die Bundesregierung 2002. URL: http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Nachhaltigkeitsstrategie/1-die-nationale-nachhaltigkeitsstrategie/nachhaltigkeitsstrategie/_node.html [Stand: 14.04.2015].

Bundestags-Enquete-Kommission 1998

Bundestags-Enquete-Kommission: *Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung*, Deutscher Bundestag: Abschlussbericht der Enquete-Kommission, Bundestagsdrucksache 13/ 11200 vom 26.06.98, Berlin 1998.

BVerfG 2013

Bundesverfassungsgericht: *1 BvR 3139/08, 1 BvR 3386/08, Urteil des Ersten Senats vom 17.12.2013, Absatz-Nr. (1-333)*, Karlsruhe 2013. URL: http://www.bverfg.de/entscheidungen/rs20131217_1bvr313908.html [Stand 12.08.2014].

CDU/CSU/SPD 2013

Christlich Demokratische Union Deutschlands/Christlich-Soziale Union in Bayern/Sozialdemokratische Partei Deutschland: *Deutschlands Zukunft gestalten* (Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, 18. Legislaturperiode. 16.12.2013), Berlin: Koalitionsparteien der Bundesregierung 2013.

commdev.org 2015

commdev.org: *Codes, Standards and Guidelines*, CommDev ist eine Initiative der International Finance Corporation (IFC), 2015. URL: <http://commdev.org/codes-standards-and-guidelines> [Stand: 18.02.2015].

Cook/Shergold 1986

Cook, P. J./Shergold, J. H.: *Phosphate Deposits of the World*, Cambridge: Cambridge University Press 1986.

CRB 2013

Commodity Research Bureau: Market Data, 2013. URL: http://www.crbtrader.com/data.asp?page=chart&sym=BTYo0&name=BLS Metals&domain=crb&display_ice=1&studies=-Volume;&cancelstudy=&a=M [Stand: 14.10.2013].

Crowson 2012

Crowson, P.: „Solving the Minerals Equation? Demand, Prices and Supply“. In: *LE STUDIUM® Conference: Life and Innovation Cycles in the Field of Raw Materials Supply and Demand – a Transdisciplinary Approach*, Orléans, Frankreich, 19.–20. April 2012.

DERA 2014

Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: *Statische „Reichweite“ und globale Bergwerksförderung am Beispiel einzelner Rohstoffe* (Datenauswertung der Datenbanken der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und des United States Geological Survey), 2014.

DGUV 2000-2012

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: *Geschäftsergebnisse, 2000-2012*.

DGUV 2014

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: *Meldepflichtige Arbeitsunfälle je 1 Mio. geleisteter Arbeitsstunden*, 2014. URL: <http://www.dguv.de/de/Zahlen-und-Fakten/Arbeits-und-Wegeunfallgeschehen/Meldepflichtige-Arbeitsunfaelle-je-1-Mio.-geleisteter-Arbeitsstunden/index.jsp> [Stand: 11.04.2014].

Displaysearch 2008

Displaysearch: DisplaySearch Reports Q4'07 Worldwide LCD TV Shipments Surpass CRTs for First Time; TV Revenues Reach a Record High, Up 10% to \$33B, DisplaySearch/Information Handling Services (IHS) 2008. URL: <http://www.displaysearch.com/cps/rde/xchg/displaysearch/hs.xml/6138.asp> [Stand: 25.09.2014].

DOE 2007

US Department of Energy: *Mining Industry Energy Bandwidth Study*, Washington DC 2007. URL: http://energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/mining_bandwidth.pdf [Stand: 09.10.2015].

DOE 2010

US Department of Energy: *Critical Materials Strategy*, Washington DC 2010. URL: http://www.energy.gov/sites/prod/files/piprod/documents/cms_dec_17_full_web.pdf [Stand: 28.10.2014].

DOE 2011-1

US Department of Energy: *Critical Materials Strategy*, Washington DC 2011. URL: http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf [Stand 27.06.14].

DOE 2011-2

US Department of Energy: *US Billion-Ton Update: Biomass Supply for Bioenergy and Bioproducts Industry*, Energy Efficiency and Renewable Energy Office of the Biomass Program 2011. URL: <http://bioenergykdf.net/> / http://www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/billion_ton_update.pdf [Stand: 28.10.2014].

Dorner et al. 2013

Dorner, U./Buchholz, P./Liedtke, M./Schmidt, M.: *Rohstoffrisikobewertung – Kupfer, Kurzbericht* (DERA Rohstoffinformationen Nr. 16), Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2013.

Dorner et al. 2014

Dorner, U./Schmidt, M./Liedtke, M./Buchholz, P.: *Frühwarnindikatoren und Rohstoffrisikobewertung – Methodischer Überblick am Beispiel Antimon* (Commodity Top News 43), Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2014.

Duclos et al. 2010

Duclos, S./Otto, J./Konitzer, D.: „Design in an era of constrained resources“. In: *Mechanical Engineering* 132:9, 2010, S. 36–40.

EASAC 2012

European Academies Science Advisory Council: *Policy Report 19 – The current Status of Biofuels in the European Union, their environmental Impacts and future Prospects*, 2012. URL: <http://www.easac.eu/home/reports-and-statements.html> [Stand: 28.10.2014].

EC 2010

European Commission: *Critical raw materials for the EU* (Report of the Ad-hoc-Working Group on defining critical Raw Materials), Brüssel 2010. URL: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf [Stand: 01.05.2014].

EC 2011

European Commission: *Tackling the challenges in commodity markets and on raw materials* (Communication of the Commission to the Council and the European Parliament), Brüssel 2011.

EC 2014

European Commission: *Critical raw materials for the EU*, Report of the Ad-hoc-Working Group on defining critical Raw Materials, Brüssel 2014. URL: http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials_en.pdf [Stand: 26.06.2014].

Eisler et al. 2014

Eisler, M. C./Lee, M. R. F./Tarlton, J. F./Martin, G. B./Beddington, J./Dungait, J. A. J./Greathead, H./Liu, J./Mathew, S./Miller, H./Misselbrook, T./Murray, P./Vinod, V. K./van Saun, R./Winter, M.: „Steps to sustainable livestock“. In: *Nature*, 507, 2014, S. 32–34.

Elsner et al. 2014

Elsner, H./Schmidt, M./Schütte, P./Näher, U.: *Zinn – Angebot und Nachfrage bis 2020* (DERA Rohstoffinformationen Nr. 20), Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2014.

Elsner et al. 2015

Elsner, P./Fischedick, M./Sauer, D. U. (Hrsg.): *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2015.

EPA 2015

US Environmental Protection Agency: *EPA's Study of Hydraulic Fracturing for Oil and Gas and its Potential Impact on Drinking Water Resources*, 2015. URL: <http://www2.epa.gov/hfstudy> [Stand: 20.02.2015].

Equator principles 2014

The Equator Principles Association: *Environmental and social Risk Management for Projects*, 2014. URL: <http://www.equator-principles.com/> [Stand: 02.03.2014].

Erdmann et al. 2011

Erdmann, L./Behrendt, S./Feil, M.: *Kritische Rohstoffe für Deutschland* (Studie des Institutes für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) und adelphi für die KfW-Bankengruppe), Berlin 2011.

Erdmann/Graedel 2011

Erdmann, L./Graedel, T. E.: „Criticality of non-fuel minerals: a review of major approaches and analyses“. In: *Environmental Science and Technology*, Bd. 45: 18, 2011, S. 7620–7630.

Ericsson/Söderholm 2010

Ericsson, M./Söderholm, P.: *Mineral Depletion and Peak Production* (POLINARES (EU Policy in Natural Resources) working paper n.7, D1.1 – Teilbericht des Arbeitspakets 1 „Framework for Understanding the Sources of Conflict and Tension“), 2010. URL: http://www.polinares.eu/docs/d1-1/polinares_wp1_peak_debates_minerals.pdf [Stand: 28.10.2014].

Ewen et al. 2012

Ewen, C./Borchardt, D./Richter, S./Hammerbacher, R.: *Risikostudie Fracking – Sicherheit und Umweltverträglichkeit der Fracking-Technologie für die Erdgasgewinnung aus unkonventionellen Quellen* (Übersichtsfassung), Darmstadt 2012.

EY 2015

EY: *Business Risks facing Mining and Metals 2015–2016. Industries – Mining and Metals*, 2015. URL: <http://www.ey.com/GL/en/Industries/Mining--Metals/Business-risks-in-mining-and-metals> [Stand: 15.12.2015].

Factor 10-Institute 2010

Factor 10-Institute: *Manifesto*, 2010. URL: http://www.factor10-institute.org/files/F10_Manifesto_e.pdf [Stand: 19.04.2014].

FAO 2012

Food and Agriculture Organization of the United Nation: *Current world Fertilizer Trends and Outlook 2016*, Rom 2012. URL: <ftp://ftp.fao.org/ag/agg/docs/cwf-to16.pdf> [Stand: 28.10.2014].

FAO 2014

Food and Agriculture Organization of the United Nations: *Status of the World's Forests 2014 – Enhancing the socioeconomic Benefits from Forests*, Rom 2014. URL: <http://www.fao.org/3/a-i3710e.pdf> [Stand: 28.09.2015].

FAZ 2014

Frankfurter Allgemeine Zeitung: *Frankreich gründet einen Staatsbergbaukonzern*, 21.02.2014. URL: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/industrie-politik-frankreich-gruendet-einen-staatsbergbaukonzern-12814521.html> [Stand: 01.10.2015].

Fettweis et al. 1985

Fettweis, G. B./Brandstätter, A./Hruschka, F.: „Was ist Lagerstättenbonität?“. In: *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft*, 78, 1985, S. 23–40.

Finlayson 2009

Finlayson, E.: „Demand, supply and price of copper – an exploration perspective“. In: *Rio Tinto, Global Mining Investment Conference*, London, 30. September 2009. URL: http://www.riotinto.com/documents/ReportsPublications/20093009__Finlayson__Global__Mining__Investment__Conference.pdf [Stand: 21.10.2014].

Firebreak 2013

Firebreak 2013. URL: <http://www.borax.com/product/firebrake-zb.aspx> [Stand 14.03.2014].

Fischer 2014

Fischer, H. (Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. KG): *Persönliche Mitteilung*, 01.07.2014.

Franken et al. 2012

Franken, G./Vasters, J./Dorner, U./Melcher, F./Sitnikova, M./Goldmann, S.: „Certified Trading Chains in Mineral Production: A Way to improve Responsibility in Mining“. In: R. Sinding-Larsen, F.-W. Wellmer (Hrsg.): *Non-Renewable Resource Issues – Geoscientific and Societal Challenges*, Dordrecht, Heidelberg: Springer Verlag 2012, S. 213–227.

Fraunhofer ISI 2010

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung: *Energietechnologien 2050 – Schwerpunkt für Forschung und Entwicklung* (ISI-Schriftenreihe „Innovationspotentiale“), Stuttgart: Fraunhofer-Verlag 2010.

Frenzel et al. 2014

Frenzel, M./Ketris, M. P./Gutzmer, J.: „On the geological Availability of Germanium“. In: *Mineralium Deposita*, 49: 4, 2014, S. 471–487.

Fritz et al. 2013

Fritz, S./See, L./van der Velde, M./Nalepa, R. A./Perger, C./Schill, C./McCallum, I./Schepaschenko, D./Kraxner, F./Cai, X./Zhang, X./Ortner, S./Hazarika, R./Cipriani, A./di Bella, C./Rabia, A. H./Garcia, A./Vakolyuk, M./Singha, K./Beget, M. E./Erasm, S./Albrecht, F./Shaw, B./Obersteiner, M.: „Downgrading recent Estimates of Land available for Biofuel Production“. In: *Environmental Science & Technology* 47, 2013, S. 1688–1694.

G7 2014

G7: *The Brussels G7 Summit Declaration*, Brüssel 2014. URL: http://www.g7germany.de/Webs/G7/EN/G7-Gipfel_en/Gipfeldokumente_en/summit-documents_node.html [Stand: 15.04.2015].

Gauthier 2012

Gauthier, M.: *École des Mines*, Vortrag Ressources minérales: la vision du mineur, 01.02.2012, Paris 2012.

Globaldialogue 2015

Globaldialogue: *Intergovernmental Forum of Mining, Minerals, Metals and sustainable Development*, 2015. URL: http://www.globaldialogue.info/intro_e.htm [Stand: 24.08.2015].

Gordon et al. 2006

Gordon, R. B./Bertram, M./Graedel, T. E.: „Metal Stocks and Sustainability“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 103: 5, 2006, S. 1209–1214.

Görner/Sauer 2016

Görner, K./Sauer D. U.: *Konventionelle Kraftwerke. Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“*, München 2016.

Goskowski 2011

Goskowski, F.: *Three Essays and three Revolutions*, Durham CT: Strategic Book Group 2011.

Graedel et al. 2012

Graedel, T. E./Barr, R./Chandler, C./Chase, T./Choi, J./Christoffersen, L./Friedlander, E./Henly, C./Jun, C./Nassar, N. T./Schechner, D./Warren, S./Yang, M./Zhu, C.: „Methodology of Metal Criticality Determination“. In: *Environmental Science & Technology*, 46, 2012, S. 1063–1070.

Graedel et al. 2013

Graedel, T. E./Harper, E. M./Nasser, N. T./Reck, B. K.: „On the Materials Basis of modern Society“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* (Early Edition), 2013. URL: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1312752110> [Stand: 01.04.2014].

GRI 2014

Global Reporting Initiative: *Guidance for Reporting in the Mining and Metals Sector*, 2014. URL: <https://www.globalreporting.org/reporting/sector-guidance/sector-guidance/mining-and-metals/Pages/default.aspx> [Stand 02.03.2014].

Gwartney et al. 2014

Gwartney, J./Lawson, R./Hall, J.: *Economic Freedom of the World: 2014 Annual Report*, Vancouver, Kanada: Fraser Institute 2014.

Haberl et al. 2007

Haberl, H./Erb, K.-H./Krausmann, F./Gaube, V./Bondeau, A./Plutzer, C./Gingrich, S./Lucht, W./Fischer-Kowalski, M.: „Quantifying and Mapping the global human Appropriation of net primary Production in Earth’s terrestrial Ecosystem“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104: 31, 2007, S. 12942–12947. URL: <http://www.pnas.org/content/suppl/2007/07/09/0704243104.DC1> [Stand: 12.02.2015].

Haberl et al. 2013

Haberl, H./Erb, K. H./Krausmann, F./Running, S./Se-archinger, T. D./Smith, W. K.: „Bioenergy, how much can we expect for 2050?“. In: *Environmental Research Letters*, 8, Artikel- Nr. 031004, 2013.

Hagelüken 2011

Hagelüken, C.: *Bedeutung des Recyclings für die Verfügbarkeit von strategischen Metallen* (Vortrag WING-Konferenz, Session 3: Strategische Metalle, Rohstoffe, Substitution, Chemie, 05.10.2011, Berlin), 2011.

Hagelüken 2012

Hagelüken, C.: „Secondary Raw Material Sources for Precious and Special Metals“. In: Sinding-Larsen, R./Wellmer, F.-W. (Hrsg.): *Non-Renewable Resource Issues- Geoscientific and Societal Challenges*. Dordrecht, Heidelberg: Springer Verlag, 2012, S. 195–212.

Hagelüken 2014-1

Hagelüken, C.: „Recycling 2.0 – Verbesserung des Recyclings wirtschaftsstrategischer Metalle durch systemische Optimierung u. industrielle Kooperation.“ In: *DECHEMA Infotag „Wiedergewinnung strategischer Metalle“*, Frankfurt am Main, 13.05.2014.

Hagelüken 2014-2

Hagelüken, C.: „Technologiemetalle – Systemische Voraussetzungen entlang der Recyclingkette“. In: Kausch, P./Bertau, M./Gutzmer, J./Matschullat, J. (Hrsg.): *Strategische Rohstoffe – Risikoversorgung*, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum Verlag 2014, S. 161–172.

Hall et al. 2009

Hall, C. A. S./Balogh, S./Murphy, D. J. R.: „What is the minimum EROI that a sustainable Society must have?“. In: *Energies*, 2, 2009, S. 25–47.

Hamm et al. 2013

Hamm, B./Schax, A./Scheper, C.: *Human rights Impact Assessment of the Tampakan Copper-Gold Project*, Mindanao, Philippines 2013. URL: <http://www.misereor.de/themen/wirtschaft-fuer-die-armen/rohstoffe.html> [Stand 13.04.2014].

Harris 2013

Harris, M.: *Key note address*, SGA Tagung, 12.–15.08.2013, Uppsala, Schweden 2013.

Hejazi et al. 2014

Hejazi, M./Edmonds, J./Clarke, L./Kyle, P./Davies, E./Chaturvedi, V./Wise, M./Patel, P./Eom, J./Calvin, K./Moss, R./Kim, S.: „Long-term global Water Projections using six socioeconomic Scenarios in an integrated Assessment Modeling Framework“. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 81, 2014, S. 205–226.

Hertwich et al. 2014

Hertwich, E. G./Gibojn, T./ Bouman, E. A./Arvesen, A./Suh, S./Heath, G. A./Bergesen, J. D./Ramirez, A./Vega, M. I./Shi, L.: „Integrated life-cycle Assessment of Electricity-Supply Scenarios confirms global environmental Benefit of low-carbon Technologies“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2014. URL: <http://www.pnas.org/content/suppl/2014/10/02/1312753111>. DCSupplemental [Stand: 28.10.2014].

Hiller 1991

Hiller, K.: „Explorations-Förderprogramm DEMINEX (1969-1989)“. In: *Geologisches Jahrbuch Reihe A*, Heft 127, 1991, S. 289–298.

Hischier/Weidema 2010

Hischier, R./Weidema, B. (Hrsg.): *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods* (Data v.2.2,ecoinvent report No. 3), Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories 2010.

Honolka 1976

Honolka, H.: *Die Eigendynamik sozialwissenschaftlicher Aussagen: Zur Theorie des self-fulfilling prophecy*, Frankfurt a. M.: Campus Verlag 1976.

Hubbert 1956

Hubbert, M. K.: „Nuclear Energy and Fossil Fuels“. In: *Proceedings of American Petroleum Institute Drilling & Production Practice* (spring meeting), San Antonio, Texas, 1956, S. 7–25.

IAI 2014

International Aluminium Institute: *Recycling Indicators*, 2014. URL: <http://recycling.world-aluminium.org/en/review/recycling-indicators.html> [Stand: 26.11.2014].

ICMM 2015

International Council on Mining & Metals: *10 Principles*, International Council on Mining & Metals, 2015. URL: <http://www.icmm.com/our-work/sustainable-development-framework/10-principles> [Stand: 18.02.2015].

IEA 2014-1

International Energy Agency: *World Energy Outlook 2014*, Paris: IEA 2013. URL: <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2013/> [Stand: 17.11.2014].

IEA 2014-2

International Energy Agency: *Key World Energy Statistics*, Paris: IEA 2014.

IPCC 2011

Intergovernmental Panel on Climate Change: *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (SRREN – Special report of the IPCC, Working Group III „Mitigation of Climate Change“, Chapter 2 (Bioenergy)), New York, NY: Cambridge Univ. Press 2011, S. 214–331. URL: <http://srren.ipcc-wg3.de/report> [Stand: 28.10.2014].

IRENA 2014

International Renewable Energy Agency: *Global Bioenergy – Supply and Demand Projections, a Working Paper for REmap 2030*, Abu Dhabi, Bonn: IRENA 2014.

Kawohl 2011

Kawohl, C.: *Recycling komplexer Materialzusammensetzungen*, acatech-Workshop Rohstoffe – neue Werkstoffe – neue Technologien, Berlin, 26.10.2011.

Keitel 2010

Keitel, H.-P.: *Rohstoffsicherheit für Deutschland und Europa*. In: *Einführungsvortrag 3. BDI-Rohstoffkongress*, Berlin, 26.10.2010.

Kerr 2014

Kerr, R. A.: „The coming Copper Peak“. In: *Science*, 343, 2014, S. 722–724.

Kesler 1994

Kesler, S. E.: *Mineral Resources, Economics and the Environment*, Macmillan: New York 1994.

Kingsnorth 2012

Kingsnorth, D. J.: *The global Rare Earths Industry: the Supply Chain Challenges* (Firmenvortrag IMCOA [Industrial Minerals Company of Australia Pty. Ltd.]), 2012.

Kingsnorth 2014

Kingsnorth, D.: *Strategies for securing sustainable Supplies of Rare Earth*, vorgetragen bei der Deutschen Rohstoffagentur, Berlin, 20.10.2014.

Krausmann et al. 2013

Krausmann, F./Erb, K.-H./Gingrich, S./Haberl, H./Bondeau, A./Gaube, V./Lauk, C./Plutzer, C./Searchinger, T. D.: „Global Human Appropriation of net primary Production doubled in the 20th Century“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 110, 2013, S. 10324–10329.

Kravis et al. 1978

Kravis, I. B./Heston, A. W./Summers, R.: „Real GDP per Capita for more than one hundred Countries“. In: *The Economic Journal*, 88: 350, 1978, S. 215–242.

Lachmund 2012

Lachmund, H.: *Alternative Analysis and alloying Strategies in heavy plating Processing as a Result of alloying Agents Price Trends*, Vortrag: Life and Innovation Cycles in the Field of Raw Materials Supply and Demand – a Transdisciplinary Approach, Orléans, 18.–19.04.2012.

Large 2014

Large, D.: „Neue Technologien in Exploration und Lagerstättenentdeckung“. In: Kausch, P./Bertau, M./Gutzmer, J./Matschullat, J.: *Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge*, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum Verlag 2014, S. 149–158.

Leopoldina 2012

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina: *Bioenergy – Chances and Limits* (Stellungnahme der Leopoldina), Halle (Saale) 2012. URL: http://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/201207_Stellungnahme_Bioenergie_LAY_en_final_01.pdf [Stand: 18.02.2015].

Leopoldina 2013

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina: *Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen* (Stellungnahme der Leopoldina), Halle (Saale) 2013. URL: http://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2013_06_Stellungnahme_Bioenergie_DE.pdf [Stand: 01.11.2014].

Le Parisien 2014

Le Parisien: *Arnaud Montebourg: „La renaissance d'une compagnie nationale des mines“*, 21.02.2014. URL: <http://www.leparisien.fr/economie/arnaud-montebourg-la-renaissance-d-une-compagnie-nationale-des-mines-21-02-2014-3611305.php> [Stand: 01.10.2015].

Le Roux/Macnae 2007

Le Roux, C./Macnae, J.: „SQUID Sensors for EM Systems“. In: Milkereit, B.: *Exploration in the new Millennium*, Toronto: Decennial Mineral Exploration Conferences, 2007, S. 417–423.

Liedtke/Elsner 2009

Liedtke, M./Elsner, H.: „Seltene Erden“. In: *Commodity Top News Nr. 31*, Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) 2009.

Liedtke/Schmidt 2014

Liedtke, M./Schmidt, M.: „Rohstoffrisikobewertung – Wolfram“. In: *DERA Rohstoffinformationen Nr. 19*, Berlin: Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2014.

Malenbaum 1978

Malenbaum, W.: *World Demand for Raw Materials in 1985 and 2000*, New York: McGraw-Hill 1978.

Matthews 2001

Matthews, L.: *Speaking Notes for Lloyd Matthews, Minister of Mines and Energy*. Update on the Voisey's Bay Negotiations to St. John's Board of Trade, 11. Oktober 2001. URL: <http://www.releases.gov.nl.ca/releases/speeches/2001/outlook2001/BoardOfTradeOct2001.htm> [Stand: 12.08.2014].

MB 2015

Metal Bulletin: *Price Book* (kostenpflichtige Online-Datenbank), London 2015. URL: <http://www.metalbulletin.com/> [Stand: 20.09.2015].

McLean et al. 2010

McLean, H. L./Duchin, F./Hagelüken, C./Halada, K./Kessler, S. E./Moriguchi, Y./Mueller, D./Norgate, T. E./Reuter, M. E./van der Voet, E.: „Stocks, Flows and Prospects of Mineral Resources“. In: Graedel, T. E./van der Voet, E. (Hrsg): *Linkages of Sustainability, Stringmann Forum Report*, Cambridge: MIT Press, 2010, S. 199–218.

Meadows et al. 1972

Meadows, D. H./Meadows, D. L./Randers, J./Behrens III, W. W.: *The Limits to Growth*, A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind, Universe Books: New York 1972.

MEG 2013

SNL Metals & Mining (ehemals: Metals Economics Group – MEG): *World Wide Exploration Trends 2013*, Halifax 2013. URL: http://www.metalseconomics.com/sites/default/files/uploads/PDFs/meg_wetbrochure2013.pdf [Stand: 14.10.2013].

Meiners et al. 2012

Meiners, H. G./Denneborg, M./Müller, F./Bergmann, A./Weber, F.-A./Dopp, E./Hansen, C./Schüth, C./Buchholz, G./Gaßner, H./Sass, I./Homuth, S./Prieps, R.: *Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten – Risikobewertung, Handlungsempfehlungen und Evaluierung bestehender rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen* (Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes), Aachen, Mühlheim a. d. Ruhr, Berlin, Darmstadt: ahu AG Wasser Boden Geomatik/IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser – Beratungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH/Gaßner, Groth, Siederer & Coll. Rechtsanwälte Partnerschaftsgesellschaft/Technische Universität Darmstadt, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Angewandte Geothermie 2012.

Melcher/Buchholz 2012

Melcher, F./Buchholz, P.: „Current and future Germanium Availability from primary Resources“. In: *Minor Metals Conference*, Köln, 24.04.2012.

Melcher/Buchholz 2014

Melcher, F./Buchholz, P.: „Germanium“. In: Gunn, G.: *Critical Metals Handbook*, Oxford: John Wiley & Sons 2014, S. 177–203.

Misereor 2013

Misereor: *Menschenrechtliche Probleme im peruanischen Rohstoffsektor und die deutsche Mitverantwortung*, Aachen 2013. URL: <http://www.misereor.de/themen/wirtschaft-fuer-die-armen/rohstoffe/menschenrechtsverletzungen-im-bergbau-in-peru.html> [Stand 15.02.2015].

Moody 2015

Moody, R.: *Schmutzige Geschäfte – Deutsche Investitionen im Bergbausektor*, Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung 2015. URL: http://www.boell.de/sites/default/files/2014-03-deutsche-investitionen_bergbausektor.pdf [Stand: 13.03.2015].

MKULNV 2012

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: *Fracking in unkonventionellen Erdgas-Lagerstätten in NRW*, Kurzfassung zum Gutachten: „Gutachten mit Risikostudie zur Exploration und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten in Nordrhein-Westfalen (NRW) und deren Auswirkungen auf den Naturhaushalt, insbesondere die öffentliche Trinkwasserversorgung“, Düsseldorf 2012.

Moss et al. 2013

Moss, R. L./Tzimas, E./Willis, P./Arendorf, J./Tercero Espinoza, L.: *Critical Metals in the Path towards Decarbonisation of the EU Energy Sector – Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies* (Scientific and Policy Reports), Petten: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport 2013. URL: <https://setis.ec.europa.eu/newsroom-items-folder/new-jrc-report-critical-metals-energy-sector> [Stand 02.05.2014].

Nelles 2008

Nelles, M.: „Wirtschaftliche und technologische Herausforderungen im modernen Erzbergbau – Strategien und Lösungsansätze eines mittelständischen Bergbauunternehmens“. In: 3. *Sächsischer Rohstofftag*, Freiberg, Sachsen, 02.04. 2008.

NRC 2007

National Research Council of the National Academies: *Minerals, critical minerals, and the U.S. economy. Prepublication Version*, Washington D.C.: The National Academies Press 2007. URL: http://www.nma.org/pdf/101606_nrc_study.pdf [Stand: 27.10.2014].

NRC 2008

National Research Council of the National Academies: *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*, Washington, D.C.: The National Academies Press 2008.

OECD 2008

Organisation for Economic Co-operation and Development: *Biofuel support Policies: An economic Assessment*, 2008.

OPEC 2014

Organization of the Petroleum Exporting Countries: *World Oil Outlook 2014*, Wien 2014. URL: http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/WOO_2014.pdf [Stand: 17.11.2014].

Owen/Kemp 2013

Owen, J. R./Kemp, D.: „Social Licence and Mining: A critical Perspective“. In: *Resources Policy*, 38, 2013, S. 29–35.

Parsons/Moffat 2014

Parsons, R./Moffat, K.: „Constructing the Meaning of Social Licence“. In: *Social Epistemology*, 28: 3–4, 2014, S. 340–363.

Peplow 2014

Peplow, M.: „Cellulosic Ethanol Fights for Life“. In: *Nature*, 507, 2014, S. 152–156.

Pfleger et al. 2009

Pfleger, P./Lichtblau, K./Bardt, H./Reller, A.: Rohstoffsituation Bayern: *Keine Zukunft ohne Rohstoffe. Strategien und Handlungsoptionen* (Studie der IW Consult GmbH), München: Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V. 2009.

Pischetsrieder 2011

Pischetsrieder, B.: *Persönliche Mitteilung*, acatech Workshop Rohstoffe – Werkstoffe – Neue Technologien, Berlin, 26.10.2011.

Prno 2013

Prno, J.: „An Analysis of Factors leading to the Establishment of a Social Licence to Operate in the Mining Industry“. In: *Resources Policy*, 38, 2013, S. 577–590.

Randers 2012

Randers, J.: *2052 – A global Forecast for the next forty Years*, A Report to the Club of Rome commemorating the 40th Anniversary of the „The Limits to Growth“, White River Junction, Vermont: Chelsea Green Publishing 2012.

Rankin 2015

Rankin, W. J.: „Towards zero Waste – Re-Evaluating the traditional Production Cycle“. In: *The Australasian Institute of Mining and Metallurgy Bulletin* (AusIMM), June 2015. URL: <https://www.ausimmbulletin.com/feature/towards-zero-waste/> [Stand: 14.10.2015].

Regiowiki 2015

Regiowiki: *Graphit Kropfmühl GmbH*, Regiowiki für Niederbayern und Altötting 2015. URL: http://regiowiki.pnp.de/index.php/Graphit_Kropfm%C3%BChl_GmbH [Stand: 28.09.2015].

REN21 2015

Renewable Energy Policy Network for the 21st Century: *Renewables 2015 Global Status Report*, Paris: REN21 Secretariat 2015. URL: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Online-book_low1.pdf [Stand: 15.12.2015].

Renn 2015

Renn, O. (Hrsg.): *Aspekte der Energiewende aus sozialwissenschaftlicher Perspektive* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2015.

Resnick Institute 2011

Resnick Institute: *Critical Materials For Sustainable Energy Applications*, Pasadena 2011.

Reuter/Verhoef 2004

Reuter, M. A./Verhoef, E. V.: „A dynamic Model for the Assessment of the Replacement of Lead in Solders“. In: *Journal of Electronic Materials*, 33: 12, 2004, S. 1567–1580.

Rockström et al. 2009

Rockström, J./Steffen, W./Noone, K./Persson, Å./Chapin III, F.S./Lambin, E./Lenton, T.M./Scheffer, M./Folke, C./Schellnhuber, H. J./Nykvist, B./de Wit, C. A./Hughes, T./van der Leeuw, S./Rodhe, H./Sörlin, S./Snyder, P. K./Costanza, R./Svedin, U./Falkenmark, M./Karlberg, L./Corell, R.W./Fabry, V.J./Hansen, J./Walker, B./Liverman, D./Richardson, K./Crutzen, P./Foley, J.: „Planetary Boundaries: Exploring the safe operating Space for Humanity“. In: *Ecology and Society*, 14(2): 32, 2009. URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/> [Stand: 28.10.2014].

Rosas et al. 2012

Rosas, J./Schuffeneger, C./Cornejo, C.: „Update of Chilean Mining Projects and technological Trends“, In: *44th Annual Canadian Mineral Processors Operators conference*, Ottawa, 17.–19. Januar 2012.

Rosemarin/Jensen 2013

Rosemarin, A./Jensen, L.S.: „What is the phosphorus Challenge?“, In: *European Sustainable Phosphorus Conference*, Brüssel, 06.03.2013.

Rosenau-Tornow et al. 2009

Rosenau-Tornow, D./Buchholz, P./Riemann, A./Wagner, M.: „Assessing the long-term Supply Risks for Mineral Raw Materials – a combined Evaluation of past and future Trends“. In: *Resources Policy*, 34, 2009, S. 161–175.

Sames et al. 2000

Sames, C.-W./Kegel, K.-E./Johannes, D.: „Millennium – 100 Jahre Bergbau im Rückblick“. In: *Erzmetall*, 53: 12, 2000, S. 759–760.

Schebek/Becker 2014

Schebek, L./Becker, B. F.: „Substitution von Rohstoffen – Rahmenbedingungen und Umsetzung“. In: Kausch, P./Bertau, M./Gutzmer, J./Matschullat, J. (Hrsg.): *Strategische Rohstoffe- Risikovorsorge*, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum Verlag 2014, S. 3–12.

Schlegl 2013

Schlegl, T.: „Entwicklungslinien der PV-Technologie und Materialsubstitutionsmöglichkeiten“ In: *Tagung „Strategische Metalle für die Energiewende“*, Tutzing 2013.

Schmidt 2015

Schmidt, M.: „Rohstoffrisikobewertung – Platingruppenelemente Platin, Palladium, Rhodium“. In: *DERA Rohstoffinformationen 26*, Berlin: Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2015. URL: http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Publikationen/Schriftenreihe/schriftenreihe_node.html [Stand: 12.10.2015].

Schodde 2010

Schodde, R. C.: The Key Drivers behind Resource Growth: an analysis of the Copper Industry over the last 100 Years In: Vortrag Mineral Economics & Management Society (MEMS) session at the 2010 SME Annual Conference, Phoenix, Arizona, March 2010), 2010. URL: <http://www.minexconsulting.com/publications/Growth%20Factors%20for%20Copper%20SME-MEMS%20March%202010.pdf> [Stand: 16.03.2014].

Schodde 2012-1

Schodde, R. C.: „Recent Trends in Copper Exploration – are we finding enough?“. In: *Internationaler Geologenkongress IGC Brisbane*, Australien, 05.–10. August 2012), 2012. URL: <http://www.minexconsulting.com/publications/IGC%20Presentation%20Aug%202012%20PUBLIC.pdf> [Stand: 15.01.2015].

Schodde 2012-2

Schodde, R. C.: „Global Outlook and Development Trends for Copper“. In: *Philippines Mining Conference*, Manila, 20.09.2012. URL: <http://www.minexconsulting.com/publications/Copper%20Outlook%20-%20PMC%20presentation%20Sept%202012.pdf> [Stand: 13.03.2014].

Scholz/Wellmer 2013

Scholz, R./Wellmer, F.-W.: „Approaching a dynamic View on the Availability of Mineral Resources: What we may learn from the Fase of Phosphorus?“. In: *Global Environmental Change* 23: 1, 2013, S. 11–27.

Scholz et al. 2014

Scholz, R./Wellmer, F.-W./DeYoung jr., J. H.: „Phosphorus Losses in Production Processes before the ‚Crude Ore‘ and ‚Marketable Production‘ Entries in Reported Statistics“. In: Scholz, R./Roy, A. H./Brand, F. S./Hellums, D. T./Ulrich, A. E. (Hrsg.): *Sustainable Phosphorus Management – A Global Transdisciplinary Roadmap*, Dordrecht, Heidelberg etc.: Springer Verlag 2014.

Schulze et al. 2012

Schulze, E. D./Körner, C. I./Law, B. E./Haberl, H./Luysaert, S.: „Large-scale Bioenergy from additional harvest of Forest Biomass is neither sustainable nor Greenhouse Gas neutral“. In: *Global Change Biology Bioenergy*, 4: 6, 2012, S. 611–616.

Seppelt et al. 2014

Seppelt, R./Mahceur, A. M./Liu, J./Fehichel, E. P./Klotz, S.: „Synchronized peak-rate Years of global Resources Use“. In: *Ecology and Society*, 19: 4, 2014, Artikel 50.

Siemens 2014

Siemens: „Materials for Magnets in Wind Turbines“, In: Metal Events – 10th International Rare Earths Conference, Singapur, 16.10.2014.

Sievers et al. 2012

Sievers, H./Buijs, B./Tercero Espinoza, L. A.: „Critical Minerals for the EU“, In: Polinares Working Paper 31, 2012. URL: http://www.polinares.eu/docs/d2-1/polinares_wp2_chapter19.pdf [Stand: 15.10.2015].

Skinner 1979

Skinner, B. J.: „Earth Resources“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 76: 9, 1979, S. 4212–4217.

Statistisches Bundesamt 2013

Statistisches Bundesamt: *Statistisches Bundesamt in Kooperation mit eurostat*, 2013. URL: <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/UnternehmenProduktion/Industrie.html> [Stand: 22.10.2014].

Statistisches Bundesamt 2014

Statistisches Bundesamt: *Umweltnutzung und Wirtschaft* (Bericht zu den umweltökonomischen Gesamtrechnungen 2014), Wiesbaden 2014. URL: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Querschnitt/UmweltnutzungundWirtschaftBericht5850001137004.pdf> [Stand: 18.02.2015].

Steffen et al. 2015

Steffen, W./Richardson, K./Rockström, J./Cornell, S. E./Fetzer, I./Bennett, E. M./Biggs, R./Carpenter, S. R./de Vries, W./de Wit, C. A./Gerten, D./Heinke, J./Mace, G. M./Persson, L. M./Ramanathan, V./Reyers, B./Sörlin, S.: „Planetary Boundaries: Guiding human Development on a changing Planet“. In: *Science*, 347: 6223, 2015.

Steinbach 2015

Steinbach, V.: „Responsibility in the Mineral Resources Sector – Engine for the global Development and social Progress“, In: *Internationale Rohstoffkonferenz „Verantwortung übernehmen – Nachhaltigkeit in der Rohstoffwirtschaft fördern“*, Berlin, 10.–11.11.2015. URL: http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Min_rohstoffe/Veranstaltungen/Rohstoffkonferenz2015/Raw_Material_Conference_2015_Liste.html?nn=7050122 [Stand: 04.01.2016].

Steinbach/Wellmer 2010

Steinbach, V./Wellmer, F.-W.: „Consumption and Use of Non-Renewable Mineral and Energy Raw Materials from an Economic Geology Point of View“. In: *Sustainability*, 2, 2010, S. 1408–1430.

Stephenson et al. 2014

Stephenson, N. L./Das, A. J./Condit, R./Russo, S. E./Baker, P. J./Beckman, N. G./Coomes, D. A./Lines, E. R./Morris, W. K./Rüger, N./Álvarez, E./Blundo, C./Bunyavejchewin, S./Chuyong, G./Davies, S. J./Duque, Á./Ewango, C. N./Flores, O./Franklin, J. F./Grau, H. R./Hao, Z./Harmon, M. E./Hubbell, S. P./Kenfack, D./Lin, Y./Makana, J.-R./Malizia, A./Malizia, L. R./Pabst, R. J./Pongpattananurak, N./Su, S.-H./Sun, L.-F./Tan, S./Thomas, D./van Mantgem, P. J./Wang, X./Wiser, S. K./Zavala, M. A.: „Rate of Tree Carbon Accumulation increases continuously with Tree Size“. In: *Nature*, 507, 2014, S. 90–93.

Stichnothe/Schuchardt 2010

Stichnothe, H./Schuchardt, F.: „Comparison of different Treatment Options for Palm Oil Production Waste on a Life Cycle Basis“. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15, 2010, S. 907–915.

Stürmer/von Hagen 2012

Stürmer, M./von Hagen, J.: *Einfluss des Wirtschaftswachstums aufstrebender Industrienationen auf die Märkte mineralischer Rohstoffe – Entwicklung von Bewertungsgrundlagen am Beispiel ausgewählter sich schnell industrialisierender Staaten der Vergangenheit und der BRIC-Staaten*, Gutachten im Auftrag der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Institut für Internationale Wirtschaftspolitik (DERA-Rohstoffinformation 11), Berlin: Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2012. URL: http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-11.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Stand: 11.08.2014].

Stürmer 2013-1

Stürmer, M.: *150 Years of Boom and Bust: What Drives Mineral Commodity Prices*, MPRA Working Paper, 2013.

Stürmer 2013-2

Stürmer, M.: „Industrialization and the Demand for Mineral Commodities“. In: *Bonn Econ Discussion Papers*, 13/2013, 2013.

Tercero Espinoza et al. 2013

Tercero Espinoza, L./Hummeln, T./Brunot, A./Hovestad, A./Peña Garay, I./Velte, D./Smuk, L./Todorovic, J./van der Eijk, C./Joce, C.: *Critical Raw Materials Substitution Profiles* (CRM_InnoNet-The Innovation Network for Substitution of Critical Raw Materials), 2013. URL: <http://cdn.awsripple.com/www.critical-rawmaterials.eu/uploads/Raw-materials-profiles-report.pdf> [Stand: 25.11.2014].

Teuber et al. 1999

Teuber, J./Hofmann, M./Kosinowski, M./Sattler, H./Schumacher, K.: „Der kumulierte Energieaufwand für die Erdölgewinnung am Beispiel ausgewählter Felder des Gifhorner Troges“. In: *Tagungsband DGMK- Frühjahrsagung Celle*, 1999, S. 31–40.

The Economist 1977

The Economist: *The Dutch Disease*, 26.11.1977, S. 82–83.

Tilton/Lagos 2007

Tilton, J. E./Lagos, G.: „Assessing the long-run availability of copper“. In: *Resources Policy*, 32, 2007, S. 19–23.

Transparency Deutschland 2014

Transparency Deutschland: *Corruption Perceptions Index 2013*, Berlin 2014. URL: <http://www.transparency.de/Tabellarisches-Ranking.2400.0.html> [Stand: 13.11.2014].

UKERC 2013

United Kingdom Energy Research Centre (UKERC): *Materials Availability. Comparison of Material Criticality Studies – Methodologies and Results* (Working Paper III), 2013.

Umweltbundesamt 2014

Umweltbundesamt: *Emissionen aus der Landwirtschaft im Jahr 2010*, Dessau-Roßlau 2014. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/landwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas> [Stand: 28.10.2014].

Umweltbundesamt 2015

Umweltbundesamt: *Anteil erneuerbarer Energien am Energieverbrauch*, Umweltbundesamt 2015. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/anteil-erneuerbarer-energien-am-energieverbrauch> [Stand: 15.12.2015].

UNEP 2011

United Nations Environment Programme: *Recycling Rates of Metals – a Status Report*, Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, 2011. URL: <http://www.unep.org/publications/> [Stand 15.01.2015].

UNEP 2013

United Nations Environment Programme: *Metal Recycling – Opportunities, Limits, Infrastructure*, Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, 2013. URL: <http://www.unep.org/publications/> [Stand 25.01.2016].

US-CBo 1982

US Congressional Budget Office: *Cobalt: Policy Options for a strategic Mineral*, Washington DC 1982. URL: <https://www.cbo.gov/sites/default/files/cbofiles/ftpdocs/51xx/doc5126/doc29-entire.pdf> [Stand: 01.10.2015].

USGS 2001

US Geological Survey: *Mineral Commodity Summaries 2001*, Washington DC 2001. URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2001/mcs2001.pdf> [Stand 28.10.2014].

USGS 2015

US Geological Survey: *Mineral Commodity Summaries 2015*, Washington DC 2014. URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2015/mcs2015.pdf> [Stand: 07.08.2015].

van der Ploeg 2011

van der Ploeg, F.: „Natural Resources: Curse or Blessing?“. In: *Journal of Economic Literature*, 49, 2, 2011, S. 366–420.

VDI 2012

Verein Deutscher Ingenieure – Fachbereich Ressourcenmanagement: *VDI 4600: Kumulierter Energieaufwand (KEA) – Begriffe, Berechnungsmethoden*, Berlin: Beuth Verlag 2012.

Verhoef et al. 2004

Verhoef, E. V./Dijkema, G. P. J./Reuter, M. A.: „Process Knowledge, System Dynamics and Metal Ecology“. In: *Journal of Industrial Ecology*, 8: 1–2, 2004, S. 23–43.

Vidal et al. 2013

Vidal, O./Goffé, B./Arndt, N.: „Metals for a low-carbon Society“ (Supplementary Information). In: *Nature Geoscience*, 6, 2013, S. 894–896.

Viebahn et al. 2015

Viebahn, P./Soukup, O./Samadi, S./Teubler, J./Wiesen, K./Ritthoff, M.: „Assessing the Need for critical Minerals to shift the German Energy System towards a high Proportion of Renewables“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 2015, S. 655–671.

Wagner 1999

Wagner, M. K. F.: „Ökonomische Bewertung von Explorationserfolgen über Erfahrungskurven“. In: *Geologisches Jahrbuch Reihe H*: Heft SH 12, 1999.

Wagner/Wellmer 2009

Wagner, M./Wellmer, F.-W.: „A Hierarchy of Natural Resources with Respect to Sustainable Development – A Basis for a Natural Resources Efficiency Indicator“. In: Richards, J. P.: *Mining, society and a Sustainable World*, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 2009, S. 91–121.

Wedig 2014

Wedig, M.: „Die Entwicklung des Auslandsbergbaus am Beispiel von FAB-Strategien“. In: *Bergbau*, 1, 2014, S. 4–9.

Wegener/Theuvsen 2010

Wegener, J./Theuvsen, L.: *Handlungsempfehlungen zur Minderung von stickstoffbedingten Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft*, Berlin: WWF Deutschland 2010. URL: http://www.uni-goettingen.de/de/document/download/9fd9831506d1021458b96370775b432e.pdf/100720_Stickstoffbroschuere.pdf [Stand: 05.11.2014].

Weihed 2011

Weihed, P.: „Consequences of the RMI and the EU report on critical metals.“ In: *SDMI Proceedings*, Aachen 2011.

Wellmer 1992

Wellmer, F.-W.: „The Concept of Lead Time“. In: *Minerals Industry International*, 1005, 1992, S.39–40.

Wellmer 2008

Wellmer, F.-W.: „Reserves and Ressources of the Geosphere, Terms so often misunderstood. Is the Life Index of Reserves of natural Ressources a Guide to the Future?“. In: *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 159:4, 2008, S. 575–590.

Wellmer 2012-1

Wellmer, F.-W.: „Sustainable Development and Mineral Resources“. In: *Géosciences*, 15, 2012, S. 8–14.

Wellmer 2012-2

Wellmer, F.-W.: „L'enseignement des géosciences minières en Europe“. In: *Géosciences*, 15, 2012, S. 100–101.

Wellmer 2014

Wellmer, F.-W.: „Wie lange reichen unsere Rohstoffvorräte? – Was sind Reserven und Ressourcen?“. In: *umweltforum (uwf)*, 22, 2014, S. 125–132.

Wellmer/Becker-Platen 1999

Wellmer, F.-W./Becker-Platen, J.D. (Hrsg.): *Mit der Erde leben – Beiträge Geologischer Dienste zur Dasesinsvorsorge und nachhaltigen Entwicklung*, Heidelberg: Springer Verlag 1999.

Wellmer et al. 2008

Wellmer, F.-W./Dalheimer, M./Wagner, M.: *Economic Evaluations in Exploration*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 2008.

Wellmer/Dalheimer 2012

Wellmer, F.-W./Dalheimer, M.: „The Feedback Control Cycle as Regulator of past and future Mineral Supply“. In: *Mineralium Deposita*, 47: 7, 2012, S. 713–729.

Wellmer/Hagelüken 2015

Wellmer, F.-W./Hagelüken, C.: „The Feedback Control Cycle of Mineral Supply, Increase of Raw Material Efficiency, and Sustainable Development“. In: *Minerals*, 5, 2015, S. 815–836.

Wellmer/Schmidt 1989

Wellmer, F.-W./Schmidt, H.: „Versorgungslage bei Rohstoffen“. In: *Stahl und Eisen*, 89: 2, 1989, S. 55–60.

Wellmer/Scholz 2015

Wellmer, F.-W./Scholz, R.: „The Right to know the Geopotential of Minerals for ensuring Food Supply Security: The Case of Phosphorus“. In: *Journal of Industrial Ecology*, 19: 1, 2015, S. 3–6.

Werner 2012

Werner, W.: „Schätze unter dem Boden: Was wissen wir über die tiefliegenden Rohstoffe in Baden-Württemberg“. In: *Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i. Br.*, 102, 2012, S.37–92. URL: http://www.lgrb-bw.de/download_pool/naturf_ges_band_102_s37-92_2012.pdf [Stand: 13.11.2014].

WTO 2012

World Trade Organization: *China – Measures related to the Exportation of various Raw Materials*, Reports of the Appellate Body: WT/DS394/AB/R, WT/DS395/AB/R, WT/DS398/AB/R, Genf 2012. URL: https://www.wto.org/english/tratop_e/dispu_e/cases_e/ds394_e.htm [Stand: 22.01.2016].

WTO 2014

World Trade Organization: *China – Measures related to the Exportation of Rare Earths, Tungsten, and Molybdenum*, Reports of the Appellate Body: WT/DS431/AB/R, WT/DS432/AB/R, WT/DS433/AB/R, Genf 2014. URL: https://www.wto.org/english/tratop_e/dispu_e/cases_e/ds431_e.htm [Stand: 22.01.2016].

Wuppertal Institut 2014

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH:
KRESSE – Kritische mineralische Rohstoffe bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems, Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Wuppertal 2014. URL: <http://wupperinst.org/de/projekte/details/wi/p/s/pd/38/> [Stand 15.12.2014].

WWF/Ecofys 2014

World Wide Fund for Nature/Ecofys: *Critical Materials for the Transition to a 100 % sustainable Energy Future*, WWF Report 2014, Gland, Schweiz: WWF International 2014. URL: <http://www.ecofys.com/files/files/wwf-ecofys-2014-critical-materials-report.pdf> [Stand: 29.06.2014].

Zhao/Running 2010

Zhao, M./Running, S. D. W.: „Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009“. In: *Science*, 329, 2010, S. 940–943.

Zika/Erb 2009

Zika, M./Erb, K. H.: „The global loss of net primary production resulting from human-induced soil degradation in dry lands“. In: *Ecological Economics*, 69, 2009, S. 3010–3018.

Über das Akademienprojekt

Mit der Initiative „Energiesysteme der Zukunft“ geben acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für eine faktenbasierte Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland. Acht Arbeitsgruppen (AGs) bündeln fachliche Kompetenzen und identifizieren relevante Problemstellungen. Interdisziplinär zusammengesetzte Ad-hoc-Gruppen erarbeiten Handlungsoptionen zur Umsetzung einer sicheren, bezahlbaren und nachhaltigen Energiewende.

Auf Basis folgender Grundsätze stellt das Akademienprojekt System- und Orientierungswissen für Entscheidungen im Rahmen des Gemeinschaftswerks Energiewende bereit:

Die Energieversorgung unseres Landes ist ein komplexes System

Rohstoffe und Ressourcen, Technologien, Ökonomie, Gesellschaft und Recht: Im Energiesystem gibt es vielfältige, sektorübergreifende Wechselwirkungen. Werden sie nicht ausreichend berücksichtigt, können punktuelle Eingriffe paradoxe, unbeabsichtigte Folgen haben. Ein umsichtiger Umbau der Energieversorgung braucht daher Systemverständnis. Dieses muss gemeinschaftlich und mit höchstem wissenschaftlichem Anspruch erarbeitet werden. Den Masterplan für die Energiewende kann es jedoch nicht geben. Energiewende bedeutet nämlich die stetige Transformation des Energiesystems in all seiner Dynamik.

Der Sinn der Energiewende ist Nachhaltigkeit

Daher müssen wir uns darauf verständigen, welche Kriterien für eine nachhaltige Energieversorgung gelten sollen und wie Fortschritte in Richtung Nachhaltigkeit gemessen werden können. Im Energiekonzept der Bundesregierung bilden Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit das Zieldreieck einer nachhaltigen Energieversorgung. Sozialverträglichkeit und Gerechtigkeit müssen angemessen berücksichtigt werden. Um festzustellen, ob diese Ziele gleichwertig oder unterschiedlich zu gewichten sind, braucht das Land eine Wertediskussion und gute Verfahren für den Umgang mit Wertekonflikten.

Wissenschaft erarbeitet Gestaltungsoptionen

Auf Basis wissenschaftlich fundierter Gestaltungsoptionen können Akteure aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft sachlich begründete, ethisch verantwortbare und politisch umsetzbare Entscheidungen treffen. Im Unterschied zu Handlungsempfehlungen, die einen bestimmten Vorschlag in den Mittelpunkt rücken, beschreiben Optionen, mit welchen Konsequenzen zu rechnen ist, wenn man sich für das eine oder andere Vorgehen entscheidet. So kann Wissenschaft aufzeigen, welche Vor- und Nachteile nach dem besten Stand des Wissens mit jeder Lösung verbunden sind. Der Umgang mit Zielkonflikten und der immer verbleibenden Unsicherheit im Entscheidungsprozess aber ist eine politische Aufgabe, die im Dialog mit den gesellschaftlichen Gruppen zu bewältigen ist.

Mitwirkende des Projekts

Arbeitsgruppen des Projekts

AG Ausgangssituation	AG Recht	AG Technologien
AG Gesellschaft	AG Ressourcen	AG Umsetzungsoptionen
AG Ökonomie	AG Szenarien	

Mitwirkende der AG Ressourcen

Die vorliegende Analyse wurde von der Arbeitsgruppe Ressourcen erarbeitet.

Prof. Dr. rer. nat. Peter Herzig (AG-Leiter)	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Dr. Gerhard Angerer	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Dr. Peter Buchholz	Deutsche Rohstoffagentur, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Prof. Dr. Jens Gutzmer	TU Bergakademie Freiberg, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie
Dr.-Ing. Christian Hagelüken	Umicore
Prof. Dr. rer. nat. Ralf Littke	RWTH Aachen
Tobias Kracke (Wissenschaftlicher Referent)	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Prof. Dr. Rudolf K. Thauer	Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie
Prof. Dr.-Ing. Friedrich- Wilhelm Wellmer	Ehemaliger Präsident Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Institutionen und Gremien

Beteiligte Institutionen

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (federführend)

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Steuerkreis

Der Steuerkreis koordiniert die Arbeit in acht interdisziplinären, thematischen Arbeitsgruppen.

Prof. Dr. Robert Schlögl (Vorsitzender)	Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft und Max-Planck-Gesellschaft für Chemische Energiekonversion
Prof. Dr. Peter Elsner	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie
Prof. Dr. Armin Grunwald	Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
Prof. Dr. Peter Herzig	GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
Prof. Dr. Ortwin Renn	Universität Stuttgart, Institut für Sozialwissenschaften, Abteilung für Technik- und Umweltsoziologie; Institute for Advanced Sustainability Studies
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung

Prof. Dr. Ferdi Schüth	Max-Planck-Institut für Kohlenforschung
em. Prof. Dr. Rüdiger Wolfrum	Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht, Heidelberg
Prof. Dr. Eberhard Umbach	acatech Präsidium

Kuratorium

Das Kuratorium verantwortet die strategische Ausrichtung der Projektarbeit.

Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl (Vorsitzender)	acatech Präsident
Prof. Dr. Jörg Hacker	Präsident Leopoldina
Prof. Dr. Dr. Hanns Hatt	Präsident Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, Präsident Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften und der Künste (bis Ende 2015)
Prof. Dr. Bärbel Friedrich	Mitglied Leopoldina Präsidium, Ehemalige Vizepräsidenten Leopoldina
Prof. Dr. Jürgen Gausemeier	Mitglied acatech Präsidium
Prof. Dr. Martin Grötschel	Präsident Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
Prof. Dr. Andreas Löschel	Universität Münster, Vorsitzender der Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“
Prof. Dr. Klaus Töpfer	Ehemaliger Exekutivdirektor Institute for Advanced Sustainability Studies
Dr. Georg Schütte (Gast)	Staatssekretär Bundesministerium für Bildung und Forschung
Rainer Baake (Gast)	Staatssekretär Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Dr. Ingrid Wüning Tschol (Gast)	Bereichsdirektorin „Gesundheit und Wissenschaft“ Robert-Bosch-Stiftung

Projektkoordination

Dr. Ulrich Glotzbach	Leiter der Koordinierungsstelle, acatech
----------------------	--

Rahmendaten

Projektlaufzeit

04/2013 bis 02/2016

Finanzierung

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen EDZ 2013) und der Robert-Bosch-Stiftung gefördert.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Robert Bosch Stiftung

Koordinierungsstelle:

Dr. Ulrich Glotzbach
Leiter der Koordinierungsstelle Energiesysteme der Zukunft
Hauptstadtbüro
Pariser Platz 4a, 10117 Berlin
Tel.: +49 (0)30 206 7957 - 32
E-Mail: glotzbach@acatech.de

Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft

ISBN: 978-3-9817048-6-0