Peter Kausch
Jörg Matschullat
Martin Bertau
Helmut Mischo *Hrsg.*

Rohstoffwirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung

Die nächsten 50 Jahre

Springer Spektrum

Rohstoffwirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung

Peter Kausch • Jörg Matschullat
Martin Bertau • Helmut Mischo (Hrsg.)

Rohstoffwirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung

Die nächsten 50 Jahre

Springer Spektrum

Herausgeber
Peter Kausch
TU Bergakademie Freiberg
Freiberg, Deutschland

Martin Bertau
TU Bergakademie Freiberg
Freiberg, Deutschland

Jörg Matschullat
Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum
TU Bergakademie Freiberg
Freiberg, Deutschland

Helmut Mischo
TU Bergakademie Freiberg
Freiberg, Deutschland

Übersetzung der Kapitel 1, 2, 3, 7, 15 sowie von Einzelzitaten in allen Kapiteln aus dem Englischen: Jörg Matschullat. Übersetzung von Teilen des Kapitels 1 aus dem Französischen: Helmut Mischo.

ISBN 978-3-662-48854-6 ISBN 978-3-662-48855-3 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-48855-3

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Springer Spektrum
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Planung: Merlet Behncke-Braunbeck
Satz und Layout sowie Optimierung der Grafiken: Anne Marie de Grosbois
Bildcollagen Seiten 1, 119, 185: Anne Marie de Grosbois

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

Geleitwort

Dipl.-Kfm.
Hans Joachim Welsch

Wissen ist der einzige Rohstoff, der auf unserer Erde unbeschränkt zur Verfügung steht und der sich bei Gebrauch nicht abnutzt, sondern sogar vermehrt.

Horst Köhler (*22.02.1943),
ehem. Bundespräsident am 15.07.2006

Dieses Zitat beinhaltet die beiden Kernbegriffe „Rohstoff“ und „Wissen“, die wiederum für das Symposium Freiberger Innovationen stehen. Diese Veranstaltung wird seit 2002 dankenswerterweise durch die TU Bergakademie Freiberg und das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie organisiert und genießt mittlerweile höchstes Renommee. Das Symposium bietet Entscheidungsträgern aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft die Möglichkeit, über die aktuellen Herausforderungen ei-ner sicheren und nachhaltigen Rohstoffversorgung zu diskutieren, nach Lösungen zu suchen und neues Wissen zu kumulieren.

Bei der Rohstoffversorgung sind Politik und Wirtschaft gleichermaßen gefordert: Freier Handel schafft Zugänge, Know-how im sorgsamen Umgang die nötige Effizienz. Die Rolle der Wissenschaft ist in diesem Prozess nicht zu unterschätzen. Die Wirtschaft ist auf die Forschungsergebnisse der Universitäten und der außeruniversitären wissenschaftlichen Institutionen angewiesen.

Von einem intensiven Austausch zwischen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft profitiert die Gesellschaft im Ganzen. Die Versorgung der Wirtschaft mit Rohstoffen muss insgesamt den Grundsätzen der Nachhaltigkeit genügen, d. h., sie muss ökologisch, ökonomisch und sozial verträglich sein. Sie ist angesichts ihrer wirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen von gesamtgesellschaftlicher Bedeutung.

Rohstoffsicherheit ist schließlich kein Selbstzweck, sondern entscheidende Voraussetzung für die Wettbewerbs- und Zukunftsfähigkeit der gesamten industriellen Wertschöpfungskette und damit für Wohlstand, Wachstum und Beschäftigung in Deutschland und Europa.

Dies zeigt sich auch anhand der involvierten Mengen: So ist weitgehend unbekannt, dass jeder Deutsche durchschnittlich etwa 1000 Tonnen (t) Rohstoffe in seinem Leben verbraucht. Diese Zahl ist bemerkenswert. Und auch die jährlichen Ausgaben Deutschlands für Rohstoffe beeindrucken: Statistisch gesehen erreicht das gesamte Rohstoffaufkommen Deutschlands fast 170 Mrd. € im Jahr. Davon entfallen rund 9 % auf die heimische Förderung, 6 % auf Recycling sowie 85 % auf Importe. Mit heimischer Rohstoffproduktion lässt sich die große Importabhängigkeit Deutschlands zwar verringern. Bei Nichteisen-Metallen, Metallerzen und -konzentraten, einzelnen Industriemineralen sowie bei zahlreichen Zwischenprodukten bleibt Deutschland jedoch auf weltweite Importe angewiesen; ein verantwortungsvoller und effizienter Umgang mit diesen Ressourcen ist schon daher unerlässlich.

Ich danke allen Beteiligen, die an der Entstehung dieses Buches mitgewirkt haben, und wünsche Ihnen, liebe Leserin und lieber Leser, viel Freude bei der überaus interessanten Reise durch die Welt der Rohstoffe. Mit einem herzlichen Glückauf!

Hans Joachim Welsch

Vorsitzender des Ausschusses für Rohstoffpolitik des Bundesverbandes der Deutschen Industrie, Geschäftsführer ROGESA Roheisengesellschaft Saar mbH und Geschäftsführer Zentralkokerei Saar GmbH

Vorwort der Herausgeber

Ressourcen – Rohstoffe – und Zukunft. Wir leben in einer Welt zunehmenden materiellen Wohlstands und aktuell auch wieder zunehmender Konflikte. Letztere erreichen derzeit Europa und Deutschland und kommen auch in Form von Flüchtlingen aller Art zu uns. Ein Teil dieser Flüchtlinge flieht vor nichts anderem als brutalem Krieg und Verfolgung, ein anderer Teil flieht heimische Randbedingungen, die wir in den meisten Teilen Europas seit geraumer Zeit hinter uns gelassen haben – wie strukturelle Ungerechtigkeit, Rechtsunsicherheit, Missachtung von Grundrechten und schlechte wirtschaftliche Randbedingungen. Die positiven Errungenschaften haben aus Europa in den letzten Jahrzehnten einen Sehnsuchtsort für viele Menschen außerhalb Europas gemacht, der in seiner mentalen Projektion oft stark überhöht als Beinah-Paradies sorglosen Lebens und großer sozialer und politischer Stabilität wahrgenommen wird. Soweit ein Teil der Außensicht.

Von innen betrachtet stellt sich dieses Bild deutlich differenzierter dar. Die Basis des Wohlstands ist nicht allein eine Geisteshaltung, die sich auch aus der brutalen Erfahrung von Kolonialgeschichte und zweier Weltkriege zu einer europäischen Wertegemeinschaft zusammenfand, die zumindest versucht, Konflikte anders zu lösen. Die Basis des Wohlstands ist zugleich eine dominant rohstoffbasierte industrielle Produktivität. Diese einfache Tatsache vergessen Viele. Für mineralische und energetische Rohstoffe gilt in diesem Fall eine ähnlich sarkastische Formulierung wie für Milch und Strom, die aus dem Supermarkt beziehungsweise aus der Steckdose zu uns kommen – die Bereitstellung von Rohstoffen wird schlicht als selbstverständlich vorausgesetzt. Das führt auch dazu, dass manche politische Entscheidung und darauf basierende Regelwerke zusätzliche Anforderungen an die Industrie in Europa stellen, die deren Wettbewerbsfähigkeit auf dem Weltmarkt herausfordern. Dabei gilt es, den schmalen Grad zwischen realistischer Innovationsfähigkeit und Kollaps beziehungsweise Auslagerung der Produktion in Drittländer auszuloten.

Zugleich wird weitestgehend verdrängt, welche Konsequenzen mit der Rohstoffwirtschaft verbunden sind, von der alle Industrienationen abhängen wie jeder Mensch von regelmäßiger Nahrungszufuhr. Olivier Vidal, Richard Herrington und Nicholas Arndt (► Kap. 1) beschreiben in ihrem Beitrag eindrucksvoll, wie die Rohstoffgewinnung in den vergangenen Jahrzehnten schleichend aus dem Herzen Europas an seine Peripherie gewandert ist, und wie sich Europa zudem von Produktionsstandorten auf anderen Kontinenten abhängig gemacht hat. „Wasch mir den Pelz, doch mach mich nicht nass“ ist dafür eine schöne Metapher. Ein Teil dieser Entwicklung ist zweifellos der Erfahrung massiver Umweltschäden in Europa geschuldet (und damit verbundener Kosten für die Allgemeinheit), die mit früherer Bergbau- und Verhüttungstechnologie verbunden ist. Dabei verdrängen wir zugleich, dass in vielen Fällen an den aktuellen Herkunftsorten von Rohstoffen für unsere Industrieproduktion weder die sozialen noch die

umweltbezogenen Standards gelten, die wir heute für selbstverständlich halten. Doch da diese Abbaustandorte weit von uns entfernt liegen, können wir das – anders als die aktuellen Flüchtlingsströme – noch immer verdrängen.

Dieser Band bietet Ihnen weit mehr als eine Bestandsaufnahme. Er zeigt anschaulich, welche Anstrengungen derzeit unternommen werden, um nicht länger verdrängen zu müssen, dass wir auch in Zukunft auf Rohstoffe angewiesen sind, dass unser (auch materielles) Wohlergehen davon abhängt, weiterhin technologisch kreativ und erfolgreich sein zu können – und dass es mehr als wünschenswert ist, wenn sich die hohen sozialen und Umweltstandards, die wir eingeführt haben, auch weltweit durchsetzen können. Dabei versteht es sich beinahe von selbst, dass diese Standards stetig weiterzuentwickeln sind. Und das Buch verdeutlicht, dass neben rein technischen Herausforderungen auch mentale Hürden zu überwinden sind. Sich auf Erreichtem auszuruhen ist selten ein guter Rat in einer dynamischen Welt. Den Wohlstand zu bewahren und dazu beitragen zu können, dass es auch anderen Menschen auf anderen Kontinenten stetig besser geht, ist allein über erfolgreiche Innovationen und über ein beispielgebendes Verhalten möglich. Deshalb plädieren wir ausdrücklich auch für eine größere Offenheit der Wohlstandsgesellschaften und die Bereitschaft, die notwendige Tiefe von Wertschöpfungsketten auch im eigenen Vorgarten willkommen zu heißen.

In Weiterführung unserer Bemühungen, den Themenkomplex um mineralische und energetische Rohstoffe in aktueller, differenzierter und vor allem undogmatischer Weise einer breiteren Öffentlichkeit an die Hand zu geben (siehe die Bücher der Herausgeber: 2005 *Rohstoffe der Zukunft – Neue Basisstoffe und neue Energien; 2011 Energie und Rohstoffe: Gestaltung unserer nachhaltigen Zukunft; 2014 Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge)* blicken wir mit diesem Buch in die kommenden fünf Jahrzehnte bis zum Jahr 2065. Natürlich vermag niemand mit Sicherheit zu sagen, mit welchen Randbedingungen die Menschheit allgemein und wir Europäer im Besonderen bis dahin konfrontiert sein werden. Dennoch sind Entwicklungslinien erkennbar und ableitbar, die sich absehbar aus gesellschaftspolitischen und eher technischen Erkenntnissen ergeben, für die uns wesentliche Informationen bereits heute zur Verfügung stehen. Um die Orientierung zu erleichtern, liefern wir nicht allein Quellennachweise für wichtige Informationen, die nicht direkt aus der Arbeit der jeweiligen Autoren stammen (Zitate), sondern geben auch Querverweise auf andere Kapitel in diesem Band (▶ Kap. X), über die hilfreiche oder anregende Ergänzungen und Erweiterungen der jeweiligen Aussagen gefunden werden können.

Es ist es keineswegs so, dass wir in eine apokalyptische Zukunft blicken müssen. Erfolgreiche Innovationen auf den Gebieten der Energieverfahrenstechnik einschließlich der Energiespeichertechnik, der Ressourcentechnologien von der Erkundung bis zum Recycling und der Substitution lassen es als realistisch erscheinen, ohne Furcht vor Verknappung in die Zukunft zu schauen. Zugleich – und dies ist vielleicht die entscheidende weitere Randbedingung – muss die Entwicklung zu einer kohlenstoffarmen Gesellschaft erfolgreich voranschreiten und müssen stetig höhere Umweltstandards weltweit etabliert und durchgesetzt werden. Nur dann ist mit einer breiten Akzeptanz zu rechnen. Perspektivisch entspannt wird die Situation zugleich durch den beobachteten globalen demographischen Wandel. Eine bereits jetzt langsamer wachsende Weltbevölkerung wird aller Voraussicht nach etwa zum Ende des Jahrhunderts ein Plateau erreichen (▶ Kap. 17) und in folgenden Jahrzehnten eher wieder sanft absinken – parallel zu höherem Bildungsstand, besserer Gesundheitsversorgung und weiterem Wohlstand.

Freiberg im November 2015

Jörg Matschullat, Peter Kausch, Martin Bertau, Helmut Mischo

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort v

Vorwort der Herausgeber vii

Autorenverzeichnis xiii

Teil I Verfügbarkeit primärer Ressourcen und Effizienz 1

1 Metalle für Europas Industrie — ob die Öffentlichkeit sie will oder nicht? . . 3
1.1 Am Beginn eines Paradigmenwechsels? 3
1.2 Metalle für eine kohlenstoffarme Gesellschaft 4
1.3 Heimische Rohstoffe in Europa 11
1.4 Die gesellschaftliche Lizenz zum Bergbau 14

2 Innovationen in Abbau und Verarbeitung Seltener Erden 19
2.1 Wechselwirkung von Bergbau und Technologie 19
2.2 Anwendung von Seltenerdelementen 20
2.3 Quellen der Seltenerdelemente 21
2.4 Das Verhältnis von Bergbau zu Industrie 24
2.5 Was kommt als Nächstes? 25

3 Antworten auf die Kritikalität von Materialien: Historische Beispiele 29
3.1 Kritische Materialien 29
3.2 Kollaps der Bronzezeit (~ 1.200 v. Chr.) 29
3.3 Ammoniak und Stickstoff (spätes 19. und frühes 20. Jahrhundert) 30
3.4 Kobalt und Molybdän (späte 1970er- bis frühe 1980er-Jahre) 31
3.5 Seltene Erden (2000er-Jahre) 31
3.6 General Electric (2000er-Jahre) 33
3.7 Schlussgedanken 34

4 Globale Angebotskonzentration von mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten 37
4.1 Dynamik bei mineralischen und energetischen Ressourcen 37
4.2 Herausforderungen auf den Rohstoffmärkten 38
4.3 Methodik der Kritikalitätsbetrachtung für mineralische Rohstoffe und Handelsprodukte 39
4.4 Potenzielle Preis- und Lieferrisiken für mineralische Rohstoffe und Handelsprodukte erkennen 41
4.5 Ausweichstrategien entwickeln 43

5 Phosphatrecycling aus Klärschlammaschen — warum Phosphorsäure der Königsweg ist 49
5.1 Einführung 49
5.2 Rohstoffsituation und Verfügbarkeit 50
5.3 Gründe für das Phosphatrecycling 52
5.4 Die Schwermetallfrage 53
5.5 Klärschlamm als anthropogene Phosphatquelle 55
5.6 Ansätze zum Phosphatrecycling 56
5.7 Mineralogie der Klärschlammaschen 57
5.8 P-Recycling unter Berücksichtigung der Aschemineralogie 58
5.9 Phosphatrecycling aus KSA – Phosphorsäure ist das Produkt der Wahl 59

6 Recycling von seltenen Metallen und deren Verbindungen 65
6.1 Sonderfall Seltene Metalle 65
6.2 Recycling seltener Metalle 66
6.3 Endreinigung der seltenen Metalle 69

7 Metalle: Aktivatoren von Kreislaufwirtschaft und Recycling 4.0 73
7.1 Einleitung 73
7.2 Produktzentriertes Recycling – Aktivieren von Kreislaufwirtschaft und Recycling 4.0 77
7.3 Recyclingpolitik, die eine Kreislaufwirtschaft ermöglicht 80
7.4 Chancen und Risiken von Recycling 82
7.5 Eine Kreislaufwirtschaft entwickeln: Die Ressourceneffizienz aus Abbildung 7.1 quantifizieren 90
7.6 Schlussfolgerungen: Kreislaufwirtschaft mit Systemintegrierter Metallproduktion ermöglichen 92

8 Magnetische Materialien — Schlüsselkomponenten für neue Energietechnologien 99
8.1 Magnetische Materialien im Fokus von Industrie und Gesellschaft. 99
8.2 Permanentmagnete – Grundlagen 101
8.3 Die Ressourcenkritikalität seltenerdhaltiger Permanentmagnete 104
8.4 Ausblick: Seltene Erden und Permanentmagnete – ein Engpass für die Energiewende? 115

Teil II Ressourcentechnologien und -strategien 119

9 Forschung für Nachhaltigkeit 121
9.1 Einleitung: Forschungspolitischer Rahmen 121
9.2 Herausforderung 1: Erhöhung der Rohstoffproduktivität 123
9.3 Herausforderung 2: Sicherung der Rohstoffbasis für die deutsche Industrie 124
9.4 Herausforderung 3: Verbreiterung der Rohstoffbasis – CO_2 als alternative Rohstoffquelle erschließen 126
9.5 Ausblick 127

10 Energiekosten und Investitionsentwicklung in einem Unternehmen der Metallindustrie 129
10.1 Wirtschaftliche und gesetzgeberische Randbedingungen 129
10.2 Kupfer und die Energiewende 130
10.3 Der Kreis schließt sich: Leistung versus Kosten und Energieaufwand 132

11 Veränderung in der Rohstoffbasis in der Petrochemie und die Auswirkungen auf Europa 135

12 Methanol — der Schlüssel zur Energie- und Rohstoffwende 141
12.1 Einführung 141
12.2 Methanol im Mobilitätssektor 145
12.3 PtG als Alternative? 147
12.4 Methanol als Energiespeicher 148
12.5 Methanol als Chemierohstoff 151
12.6 Coal-to-Chemicals — die Zukunft hat bereits begonnen 151
12.7 Die Situation in Deutschland 154
12.8 Zusammenfassung 156

13 EIT RawMaterials: Einführung in eine neue Wissens- und Innovationsgemeinschaft 159
13.1 EIT RawMaterials 159
13.2 Aktivitäten von EIT RawMaterials als Service-Angebote 162
13.3 Ziele für die kommenden sieben Jahre 163

14 Demographie und Rohstoffe — Wechselseitige Einflüsse 165
14.1 Die Ausgangslage 165
14.2 Demographische Veränderungen 166
14.3 Metallische Rohstoffe: Status und Anforderungen 168
14.4 Energetische Rohstoffe: Status und Anforderungen 173
14.5 Die Energiewende in Deutschland 176
14.6 Konsequenzen 180
14.7 Ausblick 181

Teil III Zukünftige Herausforderungen und Lösungsansätze 185

15 Ressourcentechnologien 2065 187
15.1 Trends beim Ressourcenverbrauch 187
15.2 Alternativen für die Ressourcenbereitstellung 190
15.3 Trends bei Rohstofftechnologien 192
15.4 Schlussfolgerungen 198

16 Ansatzpunkte einer globalen ökologischen Wende: Ressourcen- und Schadensentkopplung 201
16.1 Grenzerreichung – Grenzüberschreitung 201
16.2 Erstes Beispiel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation 201
16.3 Zweites Beispiel: Relative oder absolute Entkopplung? 202
16.4 Ein Zwischenfazit 204
16.5 Drittes Beispiel: Global Environmental Governance 206
16.6 Kollaps oder planetarische Kooperation? 207

17 Mittel- und langfristige Energie- und Rohstoffherausforderungen — die nächsten 50 Jahre… 209
17.1 Prolog 209
17.2 Worin bestehen die mittel- und langfristigen Herausforderungen? 210
17.3 Wie können wir die Herausforderungen meistern? – Lösungsansätze 215
17.4 Strategieempfehlungen 222

Erratum E1

Sachverzeichnis 227

Autorenverzeichnis

Arndt, Prof. Dr. Nicholas
Université Joseph Fourier Grenoble
Institut des Sciences de la Terre (ISTerre)
38041 Grenoble Cedex 9
France
arndt@ujf-grenoble.fr

Bertau, Prof. Dr. Martin
Direktor des Instituts für Technische Chemie
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Leipziger Straße 29
D-09599 Freiberg
martin.bertau@chemie.tu-freiberg.de

Buchholz, Dr. Peter
Leiter der Deutschen Rohstoffagentur (DERA)
in der Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR),
Dienstbereich Berlin
Wilhelmstraße 25–30
D-13593 Berlin-Spandau
peter.buchholz@bgr.de

Eggert, Prof. Dr. Roderick
Colorado School of Mines
Golden, Colorado, USA
Deputy Director, Critical Materials Institute,
Ames, Iowa, USA
reggert@mines.edu

Fröhlich, Dr. Peter
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Institut für Technische Chemie,
D-09599 Freiberg
peter.froehlich@chemie.tu-freiberg.de

Gauß, Dr. Roland
Geschäftsbereichsleitung
Substitution – Magnetische Materialien-
Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC,
Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und
Ressourcenstrategie IWKS
Rodenbacher Chaussee 4
D-63457 Hanau
roland.gauss@isc.fraunhofer.de

Gehrckens, Ulf
Senior Vice President Corporate Energy
Affairs, Aurubis AG
Hovestrasse 50
D-20539 Hamburg
u.gehrckens@aurubis.com

Greb, M.Sc. Valentin Gregor
TU Bergakademie Freiberg
Institut für Technische Chemie,
D-09599 Freiberg
valentin-gregor.greb@chemie.tu-freiberg.de

Gutfleisch, Prof. Dr. Oliver
Technische Universität Darmstadt,
Fachbereich Funktionale Materialien,
Alarich-Weiss-Str. 16, D-64287 Darmstadt
gutfleisch@fm.tu-darmstadt.de

Wissenschaftlicher Leiter
Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC,
Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und
Ressourcenstrategie IWKS
Rodenbacher Chaussee 4, D-63457 Hanau
oliver.gutfleisch@isc.fraunhofer.de

Gutzmer, Prof. Dr. Jens
Direktor Helmholtz-Institut Freiberg für
Ressourcentechnologie, Helmholtz-Zentrum
Dresden-Rossendorf (HZDR)
Halsbrücker Straße 34, D-09599 Freiberg
j.gutzmer@hzdr.de

Professur für Lagerstättenlehre und
Petrologie, Institut für Mineralogie
Technische Universität Bergakademie Freiberg
D-09596 Freiberg
jens.gutzmer@mineral.tu-freiberg.de

Herrington, Prof. Dr. Richard
The Natural History Museum
Head of Earth Sciences Department
Cromwell Road
London SW7 5BD England
r.herrington@nhm.ac.uk

Huy, Dr. Dieter
Bundesanstalt für Geowissenschaften und
Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
D-30655 Hannover
dieter.huy@bgr.de

Kammer, Dr.-Ing. Ulrich
PPM Pure Metals GmbH
Geschäftsführer Technik
Am Bahnhof 1
D-38685 Langelsheim
ulrich.kammer@recylex.de

Kausch, Prof. Dr. Peter
Honorarprofessor für Umwelt- und
Ressourcenmanagement
Technische Universität Bergakademie Freiberg
D-09599 Freiberg
peter@kausch-net.de

Kellermann, Dipl.-Vw Gunther-Alexander
Senior Manager Communications &
Government Relations BASF Group
Energy & Climate Policy, BASF SE
ZOA/EE - C100, D-67056 Ludwigshafen
gunther-alexander.kellermann@basf.com

Klossek, Dr. Andreas
EIT RawMaterials GmbH
Anna-Louisa-Karsch-Str. 2
D-10178 Berlin
andreas.klossek@eitrawmaterials.eu

Kraft, M. Sc. Michael
Instituts für Technische Chemie
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Leipziger Straße 29
D-09599 Freiberg

Lieberwirth, Prof. Dr.-Ing. Holger
Direktor Institut für Aufbereitungsmaschinen
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Lampadiusstr. 4,
D-09599 Freiberg
holger.lieberwirth@iam.tu-freiberg.de

Liedtke, Maren
Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und
Rohstoffe (BGR), Dienstbereich Berlin
Wilhelmstraße 25–30
D-13593 Berlin
maren.liedtke@bgr.de

Matschullat, Prof. Dr. Jörg
Direktor Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum (IÖZ)
Professur für Geochemie und Geoökologie
Institut für Mineralogie
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Brennhausgasse 14,
D-09596 Freiberg
joerg.matschullat@ioez.tu-freiberg.de

Mennicken, PD Dr. sc. Lothar
Referat Ressourcen und Nachhaltigkeit
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Heinemannstraße 2,
D-53175 Bonn
lothar.mennicken@bmbf.bund.de

Mischo, Prof. Dr.-Ing. Helmut, Pr. Eng.
Professur für Rohstoffabbau und Spezialverfahren unter Tage
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Fuchsmühlenweg 9
D-09596 Freiberg
helmut.mischo@mabb.tu-freiberg.de

Offermanns, Prof. Dr. Heribert
Vorstandsmitglied der Degussa AG (1976)
Honorarprofessor der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt a. M. (2000)
Grünaustraße 2
D-63457 Hanau
heppoff@gmx.de

Plass, Dr-Ing. Ludolf
Sr VP Sales Technology Athen Air Liquide
Parkstraße 11
D-61476 Kronberg
dr.ludolf.plass@t-online.de

Räuchle, Dr. Konstantin
Institut für Technische Chemie,
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Leipziger Straße 29
D-09599 Freiberg
konstantin.raeuchle@chemie.tu-freiberg.de

Reuter, Prof. Dr. Dr. h.c. Markus A
Direktor Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)
Halsbrücker Straße 34
D-09599 Freiberg
m.reuter@hzdr.de
Technische Universität Bergakademie Freiberg
D-09596 Freiberg

Schmidt, Michael
Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Dienstbereich Berlin
Wilhelmstraße 25–30
D-13593 Berlin
michael.schmidt@bgr.de

Schulz, Prof. Dr. Bernhard
Lagerstättenlehre und Petrologie
Institut für Mineralogie
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Brennhausgasse 14
D-09596 Freiberg
bernhard.schulz@mineral.tu-freiberg.de

Schulz, Dipl. Geoökol. Tina
Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)
Halsbrücker Straße 34, D-09599 Freiberg
t.schulz@hzdr.de

Simonis, Prof. em. Dr. Dr. h.c. Udo E.
Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB)
Reichpietschufer 50
D-10785 Berlin
udo.simonis@wzb.eu

Vidal, Prof. Dr. Olivier
Université Joseph Fourier Grenoble
Institut des Sciences de la Terre (ISTerre),
1381 Rue de la Piscine, BP 53
38041 Grenoble Cedex 9
France
olivier.vidal@ujf-grenoble.fr

Watanabe, Prof. Dr. Yasushi
Akita University, Faculty of International Resource Sciences
Tegatagakuen-machi, Akita City 010-8502
Japan
y-watanabe@gipc.akita-u.ac.jp

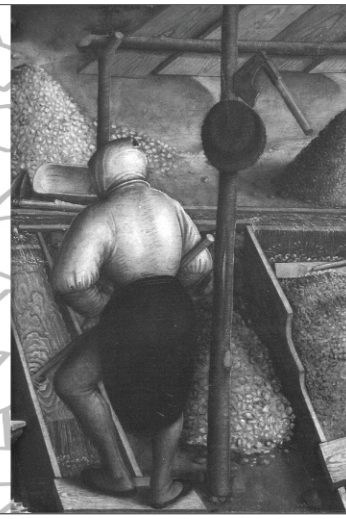
Weigand, Prof. Dr. Harald
Technische Hochschule Mittelhessen
Fachbereich KMUB, Abfallwirtschaft
Wiesenstraße 14
D-35390 Gießen
harald.weigand@kmub.thm.de

Welsch, Dipl. ökon. Hans Joachim
Geschäftsführer ROGESA Roheisengesellschaft Saar mbH und
Zentralkokerei Saar GmbH,
Dillingen, Deutschland

Vorsitzender des Bundesverbandes der Deutschen Industrie-Rohstoffausschuß
hans-joachim.welsch@rogesa.de

Teil 1

Verfügbarkeit primärer Ressourcen und Effizienz



Bildquellen der vorangehenden Seite

Links: Bergmännisches Leben vor 500 Jahren, Teil eines Bergaltars der St. Annenkirche in Annaberg-Buchholz, Sachsen. Rechts: Hochwertige Produkte mit modernster Technik werden durch die Elbe-Stahlwerke Feralpi GmbH in Riesa, Sachsen, gefertigt. Fotos © Jörg Matschullat

1 Metalle für Europas Industrie — ob die Öffentlichkeit sie will oder nicht?

Olivier Vidal, Richard Herrington und Nicholas Arndt

1.1 Am Beginn eines Paradigmenwechsels?

Arnaud Montebourg, der französische Staatsminister der „Industriellen Wiederbelebung" kündigte im Jahr 2012 an, dass die Regierung neue Genehmigungen zur Rohstofferkundung erteilen würde – die ersten nach mehr als zwanzig Jahren. Parallel dazu teilte er die Einrichtung einer nationalen Bergbaugesellschaft mit und erklärte: „Frankreich soll wieder zu einer Bergbaunation werden". Unter den zahlreichen Kommentaren, die auf diese Ankündigungen folgten, gab es diesen: „Das Nächste, was er vorschlagen wird, sind Dampfmaschinen, Zugpferde und Kerzenfabriken!".

Dies illustriert die Auffassung der europäischen Öffentlichkeit zur Bergbauindustrie recht gut. Innerhalb der vergangenen zwei bis drei Jahrzehnte wurden nahezu alle Minen in Mitteleuropa geschlossen (mit Ausnahme der Braunkohle, deren Abbau sich paradoxerweise im Deutschland der „Energiewende" noch verstärkt hat). Gemeinsam hatten Politiker, die Öffentlichkeit und die Industrie angenommen, dass Metalle, die für die europäische Industrie notwendig sind, auf dem Weltmarkt gekauft werden können und dass der Bergbau begrenzt wäre – am ehesten am äußeren Rand des Kontinentes in dünn besiedelten Gebieten oder in ärmeren Ländern wie Irland, in Osteuropa und um das Mittelmeer, sowie denen in Skandinavien (► Abschnitt 1.3).

Diese angenehme Situation erfuhr einen mächtigen Schock, als die chinesische Regierung im Jahr 2008 Exporteinschränkungen auf Seltenerdelemente einführte (Kingsnorth 2014). In diesem Moment verstand die Welt, dass Metalle, die unerlässlich sind für moderne Technologien – in diesem Fall für Mobiltelefone, Hybridfahrzeuge, Windenergie usw. – von einer kleinen Zahl nicht immer zuverlässiger Lieferanten kommen, und dass diese Lieferanten den Weltmarkt stören oder manipulieren können, um ihre eigenen Interessen durchzusetzen. Die Entscheidungsträger in Brüssel mussten lernen, dass nahezu jedes Metall, das von der europäischen Industrie genutzt wird, importiert werden muss (Abb. 1.1) und sie reagierten – typisch EU – mit der Lancierung einer Reihe von komplizierten und teilweise überlappenden Programmen, um die Rohstoffindustrie des Kontinents zu unterstützen. Einige davon sind in Tabelle 1.1 aufgeführt. Das übergreifende Ziel dieser Programme gilt der Verringerung der europäischen Abhängigkeit von importierten Mineralprodukten über eine umfassende Reihe von Maßnahmen. Diese reicht von der Anhebung der Rückgewinnungsraten (Recycling) (► Kap. 5–7) über das Finden von Substituten für begrenzt vorhandene mineralische Rohstoffe oder Metalle (► Kap. 8) bis hin zur Befürwortung heimischer Rohstofferkundung und des neuerlichen Abbaus.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016
P. Kausch et al., (Hrsg.), *Rohstoffwirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung*,
DOI 10.1007/978-3-662-48855-3_1

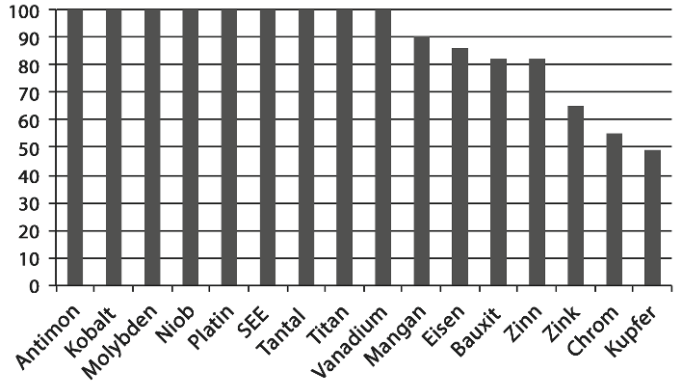


Abb. 1.1 Anteil (%) der aus nichteuropäischen Staaten importierten Metalle, die in der europäischen Industrie genutzt werden. Datenquelle: Eurostat (2015)

In diesem Beitrag geben wir einen kurzen Überblick über die wissenschaftlichen, wirtschaftlichen und sozialen Einflussgrößen, die Angebot und Nachfrage von mineralischen Produkten in Europa über die nächsten Jahrzehnte beeinflussen oder sogar bestimmen werden. Wir beschreiben den zukünftigen Bedarf an Metallen und betonen die wachsende Nachfrage, die aus der Entwicklung neuer Technologien entsteht – besonders solche, die uns zu einer kohlenstoffarmen Gesellschaft (*low carbon society*) führen sollen. Abschließend untersuchen wir, wo in Europa neue Lagerstätten gefunden werden könnten und wir diskutieren die Hindernisse, welche die Entwicklung und Nutzung dieser Ressourcen verkomplizieren oder gar verhindern können.

1.2 Metalle für eine kohlenstoffarme Gesellschaft

Eine der großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts ist die technische Transformation zur Nutzung kohlenstoffarmer Energie, die den schnellen Aufbau von Infrastrukturen zur Energieproduktion aus erneuerbaren Quellen sowie zu Lagerung, Verteilung und Nutzung von Elektrizität erfordert. Dies betrifft ebenso Technologien zur Energieeinsparung, z. B. durch die Herstellung leichterer und widerstandsfähigerer Legierungen im Transportwesen, für Niedrigenergielampen oder auch Technologien, die Sonderlegierungen für extreme Bedingungen erfordern, wie beispielsweise bei Atomreaktoren oder Turbinen. Einen Überblick über die wichtigsten Energiesektoren und deren Rohstoffbedarf zeigen Talens Peiro et al. (2011) und Zepf et al. (2014). Dabei handelt es sich um:

- Energieerzeugung aus erneuerbare Quellen und aus Kernenergie,
- Stromübertragungsnetze,
- Energiespeichertechniken sowie
- Legierungen und Energieeinsparungstechnologien, die im Folgenden diskutiert werden.

Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen

Regenerative Energieerzeugung erfordert großflächige Produktionsinfrastrukturen, denn Windkraft und Sonneneinstrahlung sind sogenannte „verdünnte Quellen“ mit relativ geringen Energiedichten. Daher sind die Mengen an Beton, Stahl, Kupfer und Aluminium zur Herstellung von Windkraft- und Solaranlagen in der Regel höher als für dieselbe installierte Nennleistung bei der Herstellung von Anlagen

Tabelle 1.1 Eine Auswahl von Metallen, die von der europäischen Industrie genutzt werden, deren Quellen und die Importquote nach Europa sowie die jeweiligen kurz- und langfristigen Versorgungsrisiken. *PGE* Platingruppenelemente, *SEE* Seltenerdelemente, *HREE* Schwere (*heavy*) SEE

Metall	Einsatz	Quelle	Import nach Europa	Kurzfristige Versorgungsrisiken	Langzeitperspektive
Cu	Elektrik, Elektronik, Bau, Transport, Pestizide, Medizin	Viele Quellen rund um die Welt. Polen ist ein mittelstarker Produzent	60 %	Kein kurzfristiger Engpass, doch müssten viele große Lagerstätten in den nächsten zwei Jahrzehnten gefunden werden	Etwa ab dem Jahr 2050 könnte Recycling die Nachfrage nach Primärrohstoffen verringern
Al	Bau, Transport, Stromkabel	Viele Quellen rund um die Welt. Griechenland ist ein kleiner Produzent	80 %	Keine kurzfristigen Risiken; große Vorkommen sind aus vielen Regionen bekannt	Etwa ab dem Jahr 2050 könnte Recycling die Nachfrage nach Primärrohstoffen verringern
Ni	Baustahl, Transport, Batterien	Begrenzte Zahl großer Produzenten in Kanada, Russland, Australien. Einige kleine bis mittel-große Minen in Schweden, Finnland, Spanien	>90 %	Keine kurzfristigen Risiken doch müssen viele große Vorkommen in den nächsten zwei Jahrzehnten gefunden werden	Etwa ab dem Jahr 2050 könnte Recycling die Nachfrage nach Primärrohstoffen verringern
Co	Batterien, Katalysatoren, Superlegierungen, Karbidwerkzeuge	Kongo, Kanada, China	100 %	Als Nebenprodukt in Cu- und Ni-Minen produziert; Hauptlieferant ist der von Krieg erschütterte Kongo	Ein zukünftiger Abbau submariner Ressourcen könnte in einem Überangebot enden
PGE	Katalysatoren, Elektronik, Brennstoffzellen, Schmuck	Drei Hauptproduzenten – Südafrika, Russland und Zimbabwe – sorgen für > 90 % des Weltbedarfs	≈100 %	Soziale Probleme bzw. ein Wechsel der Regierungspolitik in Südafrika oder Exportrestriktionen aus Russland bzw. Zimbabwe würden zu erheblichen Störungen führen	PGEs werden kritische Metalle bleiben mit unsicherer Versorgung für einen Großteil des Jahrhunderts
SEE	Batterien, Elektronik	China produziert derzeit >90 %; geringe Produktion in Australien	100 %	China wird weiterhin die Versorgung dominieren, speziell bei den HREE	Ab dem Jahr 2020 werden viele neue Produzenten in vielen Regionen die Dominanz Chinas verringern
Li	Batterien	Chile, Australien, Argentinien, China	100 %	Die Versorgung aus Chile und Australien deckt den aktuellen Bedarf	Steigende Nachfrage für elektrische und Hybridfahrzeuge sowie Speicherbatterien könnte eine Produktion in Bolivien erforderlich machen

zur Konversion fossiler Brennstoffe (Abb. 1.2; Vidal et al. 2013). Bei Kupfer sind diese Tendenzen weniger eindeutig, wenn man die Werte von ECO-INVENT zugrunde legt (Hertwich et al. 2014). Ein solcher Vergleich zeigt die Schwierigkeiten bei der korrekten Abschätzung von Materialverbrauch für erneuerbare Technologien. Dies ist nicht zuletzt dem Fehlen von validierten und in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlichten Studien geschuldet. Die meisten veröffentlichten Studien beschränken sich auf die Produktionsinfrastruktur von Geräten (Transformatoren, Verbindungen, Gründungen etc.) und konzentrieren sich oft nur

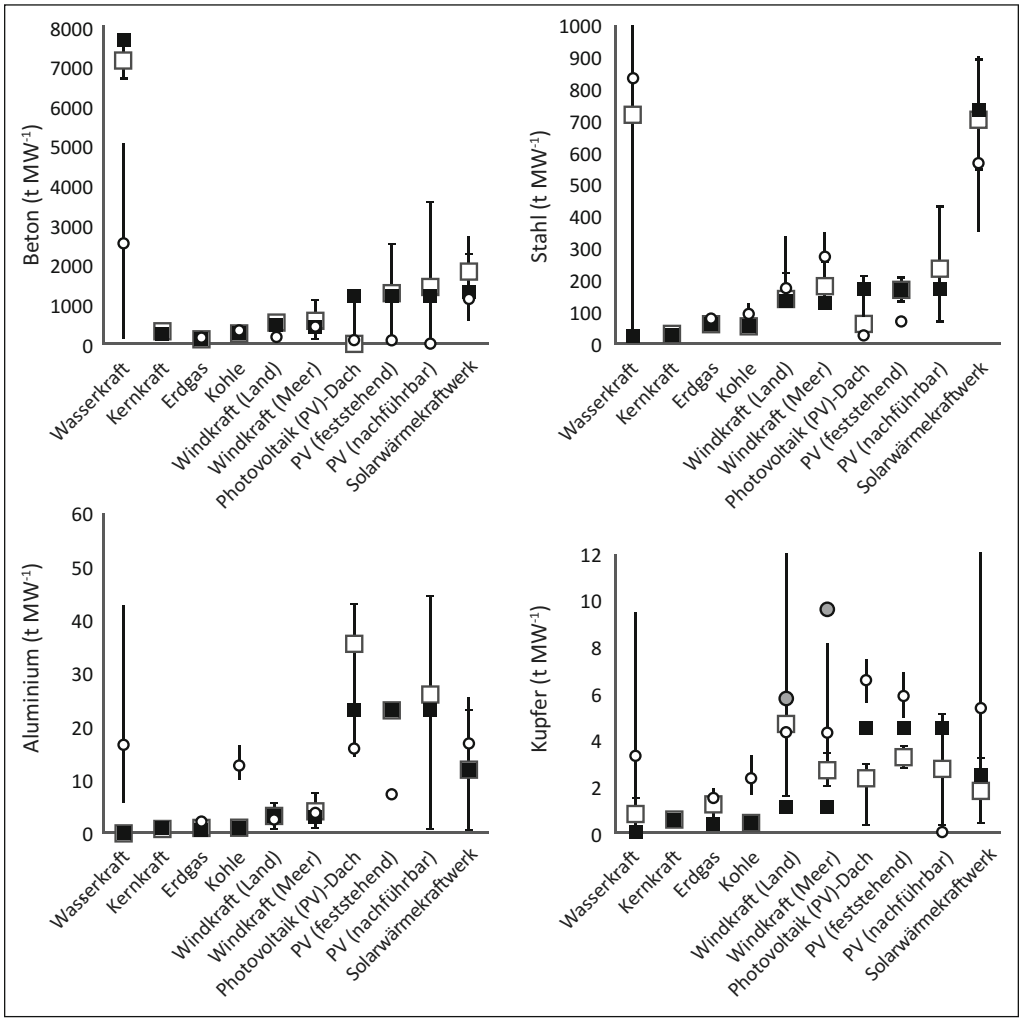


Abb. 1.2 Bedarfsmenge von vier grundlegenden Werkstoffen (Beton, Stahl, Aluminium und Kupfer) zur Herstellung verschiedener Stromerzeugungstechniken. *Vertikale Balken:* Spreizbereiche der zusammengestellten Daten. *Ausgefüllte Quadrate:* Werte von Vidal et al. (2013) ohne Unterscheidung der Photovoltaik-Technologien. *Leere Quadrate:* wie vor, jedoch durch weitere Quellen erweitert und vervollständigt – mit neu berechneten Mittelwerten. *Offene Kreise:* Mittelwerte der Daten aus Hertwich et al. (2014). *Grau hinterlegte Kreise:* Kupfermengen für Windparks, Werte von Falconer (2009)

auf die kritischen Rohstoffe (▶ Kap. 3). Zudem werden für den gleichen Produktionsbereich teilweise unterschiedliche Technologien eingesetzt – was die in Abbildung 1.2 dargestellten großen Spreizbalken erklärt. Diese Varianz ist nicht für die installierte Basis statistisch repräsentativ, sondern für die Variabilität der Ergebnisse zwischen den verschiedenen Studien. Diese stützen sich wiederum auf Daten, die nicht unbedingt repräsentativ für den relativen Anteil der verschiedenen Technologien sind. Bei Vergleichen ist es darüber hinaus wichtig, die schnelle Technologieentwicklung hervorzuheben, die zu stetig neuen Anforderungen führt. Aktuell sind zum Beispiel vier Anlagentypen von Windenergiekonversion in Betrieb, mit einem Bedarf an Kupfermengen zwischen 0,3 und 4 t Kupfer pro MW Leistung:

1. Doppelt gespeiste Asynchronmaschinen (DFAG: *Double-fed asynchronous generator*),
2. Konventionelle Asynchronmaschinen (CAG: *Conventional asynchronous generators*),
3. Konventionelle Synchronmaschinen (CSG: *Conventional synchronous generators*) und
4. Permanentmagnet Synchronmaschinen (PMSG: *Permanent magnet synchronous generators*).

Berücksichtigt man zusätzlich das Kupfer in den Verbindungskabeln zwischen den Offshore-Windkraftanlagen und dem Netz auf dem Festland, dann können die Kupferverbrauchswerte auf bis zu 10 t pro MW Leistung ansteigen (Falconer 2009; ▶ Kap. 10).

Für die Photovoltaik wurden in den letzten Jahren Technologien ohne Fundament und daher mit wenig Beton entwickelt. Doch auch andere Technologien, die auf tragende Infrastrukturen und Verankerung durch Gründung beruhen, sind noch immer weltweit im Einsatz. Technologischer Fortschritt ist bei fossil befeuerten Kraftwerken ebenfalls erheblich. Die Variabilität der eingesetzten Materialmassen ist nicht auf die häufigsten Elemente beschränkt sondern bezieht sich ebenfalls auf die seltenen Elemente (Seltenerdelemente, SEE, in Permanentmagneten der Windkraftanlagen oder Gallium, Indium, Selen in Dünnschicht-Solarzellen-Technologien). Damit erscheinen die von Vidal et al. (2013) und Hertwich et al. (2014) in Abbildung 1.2 zusammengestellten Werte schlüssig.

Ein Vergleich der Materialintensität pro erzeugter Energieeinheit erscheint sinnvoller, weil damit die Produktionsleistung jedes Generators und seiner zeitlichen Verfügbarkeit berücksichtigt wird (Abb. 1.3). Dieser Vergleich zeigt, dass die benötigte Stahlmenge für Onshore-Turbinen zweimal so groß ist wie für Kohlekraftwerke bei gleicher installierter Leistung und 7-mal größer für die gleiche erzeugte Energie (bei einem Wirkungsgrad von 0,22 und einer Lebensdauer von 20 Jahren für die Windkraftanlage und einem Wirkungsgrad von 0,4 und einer Lebensdauer von 30 Jahren für das Kohlekraftwerk) – Hertwich et al. (2014). Bei Sonnenkollektoren kann die Menge an benötigtem Stahl für die gleiche Menge an erzeugter Energie bis zu 50- bis 90-mal größer sein als für Kernenergie (Abb. 1.3).

Allein für die Stromerzeugung aus Wind- und Solarquellen errechnete sich bis zum Jahr

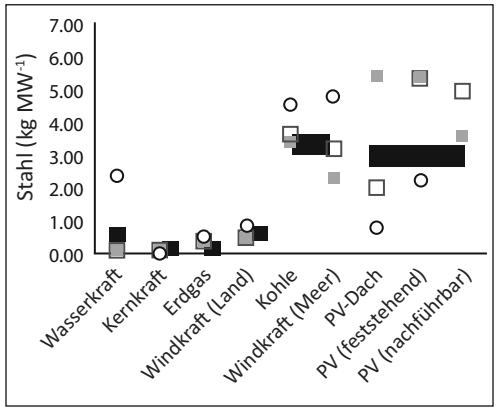


Abb. 1.3 Stahlmenge in Kilogramm (kg) zur Herstellung von 1 MWh Energie; berechnet auf Basis der Daten Stahl pro MwW. Die *schwarzen Rechtecke* entsprechen den Daten von ECO-INVENT ohne Differenzierung zwischen den Photovoltaik- und Offshore-/Onshore-Windkraft-Typen

2050 ein Rohstoffverbrauch (Stahl, Kupfer, Aluminium, Zement, Glas) wie für die Energiewende nach der Internationalen Energieagentur AIE und nach ecofys (WWF) vorgesehen (Deng et al. 2011). Dies entspräche zwei bis acht Jahren der Weltproduktion auf Basis der Mengen im Jahr 2010 (Vidal et al. 2013; Abb. 1.4). Um den Wirkungsgrad der Anlagen zu erhöhen, nutzen die neuesten Technologien seltene Elemente (z. B. Ga, In, Se, Te, Dy, Nd, Pr und Tb). Eine Erhöhung von 10 auf 230 % der globalen Produktion dieser Elemente im Jahr 2010 würde zwischen 2010 und 2030 erforderlich sein, um den Verbrauch allein für Wind- und Solaranlagen zu decken (Örlund 2011; Moss et al. 2013); ihre Verfügbarkeit ist jedoch begrenzt und oft wenig bekannt (▶ Kap. 4).

Energieerzeugung aus Kernernergie

Dieser Energiesektor erfordert große Mengen an Spezialstahl und speziellen Materialien, einschließlich Lithium (Li) und Seltenen Erden (SEE), um die Reaktionen kontrollieren und beschränken zu können, dazu kommen Indium (In) für die Steuerstäbe und je nach Reaktor Zinn (Sn), Zirconium (Zr), Niob (Nb), Eisen (Fe) sowie Nickel-Chrom-Legierungen (Zircaloy, NiCr) für die Brennstoffhülle. Wie bei allen elektrischen Generatoren nutzen die Turbinen der Kernkraftwerke spezielle Stahllegierungen, um einen gleichbleibenden Wirkungsgrad bei hoher Temperatur und hoher Belastung sicherzustellen.

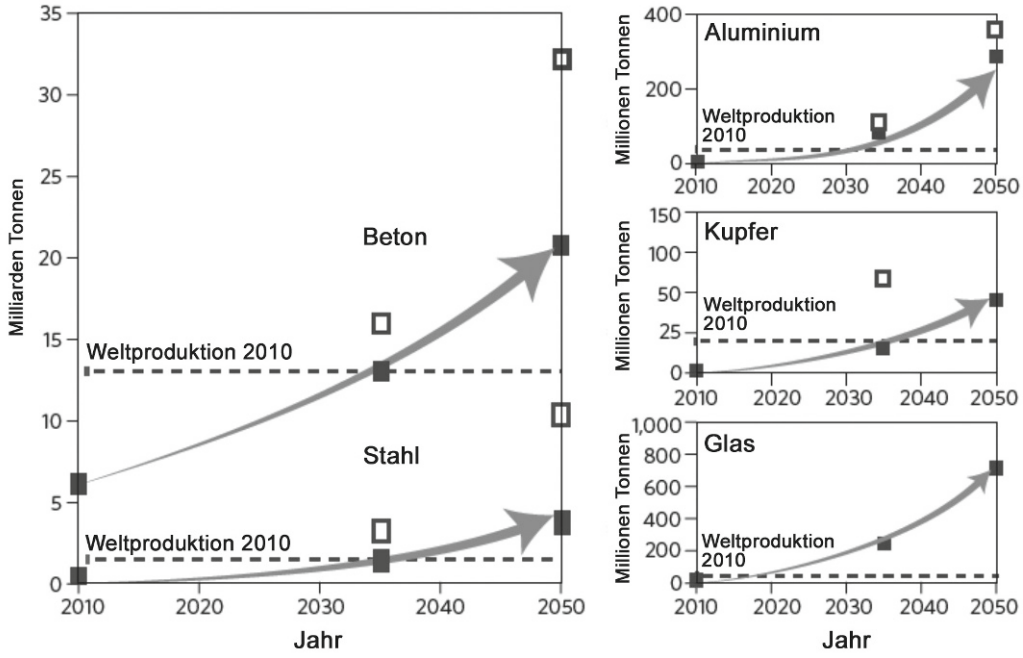


Abb. 1.4 Zunehmender Rohstoffverbrauch weltweit. Der Anteil von Wind- und Solarenergie soll nach Aussage des World Wide Fund for Nature (WWF) bis zum Jahr 2050 auf 25.000 TWh ansteigen. Um diesen Bedarf decken zu können, gilt es, die Weltproduktion an Rohmaterial wie Beton, Stahl, Aluminium, Kupfer und Glas erheblich zu steigern. *Offene und geschlossene Symbole* entsprechen den verschiedenen Volumina von Rohmaterial, die für die verschiedenen Typen von Photovoltaik-Paneelen (PV1 und PV2) benötigt werden (übersetzt nach Vidal et al. 2013).