



Andreas Exner
Martin Held
Klaus Kümmerer *Hrsg.*

Kritische Metalle in der Großen Transformation



Springer Spektrum

Kritische Metalle in der Großen Transformation

Andreas Exner · Martin Held ·
Klaus Kümmerer
Herausgeber

Kritische Metalle in der Großen Transformation

 Springer Spektrum

Andreas Exner
Klagenfurt, Österreich

Klaus Kümmerer
Lüneburg, Deutschland

Martin Held
Tutzing, Deutschland

ISBN 978-3-662-44838-0
DOI 10.1007/978-3-662-44839-7

ISBN 978-3-662-44839-7 (eBook)

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

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
(www.springer.com)

Danksagung

Die Herausgeber danken allen Autorinnen und Autoren sehr herzlich, die mit ihren Beiträgen zum Gelingen des Buchs beigetragen haben. Über die eigentlichen Beiträge hinausgehend gab es einen fruchtbaren inhaltlichen Austausch.

Besonderer Dank gilt dem österreichischen Klima- und Energiefonds (KLIEN), der im Rahmen der Förderung für das Projekt „Feasible Futures“ die den Kap. 5, 11, 12 und 15 zugrundeliegende Forschung ermöglicht hat. Die Ergebnisse sind zugleich insgesamt in die konzeptionelle Gestaltung des Buchs eingeflossen. Namentlich ergeht herzlicher Dank an Martin Bruckner für Rückmeldungen auf eine frühere Fassung von Kap. 15. Andreas Exner dankt in diesem Zusammenhang zudem dem ÖIE Kärnten/Bündnis für Eine Welt. Dem EB&P Umweltbüro GmbH, Klagenfurt, gilt besonderer Dank für den institutionellen Rahmen und die vielfältige Unterstützung.

Sehr herzlich bedanken wir uns bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, der Evangelischen Akademie Tutzing, der Leuphana Universität Lüneburg sowie der Universität Augsburg. Gemeinsam waren sie Veranstalter der Tagung „Grenzenlose Verfügbarkeit strategischer Metalle? Postfossile Perspektiven“, die 2011 in der Evangelischen Akademie Tutzing stattfand. Zusätzlich war die Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie Mitveranstalter der Tagung „Strategische Metalle für die Energiewende. Ressourceneffizienz & Dissipation in postfossiler Perspektive“ (Tutzing 2013). Die Ergebnisse der Tagungen flossen unmittelbar in die konzeptionelle Gestaltung und die inhaltliche Ausprägung des Buchs ein. Wir danken allen Referierenden sowie allen Teilnehmenden für ihre Beiträge. Es handelt sich jedoch um Originalbeiträge, die für dieses Buch geschrieben wurden.

Insbesondere hatten wir mit Dr. Maximilian Hempel, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, und Prof. Dr. Armin Reller, Universität Augsburg, über die Jahre hinweg immer wieder einen sehr fruchtbaren Austausch und kritische Diskussionen im Themenfeld. Nicht zuletzt durch ihre Anregungen und Impulse erhielt das Buch seine nun vorliegende endgültige Fassung. In gleicher Weise gilt dies auch für Jörg Schindler, langjährig Geschäftsführer Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, und für Dr. Hans-Jochen Luhmann, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, mit denen wir jahrelang eng über Fossilierung, Metallisierung und die beginnende Große Transformation von der fossilen Nicht-

nachhaltigkeit hin zu einer postfossilen nachhaltigen Entwicklung zusammengearbeitet haben.

Es ist uns ferner ein Anliegen zu erwähnen, dass für manche der Ideen schon vor vielen Jahren von Dr. Karl Otto Henseling, damals Umweltbundesamt, in langjähriger freundschaftlicher Zusammenarbeit ein Keim gelegt wurde. Dies ist mit vielen guten Erinnerungen verbunden. Leider konnte er den weiteren Fortgang nicht mehr selbst miterleben.

März 2015, Graz, Tutzing, Lüneburg

Andreas Exner
Martin Held
Klaus Kümmerer

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung: Kritische Metalle in der Großen Transformation	1
	Andreas Exner, Martin Held und Klaus Kümmerer	
1.1	Einleitung – Metallisierung schreitet voran	1
1.2	Kritische Metalle – kritisch für wen?	4
1.3	Kritische Metalle und Ressourcengerechtigkeit	6
1.4	Technologisch-ökologische Bausteine einer Ressourcenpolitik, Ressourceneffizienz und Konzentration	7
1.5	Stoffe, Entropie und Dissipation	9
1.6	Große Transformation – Metalle und gesellschaftliches Naturverhältnis .	10
1.7	Stoffliche Voraussetzungen der Energiewende – energetische Voraussetzungen der Stoffwende	12
1.8	Zusammenfassung: Grundmaxime für Metallnutzung	13
	Literatur	15

Teil I Grundlagen und Blickrichtungen

2	Kritikalität und Positionalität: Was ist kritisch für wen – und weshalb? . .	19
	Rainer Walz, Miriam Bodenheimer und Carsten Gandenberger	
2.1	Einführung	19
2.2	Konzeptionelle Grundlagen	20
2.3	Begründungszusammenhänge	21
2.4	Institutionalisierung der Kritikalität in Bewertungsschemata	28
2.5	Schlussfolgerungen	32
	Literatur	35
3	Gutes Leben am Rande eines schwarzen Lochs – Entwicklungsextraktivismus, informeller Kleinbergbau und die solidarische Ökonomie	39
	Elmar Altvater	
3.1	Einleitung	39

3.2	Rohstoffreichtum mit Risiken und Nebenwirkungen	41
3.3	In- und Unwertsetzung	43
3.4	Neoextraktivismus	45
3.5	Informeller Kleinbergbau folgt maschinell ausgebeuteten Minen	47
3.6	Das „gute Leben“ in solidarischer Ökonomie	48
	Literatur	50
4	Konzentration, Funktionalität und Dissipation – Grundkategorien zum Verständnis der Verfügbarkeit metallischer Rohstoffe	53
	Klaus Kümmerer	
4.1	Einführung	53
4.2	Fallbeispiel LED	55
4.3	Seltenheit	57
4.4	Konzentration	62
4.5	Funktion	67
4.6	Dissipation	69
4.7	Dissipativ kluges Stoffstrommanagement – Design für minimale Dissipation	84
	Literatur	85
5	Die geologische Verfügbarkeit von Metallen am Beispiel Kupfer	87
	Werner Zittel	
5.1	Einführung	87
5.2	Reserven und Ressourcen – wie prognostiziert man Knappheiten?	88
5.3	Beispiel Kupferförderung – historischer Längsschnitt	91
5.4	Die künftige Verfügbarkeit von Kupfer	95
5.5	Die Verwendung von Kupfer	100
5.6	Zusammenfassung	103
	Literatur	105
6	Die stofflichen Voraussetzungen der Energiewende in der Großen Transformation	109
	Martin Held und Armin Reller	
6.1	Einleitung	109
6.2	Stoff, Zeit und Energie – zeitökologische Grundlagen	111
6.3	Die fossile Beschleunigung und Steigerung der Stoffmobilisierung	113
6.4	Nichtnachhaltigkeit und Große Transformation	118
6.5	Energiewende und Stoffwende: Zwei Bausteine der Großen Transformation	122
6.6	Stoffliche Voraussetzungen der Energiewende	124
6.7	Von statischer Reichweite zu Funktionen von Metallen und nachhaltiger Nutzung	126

6.8	Nachhaltigkeitsregeln für Metalle	129
6.9	Fazit	133
	Literatur	133

Teil II Metallpolitiken und ihre Auswirkungen

7	Neue Ressourcenpolitik – nachhaltige Geopolitik? Staatliche Initiativen des globalen Nordens zur Sicherung von kritischen Rohstoffen am Beispiel der Seltenen Erden	141
	Lutz Mez und Behrooz Abdolvand	
7.1	Einleitung	141
7.2	Die Rolle von Rohstoffen in der klassischen Geopolitik	143
7.3	Einsatzbereiche für Seltene Erden und strategisch wichtige Metalle	147
7.4	Versorgungslage bei leichten und bei schweren Seltenen Erden	148
7.5	Die EU-Rohstoffinitiative	150
7.6	Die Rohstoffinitiative der USA – <i>Mining the Future</i>	152
7.7	Die japanische Rohstoffinitiative – mit Urban Mining Recycling von Seltenen Erden im großen Stil	154
7.8	Geostrategie vs. nachhaltige Entwicklung	156
	Literatur	158
8	Das UN-Tiefseebergbauregime als Beispiel für Aneignung und Inwertsetzung von <i>Common Heritage of Mankind</i>	161
	Stefan Brocza und Andreas Brocza	
8.1	Einleitung	161
8.2	Gebietshoheit vs. souveränitätsfreier Raum – aktuelle Tendenzen zur „Terranisierung“	162
8.3	Internationales Seerecht – Schaffung eines Tiefseebergbauregimes	163
8.4	Das gemeinsame Erbe der Menschheit	165
8.5	Internationale Meeresbodenbehörde (IMB) und <i>Mining Codes</i>	166
8.6	Beispiele für Lizenzvergaben	168
8.7	Wirtschaftlichkeit des Tiefseebergbaus	172
8.8	Konfliktpotenzial Umweltschutz	173
8.9	Landnahme, Einhegung, Akkumulation durch Enteignung	173
8.10	Schlussbetrachtung	176
	Literatur	177
9	Das Feuer des Drachens – Ressourcenfragen in der „Weltfabrik“	181
	Josef Baum	
9.1	Einführung	181
9.2	Steigende Importpreise, sinkende Exportpreise	182
9.3	Stahlproduktion als atemberaubendes Paradigma	182

9.4	Was folgt nach dem Durchbruch?	183
9.5	China prägt die nichtlineare Entwicklung der Weltstahlproduktion – wer folgt?	184
9.6	Externer Extraktivismus und der Fluch der Emissionen	185
9.7	Chinas heutige Entwicklung als Teil der langen Wellen der Globalgeschichte	186
9.8	Ressourcenoptimierung in der historischen Innenexpansion	187
9.9	Urbanisierung und Motorisierung wie gehabt?	188
9.10	Indikatoren mit chinesischen Charakteristika	189
9.11	Plan B oder C?	191
9.12	China als neue Hegemonialmacht?	192
9.13	Grundsätzlicher sozial-ökologischer Paradigmenwechsel am ehesten in China	193
	Literatur	194
10	Ein Stoff macht Zukunft. Zum sozialen Leben von Lithium am Salar de Uyuni, Bolivien	197
	Katrin Vogel	
10.1	Einleitung	197
10.2	Lithium: Motor für technologischen Wandel	198
10.3	Der Salar de Uyuni und die nationale Lithiumstrategie	199
10.4	Das soziale Leben von Lithium am Salar	202
10.5	Fazit	212
	Literatur	213
Teil III Technologiemetalle, Produkte und Märkte		
11	Bedarf an Metallen für eine globale Energiewende bis 2050 – Diskussion möglicher Versorgungsgrenzen	217
	Ernst Schriefl und Martin Bruckner	
11.1	Einleitung	217
11.2	Die Szenarioannahmen im Detail	218
11.3	Ergebnisse des Szenarios – Entwicklung des Metallbedarfs bis 2050	225
11.4	Diskussion und Vergleich mit anderen Studien	228
11.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	231
	Literatur	232

12	Knappe Metalle, Peak Oil und mögliche wirtschaftliche Folgen – Vergleich zweier ökonomischer Modelle zu möglichen Folgen von Verfügbarkeitsgrenzen bei fossilen Energien und Metallen	235
	Ulrike Lehr, Marc Ingo Wolter, Anett Großmann, Kirsten Wiebe und Peter Fleissner	
12.1	Eine Frage – zwei Modelle	235
12.2	Modellansätze	236
12.3	Ergebnisse: Knappe Metalle, Peak Oil und mögliche wirtschaftliche Folgen	243
12.4	Fazit: Bremsen knappe Metalle die Transformation des Energiesystems?	247
	Literatur	248
13	Recycling von Technologiemetallen – Status, Trends und Perspektiven für globale Partnerschaften	251
	Daniel Bleher und Doris Schüler	
13.1	Einleitung	251
13.2	Aktueller Stand zum globalen Recycling	252
13.3	Umweltauswirkungen durch das Recycling ausgewählter Technologiemetalle	256
13.4	Recycling von Spezialmetallen am Beispiel der Seltenen Erden	260
13.5	Globale Recyclingpartnerschaften	263
13.6	Fazit und Perspektiven	266
	Literatur	266
14	Das „Fairphone“ – ein Impuls in Richtung nachhaltige Elektronik?	269
	Joshena Dießenbacher und Armin Reller	
14.1	Einführung	269
14.2	Dynamiken der Konsumgesellschaft: Das Smartphone und die Popularisierung der Gerätschaften	271
14.3	Hintergründe von Lebensstilen analysieren mit Stoffgeschichten	274
14.4	Metallische Rohstoffe im Smartphone: „Ökologischer Rucksack“ und Dissipationsrisiko	276
14.5	Kongokrieg und Rohstoffhandel	281
14.6	Vom „Bluthandy“ zum „Dodd-Frank Act“ und zu Zertifizierungsinitiativen	282
14.7	Das „Fairphone“: Ziele, Kritikpunkte und Erfolge	286
14.8	Fazit und Ausblick	287
	Literatur	289

Teil IV Grenzen der Verfügbarkeit von Metallen und Verteilung

15	Verkaufte Zukunft? Verfügbarkeitsgrenzen bei Metallen – neue Verteilungsfragen in einer Perspektive globaler Zustimmungsfähigkeit	295
	Andreas Exner, Christian Lauk und Werner Zittel	
15.1	Einleitung	295
15.2	Ungleichverteilung metallischer Rohstoffe am Beispiel Kupfer	297
15.3	Neue Stoffbedarfe und sozial-ökologische Fördergrenzen	300
15.4	Regulierungserfordernisse in einer Perspektive der Rohstoffgleichheit bei Metallen	301
15.5	Ansätze zu Politiken der Rohstoffgleichheit bei Metallen	306
15.6	Fazit	312
	Literatur	313
16	Die energetischen Voraussetzungen der Stoffwende und das Konzept des EROEI	317
	Jörg Schindler	
16.1	Einleitung	317
16.2	EROEI – das Konzept	318
16.3	EROEI bei der Energiebereitstellung	322
16.4	Folgerungen aus der EROEI-Betrachtung	329
16.5	Schlussfolgerungen für die Große Transformation	332
	Literatur	333
	Sachverzeichnis	335

Mitarbeiterverzeichnis

Behrooz Abdolvand geb. 1956, Dr. rer. pol.; Freie Universität Berlin, Berlin Centre for Caspian Region Studies Berlin und Associate Fellow des Robert Bosch-Zentrums für Mitteleuropa, Osteuropa und Zentralasien (DGAP). *Arbeitsschwerpunkte:* Energiepolitik, Sicherheitspolitik der Länder des Greater Middle East

Elmar Altvater geb. 1938, Prof. Dr. oec. publ., i.R.; Freie Universität Berlin, Otto-Suhr-Institut für Politikwissenschaft und Fellow am Institute for International Political Economy der Hochschule für Wirtschaft und Recht, Berlin.
Arbeitsschwerpunkte: Internationale politische Ökonomie, ökologische Weltsystemforschung, europäische Integration

Josef Baum geb. 1953, Dr. rer. soc. oec., Dr. rer. nat.; Universität Wien, Forschungs- und Lehrtätigkeit am Institut für Ostasienwissenschaften und am Institut für Geographie.
Arbeitsschwerpunkte: Industrie-, Regional- und Ökologische Ökonomie, China

Daniel Bleher geb. 1978, Dipl.-Geogr.; Öko-Institut, Darmstadt, Wissenschaftlicher Mitarbeiter. *Arbeitsschwerpunkte:* Ressourcen, Stoffstromanalysen, Flächenmanagement, Sport & Umwelt

Miriam Bodenheimer geb. 1986, M.A. in International Development; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, Wissenschaftliche Mitarbeiterin. *Arbeitsschwerpunkte:* Soziale Nachhaltigkeit, Rohstoffpolitik, globale Wertschöpfungsketten

Andreas Brocza geb. 1975, Mag. phil.; Universität Wien, Dissertant am Institut für Politikwissenschaft. *Arbeitsschwerpunkte:* Prozesse regionaler Integration sowie subsaharisches Afrika

Stefan Brocza geb. 1967, Mag. Dr. phil., M.B.L.-HSG; Fachbereich Geographie und Geologie, Abteilung Sozial- und Wirtschaftsgeographie, Universität Salzburg.
Arbeitsschwerpunkte: Recht und Politik der EU und internationaler Organisationen, Außenwirtschaftsbeziehungen sowie Außendimension interner Sicherheit

Martin Bruckner geb. 1981, Mag. rer. soc. oec.; Wirtschaftsuniversität Wien, Institute for Ecological Economics. *Arbeitsschwerpunkte:* Input-Output-Analyse, Umwelt-Footprinting, Materialflussanalyse

Joshena Dießenbacher geb. 1981, M.A. Soz. Wiss.; Universität Augsburg, Wissenschaftszentrum Umwelt. *Arbeitsschwerpunkte:* Stoffgeschichten, Ressourcen- und Lebensstilforschung

Andreas Exner geb. 1973, Mag. rer. nat.; Universität Wien, Dissertant am Institut für Politikwissenschaft. *Arbeitsschwerpunkte:* Landnutzung, Solidarische Ökonomie, Degrowth

Peter Fleissner geb. 1944, Dr. techn., Dipl.-Ing.; wissenschaftlicher Konsulent in Wien; ehem. TU Wien, Univ.Prof. für Sozialkybernetik sowie Abteilungsleiter für Ökonomie am IHS Wien, am IPTS der Europäischen Kommission in Sevilla und am EUMC des Europäischen Parlaments in Wien. *Arbeitsschwerpunkte:* Politische Ökonomie, Sozialkybernetik, Simulationsmodelle

Carsten Gandenberger geb. 1975, Dr. rer. pol.; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe. *Arbeitsschwerpunkte:* Ressourceneffizienz, nachhaltige Unternehmensstrategien und Geschäftsmodelle, Technologietransfer umweltfreundlicher und ressourceneffizienter Technologien

Anett Großmann geb. 1979, Dipl.-Volksw.; Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung, GWS, Osnabrück, Mitarbeiterin im Bereich Klima und Energie. *Arbeitsschwerpunkte:* Makroökonomischer Modellbau, nationale und internationale Klima- und Energiepolitik

Martin Held geb. 1950, Dr. rer. pol., Dipl.-Ök.; Evangelische Akademie Tutzing, Studienleiter Wirtschaft und nachhaltige Entwicklung. *Arbeitsschwerpunkte:* Institutionenökonomik, Ökologie der Zeit, Nichtnachhaltigkeit, Große Transformation

Klaus Kümmerer geb. 1959, Dr. rer. nat., Dipl.-Chem.; Leuphana Universität Lüneburg, Direktor Institut für Nachhaltige Chemie und Umweltchemie, Professur für Nachhaltige Chemie und Stoffliche Ressourcen. *Arbeitsschwerpunkte:* Benign-by-design, Schadstoffe in der Umwelt, Chemie und Nachhaltigkeit, Ökologie der Zeit

Christian Lauk geb. 1976, Dr. phil. in Sozialer Ökologie, Mag. in Biologie; Universität Klagenfurt, Wissenschaftler und Lektor am Institut für Soziale Ökologie, Wien. *Arbeitsschwerpunkte:* Landnutzung, sozialer Metabolismus, gesellschaftliche Materialbestände

Ulrike Lehr geb. 1961, Dr. oec., Dipl.-Phys.; Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung, GWS, Osnabrück, Co-Bereichsleitung Klima und Energie. *Arbeitsschwerpunkte:* Makroökonomischer Modellbau, nationale und internationale Klima- und Energiepolitik

Lutz Mez geb. 1944, Priv.-Doz., Dr. rer. pol., Dipl.-Pol.; Freie Universität Berlin, Koordinator des Berlin Centre for Caspian Region Studies. *Arbeitsschwerpunkte:* Klima-, Umwelt- und Energiepolitik im internationalen Vergleich

Armin Reller geb. 1952, Dr. rer. nat.; Universität Augsburg, Lehrstuhl Ressourcenstrategie und Fraunhofer-Projektgruppe Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie, Alzenau, Leiter Geschäftsbereich Ressourcenstrategien. *Arbeitsschwerpunkte:* Chemie der Materialien, Stoffgeschichten, Ressourcenstrategie

Jörg Schindler geb. 1943, Dipl.-Kfm.; ehem. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Geschäftsführer und ASPO Deutschland, Vorstandsmitglied. *Arbeitsschwerpunkte:* Peak Oil, postfossile Mobilität, Große Transformation

Ernst Schrieffl geb. 1969, Dr. techn., DI; energieautark consulting gmbh, Wien. *Arbeitsschwerpunkte:* Informationsaufbereitung für die Bereiche Energieeffizienz in Gebäuden und Nutzung erneuerbarer Energieträger, strategische Energieforschung

Doris Schüler geb. 1966, Dr.-Ing.; Öko-Institut, Darmstadt, Stellv. Leitung des Bereichs Infrastruktur & Unternehmen. *Arbeitsschwerpunkte:* Ressourcen, Recycling, Stoffstromanalysen

Katrin Vogel geb. 1976, Dr. phil., Ethnologin; Universität Augsburg, Wissenschaftszentrum Augsburg. *Arbeitsschwerpunkte:* Mensch-Umwelt-Beziehungen, Klimawandel, Stoffgeschichten

Rainer Walz geb. 1960, Prof. Dr. rer. pol.; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, Leiter Kompetenzzentrum für Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme. *Arbeitsschwerpunkte:* Nachhaltigkeit und Innovation, Umwelt- und Ressourcenpolitik, Wechselwirkungen zwischen wirtschaftlicher Entwicklung, Globalisierung und Umweltschutz

Kirsten Wiebe geb. 1982, Dr.; Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung, GWS, Mitarbeiterin im Bereich Klima und Energie, Osnabrück. *Arbeitsschwerpunkte:* Makroökonomischer Modellbau, nationale und internationale Klima- und Energiepolitik

Marc Ingo Wolter geb. 1969, Dr. rer. pol.; Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung, GWS Osnabrück, Bereichsleitung Wirtschaft und Soziales. *Arbeitsschwerpunkte:* Makroökonomischer Modellbau, Konjunkturanalysen, Arbeitsmarkt

Werner Zittel geb. 1955, Dr. rer. nat.; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, Ottobrunn. *Arbeitsschwerpunkte:* Verfügbarkeitsanalysen von Energieträgern und metallischen Rohstoffen, Energieszenarien, kommunale Energiekonzepte und Analysen und energiewirtschaftliche Querschnittsthemen

Andreas Exner, Martin Held und Klaus Kümmerer

1.1 Einleitung – Metallisierung schreitet voran

Manganknollen, Kobaltkrusten, Sulfiderze – was in den dunklen Tiefen der Meeresböden verborgen ist, dringt im wahren Wortsinn in den vergangenen Jahren zunehmend an die Oberfläche (World Ocean Review 2014).¹ Was steckt dahinter?

Eine Deutung ist naheliegend: Es ist ein Zeichen für den technischen Fortschritt, dass die Menschheit in zuvor unzugängliche Erdgegenden vordringt und dies öffentliches Interesse weckt. Hoffnungen auf neue reichliche Rohstoffvorkommen knüpfen sich daran, deren Nutzung mit entsprechendem Investment zur wirtschaftlichen Prosperität und zur Zukunftssicherung beitragen kann. Das ist nicht einfach weit hergeholt, das sind nicht in fernen Ozeanen auf dem Meeresgrund liegende Zukunftsphantasien. Vielmehr wurde bspw. bereits im Jahr 2006 von der zuständigen Internationalen Meeresbodenbehörde Deutschland ein Claim im Pazifik als Lizenzgebiet mit einer Fläche knapp so groß wie Ös-

¹ Viele der in unserem einleitenden Kapitel behandelten Themen und Aspekte werden in den folgenden Kapiteln des Buchs intensiv bearbeitet. Der Tiefseebergbau steht bspw. im Fokus von Kap. 8 und wird zudem in Kap. 4 diskutiert. Wir geben jedoch nur einige weiterführende Literatur an, ohne jeweils die Buchkapitel zuzuordnen.

A. Exner (✉)
eb&p Umweltbüro GmbH
Klagenfurt, Österreich
email: andreas.exner@aon.at

M. Held
Evangelische Akademie Tutzing
Tutzing, Deutschland
email: transformations-held@gmx.de

K. Kümmerer
Faculty for Sustainability, Leuphana University Lüneburg
Lüneburg, Deutschland

terreich zugesprochen (Wiedicke et al. 2012). Wer frühzeitig in der Technologieentwicklung dabei ist, kann sich Vorteile im Wettbewerb um Rohstoffe verschaffen (BDI 2014).

Es gibt aber auch eine andere, ebenfalls naheliegende Deutung: Die Technologien für einen Bergbau in Meeresböden abgelegener Regionen der Erde und in großen Tiefen mit hohem Druck, Dunkelheit und korrosionsförderndem Salzgehalt sind erst noch zu entwickeln. Wenn derart unzugängliche, mit hohen Risiken, großem ökologischen Gefährdungspotenzial und ökonomischen Unsicherheiten verbundene Erzlagerstätten heute als Hoffnungsträger gehandelt werden, ist dies ein erstes Anzeichen dafür, dass die konventionellen Lagerstätten an Land (*onshore*) an Grenzen stoßen. Zwar gibt es derzeit keine akute Mangelsituation an bestimmten Metallen. Aber eine ganze Reihe von Technologiemetallen könnte bei der derzeitigen Dynamik der Nachfrage und nachfrage-treibenden Faktoren in absehbarer Zeit knapp und damit die Verfügbarkeit kritisch werden. Der Vergleich mit dem Abbau unkonventioneller Teersande in Alberta und der Förderung von *light tight oil* in den USA legt dies nahe. Unkonventionelles Erdöl kam ebenfalls erst ins Spiel, als sich der Peak der Förderung der vergleichsweise günstig förderbaren konventionellen Ölquellen abzeichnete.

Tatsächlich ist die Entwicklung bei einer ganzen Reihe von Metallen dadurch gekennzeichnet, dass in der Primärproduktion die Konzentration der Erze in den Minen in vergleichsweise kurzer Zeit signifikant zurückgegangen ist. Dies ist keineswegs zufällig. Vielmehr werden verständlicherweise die „süßesten Früchte und die am niedrigsten hängenden Früchte“ zuerst gepflückt: Die Lagerstätten mit höherem Erzgehalt und vergleichsweise leichter Zugänglichkeit wurden immer schon und werden immer noch zuerst erschlossen und abgebaut.

Mögen die Deutungen der Entwicklung im Bergbau unterschiedlich sein. Konsens besteht jedoch darin, dass mit der anhaltenden Digitalisierung, der nachholenden Modernisierung in Staaten wie China und der beginnenden Energiewende *Metalle eine zunehmend wichtigere Rolle spielen*.

Unmittelbaren Anstoß für eine Renaissance der Ressourcenpolitik gab etwa um das Jahr 2010 die nahezu monopolartige Stellung Chinas bei den Seltenerdmetallen (s. beispielhaft zur neuen deutschen Ressourcenpolitik: Kaiser 2014). Seither gewann die Frage der Kritikalität von Metallen rasch an Bedeutung. Das Erscheinen des Handbuchs *Critical Metals Handbook* (Gunn 2014) ist dafür ein Indikator (vgl. auch SATW 2010; EU Com 2010; Zepf et al. 2014).

Die Kriterien für Kritikalität, Festlegung der Zeitskalen und Systemgrenzen variieren ebenso wie die Metalle, die als kritisch eingestuft werden. Metalle aus der Gruppe der Seltenerdmetalle und Metalle aus der Platingruppe werden vielfach gemäß sehr verschiedener Kriterien als kritisch eingestuft.

Ordnet man die Entwicklung in einer längeren Perspektive ein (s. Bardi 2013; Zittel und Exner 2011; s. verschiedene Beiträge in der fünfbändigen *Propyläen Technik Geschichte*, König 1997), dann kann man festhalten: In der industriellen Revolution vervielfachten sich fossil getrieben die Mengen von Eisen und Stahl. Durch die Elektrifizierung gewann Kupfer, das erste menscheitsgeschichtlich relevante Nutzmittel, nochmals erheblich an

Bedeutung. Es wurde sowohl hinsichtlich der Art als auch der Menge mehr Metall als je zuvor eingesetzt. Einen weiteren richtiggehenden Schub bekam die Entwicklung dann nochmals ab etwa 1980. Immer mehr Metalle und Halbmetalle (sowie auch andere Elemente) wurden in einer breiten Palette von Anwendungen funktionalisiert. Dies führte in wenigen Jahrzehnten dazu, dass inzwischen nahezu alle stabilen Elemente des Periodensystems mit ihren spezifischen Potenzialen genutzt werden.

Durch die Digitalisierung, Miniaturisierung und Vernetzung wird die Bedeutungszunahme von Metallen in den 2010er-Jahren mit ungeheurer Dynamik noch weiter vorangetrieben: Sensoren, digitale Geräte bis hin zum Internet der Dinge, Wearables, Vernetzung von Konsumgütern aller Art wie zunehmende Vernetzung in den Wertschöpfungsketten und in der Produktion (derzeit unter dem Stichwort „Industrie 4.0“ gängig) sorgen für zunehmende Nachfrage nach Metallen des gesamten Periodensystems. Dies wird noch unterstützt durch die Energiewende und dem dadurch ausgelösten Bedarf an Metallen.

Unser Buch ist auf diese *Metallisierung* fokussiert, die noch immer wachsende Bedeutung von Metallen. Zugleich wird in verschiedenen Kapiteln die Behandlung kritischer Metalle in den übergeordneten Zusammenhang der Frage nach der generellen Verfügbarkeit von mineralischen Rohstoffen und stofflichen Ressourcen eingeordnet. Es geht einerseits um die quantitative Verfügbarkeit der Metalle. Es geht andererseits ebenso um die Nutzung aller im Periodensystem vorhandenen Metalle und ihrer Qualitäten. Unterschiedliche Arten von Metallen werden angesprochen: Basismetalle, vielfach auch Industriemetalle genannt (Eisen, Kupfer, Aluminium, Nickel etc.), Edelmetalle (Gold, Silber, Platin, Palladium), Technologiemetalle, vielfach auch strategische Metalle bzw. Gewürzmetalle genannt (insbes. Seltenerdmetalle). Zum Teil überlappen sich die Gruppen, da sie häufig nicht eindeutig definiert sind und die Zugehörigkeit zur einen oder anderen Gruppe einem zeitlichen Wandel unterliegt.

Entsprechend diesen Entwicklungen werden im Buch umfassend Kriterien der Kritikalität behandelt, Ressourceneffizienz und Recycling, Konzentration und Dissipation, Modellierungen, spezifische Anwendungsbereiche und ausgewählte Beispiele. In den Beiträgen wird eine große Bandbreite von Aspekten behandelt: chemische, geologische, technische, ökonomische, politische und rechtliche Fragen hinsichtlich kritischer Metalle bis hin zu damit verbundenen normativen Fragen.

Zielsetzung des Buchs ist es, die Kritikalität von Metallen in ihrer ganzen Bandbreite zu behandeln. Deshalb wird die Frage nach der Kritikalität von Metallen umfassend gestellt: Kritisch für wen? (s. Abschn. 1.2). Wenn man Kritikalität entsprechend umfassend versteht, wird die Frage nach der Ressourcengerechtigkeit aufgeworfen (s. Abschn. 1.3). Ressourceneffizienz wird in den Kontext der abnehmenden Konzentration von Erzen bei der Primärproduktion gestellt (s. Abschn. 1.4). Die essenzielle Bedeutung der Dynamik der weiter zunehmenden Dissipation von Metallen für den Umgang mit Metallen wird dargelegt (s. Abschn. 1.5). Kritische Metalle werden in die Große Transformation eingeordnet (s. Abschn. 1.6). Die stofflichen Voraussetzungen der Energiewende werden ebenso behandelt wie die energetischen Voraussetzungen der Stoffwende (s. Abschn. 1.7). Daraus

wird zusammenfassend eine Grundmaxime abgeleitet, die Orientierung für die Nutzung von Metallen geben kann (s. Abschn. 1.8).

1.2 Kritische Metalle – kritisch für wen?

Angesichts der herausragenden Bedeutung der Metalle ist es positiv zu werten, dass die Frage ihrer Kritikalität in den letzten Jahren zunehmend Beachtung findet. Der unmittelbare Auslöser dafür war eine spezifische Konstellation: Aus Wettbewerbsgründen, u. a. wegen höherer Anforderungen im Umweltschutz, war im Laufe der 1990er- und beginnenden 2000er-Jahre die Gewinnung von Seltenerdmetallen in vielen (westlichen) Ländern zurückgegangen. Zunehmend kam China in die Position eines Oligopolisten und etwa um 2010 in die Position eines Nahezumonopolisten als Anbieter von Seltenerdmetallen. Mit Kontingentierungen nutzte China die Situation, um die Preise nach oben zu treiben.

Es entbehrt nicht der Ironie, dass Chinas Regierung dies u. a. mit ökologischen Argumenten begründete. Tatsächlich war es zuvor für Industriestaaten vorteilhaft erschienen, den stark umweltbelastenden Bergbau in andere Staaten zu verlagern, um Kosten für die Einhaltung von ökologischen Kriterien einzusparen. Die rasch voranschreitende Digitalisierung sorgte für zusätzliche Nachfrage. Diese steigt auch nach der global wirkenden Finanz- und Wirtschaftskrise an. Zugleich wurde zunehmend bewusst, dass die Energiewende ebenfalls als ein Treiber für die steigende Nachfrage nach Seltenerdmetallen und anderen Metallen anzusehen ist. Das prototypische Beispiel ist Neodym zur Steigerung der Energieausbeute in Windkraftanlagen. Zwischenzeitlich haben andere Länder als China wieder in die Förderung investiert, was nicht zuletzt aufgrund der stark gestiegenen Preise wieder lohnenswert erscheint. Als eine Reaktion darauf hat China die Exportmengen erhöht und die Preise sind wieder gefallen (Stand April 2015).

Am Beginn der breitenwirksamen Debatte stand bei den Kriterien für Kritikalität die Frage der Versorgungssicherheit von Metallen für die heimische Industrie im Vordergrund. Dementsprechend wurde und wird z. T. auch von *strategischen Metallen* gesprochen, um Fragen der Wettbewerbsfähigkeit zu betonen. Geopolitische Faktoren der Zugänglichkeit zur Primärproduktion sind in dieser Sicht deshalb von besonderer Bedeutung. Dementsprechend wurden die Systemgrenzen bei Analysen für die Europäische Union Anfang der 2010er-Jahre gezogen: Als Bezugsrahmen diente zunächst ein Zeithorizont von 10 Jahren (EU Com 2010, S. 23) bezogen auf die Versorgungssicherheit für die Industrie der EU-Mitgliedsstaaten. In späteren Studien wurde 2030 als Zieljahr gewählt (Moss et al. 2013). Derartige Studien schärften den Blick für die Thematik und identifizierten bspw. Metalle wie Tellur, Indium, Gallium, Neodym sowie Dysprosium bezogen auf eine unterstellte Nachfragedynamik zu Energietechnologien als kritisch (Moss et al. 2013).

In den verschiedenen Studien und Übersichten zu kritischen Metallen werden bei allen Unterschieden typischerweise Seltenerdmetalle, Metalle der Platingruppe ebenso wie etwa Indium und Lithium hinsichtlich ihrer Kritikalität analysiert. Neben einer geologischen Analyse werden Annahmen zur Entwicklung der Nachfrage und zur Entwicklung

des Angebots behandelt (vgl. Gunn 2014). In manchen Übersichten zu möglicherweise kritischen Metallen finden sich noch weitere Metalle wie bspw. Kupfer (Zepf et al. 2014).

Diese Phase war der Einstieg in die neue Ressourcendebatte um kritische Metalle. Schnell wurde jedoch offenkundig, dass weitergehende Kriterien für Kritikalität zu diskutieren sind (neben Gunn 2014 etwa Reller 2013). Zugrunde liegt die Frage: Kritisch für wen?

Erweitert man den Rahmen der einbezogenen Akteure, dann kommen bspw. Akteure in den Ländern des Südens in den Blick, in denen der Bergbau eine besonders wichtige wirtschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung hat. Insbesondere in Ländern Südamerikas ist die Frage des (Neo-)Extraktivismus grundlegend, bei der die Funktion des Bergbaus für das Entwicklungsmodell dieser Länder und die Ausgestaltung des Bergbaus sowie nachfolgender Verarbeitungsstufen im Fokus ist (Oekom 2013; Zilla 2015). Damit verbunden werden aus Lateinamerika kommend Fragen des guten Lebens (*buen vivir*) diskutiert, deren Art von Antworten Rückwirkungen auf den Umgang mit den mineralischen Ressourcen hat (Burchardt et al. 2013).

Ebenso ergibt sich eine Erweiterung der Kritikalität, wenn ökologische Kriterien mit einbezogen bzw. stärker gewichtet werden. Das ergibt sich schon alleine daraus, dass Metalle in der Erdkruste typischerweise ganz überwiegend inert sind. Sie können jedoch toxisch sein, wenn sie in höheren Konzentrationen bioverfügbar vorliegen (z. B. Kupfer und Zink). In Spuren sind einige Metalle dagegen in der Biosphäre essenziell (Reller 2013, S. 213). Durch den Bergbau werden sie in *großem Maßstab* mobilisiert und damit in großen Mengen in Ökosysteme eingetragen, die dafür nicht evolviert sind. Wenn bspw. für einen potenziellen zukünftigen Abbau von Metallen am Meeresboden ökologische Kriterien von Anfang an beachtet und durchgesetzt werden, verändert dies völlig die Situation gegenüber dem derzeit gehandelten Potenzial unkonventioneller Metallressourcen.

Es gibt daneben weitere ökologische Faktoren, die die Verfügbarkeit von Metallen begrenzen können. Beispielsweise kann Wasser beim Bergbau in Trockengebieten zum limitierenden Faktor werden. Ein weiteres Beispiel sind die ökologischen Langzeitfolgen des Bergbaus, so etwa das *acid mine drainage*, das jahrhundertelange Spätschäden verursacht.

Kurz gefasst: Je nachdem, welche Kriterien einbezogen und wie diese gewichtet werden, können sich völlig unterschiedliche Ergebnisse für die Kritikalität von Metallen ergeben. Dies gilt insbesondere dann, wenn entsprechend dem normativen Konzept einer nachhaltigen Entwicklung die Zeitskalen nicht auf Zeiträume von 15 bis 20 Jahren begrenzt werden, sondern die Kriterien so gefasst werden, dass die Nutzung von Metallen *dauerhaft* möglich ist. Damit ergeben sich nochmals grundlegend erweiterte Maßstäbe hinsichtlich der Kritikalität von Metallen.

Dies hat Konsequenzen für die anstehende Große Transformation von der fossilen Nichtnachhaltigkeit hin zu einer postfossilen, gerechten nachhaltigen Entwicklung. Dann gelten andere Grundregeln für den Umgang mit Metallen. Viele Metalle, deren Versorgungssicherheit in einem Kritikalitätskonzept mit engen Raum-Zeit-Skalen als nichtkritisch bewertet wird, sind dann bereits *ab heute* anders einzuordnen. Die Art ihrer Nutzung

ist kategorial anders zu organisieren und die institutionellen Arrangements sind entsprechend weiterzuentwickeln (Held 2016).

1.3 Kritische Metalle und Ressourcengerechtigkeit

Kritisch für wen? Wenn man diese so einfach klingende Frage in ihrer ganzen Tragweite auslotet, kommt die Verteilungsfrage und damit die Ressourcengerechtigkeit bzw. -gleichheit in den Blick.

In den vorliegenden Studien zur Kritikalität von Metallen wird, wie allgemein üblich, von den gegebenen Verteilungsstrukturen ausgegangen (bei gegebener Kaufkraft) und mit Annahmen zu Wachstumsraten etc. eine Entwicklung der Nachfrage nach Metallen modelliert. Dann wird abgeschätzt, ob diese Nachfrage für die vorgegebenen Raum-Zeit-Skalen durch ein entsprechendes Angebot gedeckt werden kann (Primärproduktion Bergbau, Annahmen zur Steigerung von Ressourceneffizienz, Entwicklung von Recyclingraten und Substitution etc.).

Lassen wir einmal die Entwicklung der relativen Preise als bestimmendes Moment des Ausgleichs von Angebot und Nachfrage beiseite und konzentrieren uns auf einen anderen Aspekt: die Verfügbarkeit von Metallen für alle heute lebenden Menschen und alle Menschen in den kommenden Generationen. Dann stellt sich die Frage der Verteilungsgerechtigkeit. Im Rahmen der Klimapolitik wird als Maßstab für Klimagerechtigkeit z. B. ein einheitlicher Ausstoß von CO₂ pro Kopf verwendet. Analog kann man als Indikator für Ressourcengerechtigkeit ebenfalls eine verfügbare Menge eines bestimmten Metalls pro Kopf einführen, sagen wir Kupfer, oder einer Gruppe von Metallen, etwa Seltenerdmetalle oder Metalle der Platingruppe. Damit ergibt sich eine gegenüber der bisher gängigen Perspektive, die weithin als Commonsense, also als selbstevident, gilt, veränderte Situation: Dann nutzen wir in Ländern wie etwa Deutschland und USA bereits heute pro Kopf mehr Kupfer, als pro Kopf weltweit nach heutigem Kenntnisstand als verfügbar anzunehmen ist (Exner et al. 2014).

Für Projektionen einer Welt ausschließlich mit Elektroautos, Energiewende mit 100 % erneuerbaren Energien im Bereich der Elektrizität etc. hat diese Perspektive offenkundig direkte Auswirkungen. Mit dem beispielhaft eingeführten normativen Maßstab der Ressourcengerechtigkeit bzw. -gleichheit als verfügbare Menge Metall pro Kopf sind, um im Beispiel zu bleiben, etwa die unterstellten Mengen an Kupfer in Industriestaaten nicht verfügbar. Selbst die Bestände an Kupfer, die derzeit in Gebrauch sind, sind möglicherweise schon zu hoch.

Bisher wurde ein vereinfachter Indikator hinsichtlich Menge verfügbaren Metalls pro Kopf als Beispiel eingeführt. Bei einer längerfristigen Perspektive ist bspw. auch die Frage „ökologischer Schulden“ und die Frage der Verteilung von ökologischen und gesundheitlichen Schäden durch Bergbau, Verarbeitung und Recycling einzubeziehen. Weiterführend wäre zudem auch die Frage der Ressourcengerechtigkeit innerhalb der jeweiligen Staaten zu diskutieren.

Auf internationaler Ebene ist zudem zu bedenken, dass bspw. bei maßgeblichen sozialen Bewegungen in Lateinamerika das Denken in der Kategorie „Ressource“ kritisch betrachtet wird. Damit wird eine bestimmte Perspektive eines problematischen Zugriffs auf die Natur verbunden. Natur wird so betrachtet, als setze sie sich aus isolierbaren und rein instrumentell genutzten Einzelbestandteilen zusammen. Der spezifische gesellschaftliche Prozess der sozialen Konstruktion von Natur als Agglomeration von Ressourcen wird dabei unsichtbar gemacht. In dieser Perspektive wird deshalb dieser Konstruktionsprozess als Teil des problematischen Naturverhältnisses der Moderne hinterfragt. Manche soziale Bewegungen und Akteure lehnen es daher ab, sich auf den Ressourcendiskurs insgesamt positiv zu beziehen. In einer umfassenden Betrachtung von Kritikalität ist diese weitergehende Kritik mit in den Blick zu nehmen.

Der Abbau von Erzen führt in verschiedenen Teilen der Erde zu vermehrten Konfrontationen mit indigenen Bevölkerungen (Özkaynak et al. 2015), die eine solche grundlegend kritische Perspektive stark machen. Hier führt die räumliche Expansion des Bergbaus also auch zu einer normativen Zuspitzung von Fragen politischer Legitimität extraktiver Aktivitäten, nicht nur aus ökologischen, sondern ebenso aus sozialen, rechtlichen und ethischen Gründen.

1.4 Technologisch-ökologische Bausteine einer Ressourcenpolitik, Ressourceneffizienz und Konzentration

Die Ressourcenpolitik zu Metallen hat seit einigen Jahren deutlich an Stellenwert gewonnen. Ein *erster Baustein* ist die Rohstoffsicherung aus der Primärproduktion: Damit sind insbesondere geostrategische Überlegungen bezüglich der Versorgungssicherheit angesprochen. Bekanntestes Beispiel ist die fast monopolartige Stellung, die China für einige Jahre um etwa 2010 im Bereich der Seltenerdmetalle hatte. Als Folge wurde z. B. in den USA die Mountain Pass Mine wieder in Betrieb genommen. Auch andere Bergbauprojekte sollen reaktiviert werden. Die Strategie einer Angebotsdiversifizierung ist für diesen Baustein der Ressourcenpolitik evident. Die Umsetzung ist dagegen alles andere als trivial: Hohe Volatilität der relativen Preise und damit hohe Unsicherheit in den Investitionskalkülen beeinflussen das Geschehen und führen auch aufgrund der involvierten Zeitskalen, z. B. bis zur tatsächlichen (Wieder-)Inbetriebnahme einer Mine, zu enormen Unsicherheiten.

Ein *zweiter Baustein* ist technologischer Fortschritt bei den Fördertechniken: Dieser umfasst die Effizienz der Fördertechniken und die Weiterentwicklung von Technologien, die einen Abbau von zuvor nicht zugänglichen bzw. nur zu hohen Kosten zugänglichen Lagerstätten ermöglichen. Ebenso sind technologische Verbesserungen zu nennen, die die Förderung von Erzen, die zuvor im Abraum landeten, zu wettbewerbsfähigen Preisen ermöglichen. Dies gilt insbesondere bei vergesellschafteten Metallen.

Die Erhöhung der Ressourceneffizienz, d. h. der Menge der je gewünschter Funktionalität in Produktionsprozessen und Produkten eingesetzten Metalle, ist der *dritte Baustein*.

Hier werden insbesondere die mit der Miniaturisierung im Bereich digitaler Geräte und Systeme eingesetzten Metalle angeführt. Dies ist aber typischerweise mit einer Erhöhung der eingesetzten Stoffvielfalt und damit Stoffvermischung verbunden. Besonders markant ist dies bei Fortschritten im Einsatz der Nanotechnik, bei der mit der Dotierung geringster Mengen von unterschiedlichsten Metallen neue und hoch spezifische Funktionalitäten erzielt werden können. Gleichzeitig erschweren es solche hoch spezifischen Funktionalitäten, die dafür notwendigen Metalle im Falle einer Knappheit durch andere, in ihren Merkmalen unterschiedliche Metalle zu substituieren.

Die Erhöhung des Recyclinganteils ist der *vierte Baustein*. Im Bereich der mengenmäßig großen Stoffströme, etwa beim Abbruch von Bauten, bei Glas, Papier und Karton etc., konnten mit dem Aufbau einer Recyclingwirtschaft große Fortschritte erzielt werden. Bei Industriemetallen gibt es z. T. auch vergleichsweise hohe Recyclingquoten. Dabei wird die Quote wie etwa bei Kupfer sehr stark durch Preisschwankungen und damit die relativen Preise von Kupfer aus Recycling und aus Primärproduktion beeinflusst. Der für viele Jahre spürbare Sonderfaktor der sehr hohen Nachfrage aus China zum Aufbau der Infrastruktur sorgte für eine gewisse Zeitspanne für relativ hohe Preise.

Bei vielen Technologiemetallen ist die Recyclingrate noch nahe Null. Dies hat nicht nur damit zu tun, dass der Bestand an Produkten, Infrastruktur etc., in denen die Metalle eingesetzt werden, erst entsprechend aufgebaut wird (Unterscheidung von *stocks and flows*). Vielmehr gibt es zwar für viele Metalle technische Verfahren zur Rezyklierung. Diese kommen aber in keiner Weise auch nur in die Nähe der Konkurrenzfähigkeit. Zu unterscheiden sind Recyclinganteile gemessen als mengenmäßige Erfassung von Altmittel und Sortenreinheit und damit die Qualität der rezyklierten Stoffe bzw. deren Vermischung.

Ein *fünfter Baustein* ist Materialsubstitution: Dabei gibt es zum einen Substitution durch Metalle, die ihrerseits kritisch werden können. Dies ist aufgrund der zu erfüllenden Funktionalitäten vielfach beim Ersatz von Seltenerdmetallen durch andere seltene Erden der Fall. Zum anderen handelt es sich um Substitute, die kritische Metalle durch Metalle mit besserer Verfügbarkeit oder andere Materialien (bspw. Stahl durch Carbon) ersetzen. Im letzteren Fall kann sich dann aber die Frage des erforderlichen Energieaufwands als kritisch erweisen. Zudem kann mit Substituten ein Verlust an Funktionalität einhergehen.

Als *sechster Baustein* sind Strategien zu ergänzen, die auf einer anderen Ebene ansetzen. Sie zielen bspw. auf Innovationen neuartiger Produkte ab, die bereits im Produktdesign Kriterien nachhaltigen Umgangs mit Metallen beachten. Beispiele sind Langlebigkeit (Kriterien wie Verschleiß, Korrosion etc.), Reparaturfreundlichkeit (leicht austauschbare Module, Vermeidung bzw. Verringerung von Stoffgemischen etc.), Design von Nutzungskaskaden (Kriterium nicht einmalige Rezyklierbarkeit, sondern Kaskaden von Nutzungen bei hohen Stoffqualitäten etc.), systemische Lösungen (bei Gebrauchsgütern Formen wie Nutzungssharing erleichternd etc.).

In der Ressourcendebatte und -politik wird neben Erfolgen im Recycling und Ressourceneffizienz vielfach stark auf die statische Reichweite der für die Primärproduktion verfügbaren Rohstoffe abgehoben. Dies ist jedoch der denkbar ungünstigste Indikator für

Versorgungssicherheit, ja dieses Konzept ist in vielen Fällen geradezu irreführend. Denn es besagt nur, dass bei einem bestimmten Preisniveau das Angebot für eine bestimmte Zahl von Jahren für ein konstant unterstelltes Nachfrageniveau verfügbar ist.

Wenn die Konzentration der Metalle in den Minen sinkt und damit tendenziell die Preise der zu gewinnenden Metalle steigen (*ceteris paribus*; Preisvolatilität einmal beiseitegelassen), dann werden Minen mit einem geringeren Erzgehalt konkurrenzfähig und die statische Reichweite bleibt somit gleich oder erhöht sich sogar noch.

Tatsächlich nimmt jedoch die Konzentration des Metallgehalts in den Erzen für viele technologisch relevante Metalle im Trend signifikant ab. Auch wenn dieser Rückgang bis zu einem gewissen Grad durch technologischen Fortschritt etwas kompensiert bzw. die Nutzung von Minen dadurch zeitlich etwas gestreckt werden kann, so nimmt doch die tatsächliche Menge der verfügbaren Metalle ab! Hinzu kommt, dass sich die Zugänglichkeit der Minen im Zeitablauf tendenziell verschlechtert.

Es hilft also nichts: Um die Große Transformation in Richtung eines nachhaltigen Umgangs mit Metallen einzuleiten, muss man sich auf die tatsächlich essenziellen Parameter einlassen:

- Konzentration,
- Zugänglichkeit,
- gegebene Häufigkeitsverteilungen der Metalle in der Erdkruste,
- Grad der Vergesellschaftung,
- Schädlichkeit von mobilisierten Stoffen etc.

Dabei ergibt sich ein komplett anderes Bild als mit dem beliebten, aber unerheblichen Indikator statische Reichweite. Dementsprechend bekommt man unterschiedliche Klassen von Metallen mit sehr verschiedener Verfügbarkeit (s. Diskussion um *metals of hope*). Daraus ist ein unterschiedlicher Umgang mit den verschiedenen Metallen abzuleiten.

1.5 Stoffe, Entropie und Dissipation

Ressourceneffizienz ist ein wesentlicher Faktor in Richtung eines nachhaltigen Umgangs mit Metallen. Für sich allein genommen kann dieser jedoch ebenfalls in die Irre führen: Die Digitalisierung der Welt wird immer weiter vorangetrieben mit elektronischen Geräten, elektronisch vernetzten Wertschöpfungsketten und Produktionsprozessen, dem Internet der Dinge. Vielfach kann dabei durch die bereits angesprochene Miniaturisierung eine bemerkenswerte Steigerung der Ressourceneffizienz erzielt werden. Dies wird durch eine immer *weitergehende Stoffvielfalt* und *Zunahme von Stoffgemischen* erreicht.

Tatsächlich führt diese zunächst, ausschließlich an Indikatoren der Ressourceneffizienz gemessen, positive Entwicklung, zu einer *beschleunigten Dissipation der Stoffe* (stoffliche Entropie). Damit wird die Recyclingfähigkeit in vielen Fällen verhindert. In anderen Fällen wird sie so erschwert, dass die Sortenreinheit und damit die Qualität rezyklierter Stoffe

beeinträchtigt werden. Teilweise kann dies zwar durch einen sehr hohen Energieaufwand kompensiert werden, aber es ist grundsätzlich unvermeidlich.

Damit werden Metalle *verbraucht* und *nicht gebraucht* (Reller und Dießenbacher 2014). Obwohl Metalle prinzipiell nach ihrer Nutzung noch immer vorhanden sind und in diesem Sinn nicht verbraucht werden können, sind sie durch diese Art der Dissipation verloren. Praktisch verbraucht!

Nehmen wir ein einfaches Fallbeispiel: In Windkraftanlagen der heutigen Größenordnungen von einigen MW werden nennenswerte Mengen an Metallen wie Neodym eingesetzt. Könnte man bspw. durch Hinzufügen von einigen anderen Metallen in geringsten Mengen die erforderliche Menge an Neodym um die Hälfte reduzieren, würde die Ressourceneffizienz um fast 50% gesteigert werden. Möglicherweise wäre jedoch die sortenreine Rezyklierung des Neodyms nach der Erstnutzung der Windkraftanlage erschwert oder gar verunmöglicht. Die große Menge an erforderlichem Neodym ist geradezu ein Vorteil, da das Depot bekannt ist und die große Menge und die Größe des zu rezyklierenden Produkts eine Erfassung (Sammlung) und eine anschließende Rezyklierung vergleichsweise lohnend macht. Tatsächlich ist die Steigerung der Ressourceneffizienz in digitalen Geräten, Sensoren, dem Internet der Dinge genau durch diese Art Dissipation gekennzeichnet, metaphorisch umschrieben wird die erhöhte Ressourceneffizienz dadurch erkaufte.

It's the dissipation, stupid!

So könnte man den Wahlspruch von Bill Clinton aus seinem ersten Wahlkampf im Jahr 1992 bezogen auf die ungeheure Dynamik der Dissipation von Metallen abwandeln. Oder anders formuliert:

Die Beachtung der stofflichen Thermodynamik heißt, klug zu wirtschaften lernen!

1.6 Große Transformation – Metalle und gesellschaftliches Naturverhältnis

Die Fokussierung auf kritische Metalle lenkt, wie ausgeführt, die Aufmerksamkeit auf die umfassende Frage: Kritisch für wen, wann und wo? Die Auseinandersetzung mit dieser Frage ergibt ein breites Set an Kriterien für Kritikalität – von der Sicherung der Primärversorgung mit Metallen für einen bestimmten Zeitraum und eine bestimmte geografische Einheit bis hin zur Einbeziehung aller heute lebenden Akteure und aller folgenden Generationen.

Damit wird der Umgang mit Metallen in den übergeordneten Zusammenhang der in den 2010er-Jahren beginnenden Großen Transformation von der fossilnuklearen Nicht-nachhaltigkeit hin zu einer postfossilen nachhaltigen Entwicklung eingeordnet (zur „Entdeckung der Nachhaltigkeit“, Grober 2010). Das Konzept der Großen Transformation

geht auf das Buch von Karl Polanyi *The Great Transformation* (Polanyi 1978 [Orig. 1944]) zurück. In diesem analysiert er die epochale Herausbildung der Marktgesellschaft in der industriellen Revolution. Dieser Prozess umfasste eine Veränderung des Verhältnisses zwischen Gesellschaft und Natur durch die Veränderung der sozialen Formen des Stoffwechsels mit der Natur. Maßgeblich dabei waren die Konstituierung der von Polanyi so genannten fiktiven Waren Arbeitskraft, Geld und Boden für ihre In-Wert-Setzung als Ressourcen. Boden steht bei ihm als Kürzel für das umfassende Zur-Ware-Machen der Elemente der Natur, in der Ökonomik heute als Naturkapital bezeichnet. Große Transformation meint also einen sozialökologischen Wandel, der grundlegende Strukturen gesellschaftlicher Prozesse verändert.

Im deutschen Sprachraum wurde die anstehende Große Transformation durch das Gutachten des WBGU (2011) in einer interessierten Öffentlichkeit zum Thema gemacht. Erste Publikationen zum Ressourcenschutz als Bestandteil der Großen Transformation liegen vor (z. B. Angrick 2013).

Die Energiewende ist ein grundlegender Baustein dieser Großen Transformation. Die bisher noch nicht vergleichbar im Blickpunkt der Politik und Öffentlichkeit stehende Stoffwende ist ein weiterer, ebenso grundlegender Baustein. Vorläufer dazu gab es in den 1990er-Jahren, als die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestags „Schutz des Menschen und der Umwelt“ nachhaltiges Stoffstrommanagement und nachhaltige Stoffpolitik behandelte. Dabei standen Chemikalien im Mittelpunkt. Metalle wurden vorrangig unter dem Blickwinkel der Human- und Ökotoxizität von Schwermetallen behandelt, noch nicht jedoch systematisch alle Metalle (EK-Kommission 1994).

Bei der anstehenden Stoffwende geht es vereinfacht formuliert darum, den gesellschaftlichen Stoffwechsel mit der Natur zu verstehen und zu beachten. Dies bedeutet: Wir erleben in diesen Jahren den Anfang vom Ende des Business-as-usual, der bisherigen Art mit Ressourcen verschwenderisch umzugehen und damit zugleich, entsprechend der Naturgesetze, planetare Grenzen (Rockström et al. 2009a, 2009b) zu überschreiten.

Ein nachhaltiger Umgang mit Metallen ist ein Teil der Stoffwende. Wie ausgeführt war die Sicherung der Primärrohstoffsicherung für ein Land wie Deutschland zum Einstieg in die neue Ressourcendebatte der 2000er- und beginnenden 2010er-Jahre hilfreich. Wenn man das Konzept „Kritikalität von Metallen“ umfassend versteht, dann lenkt dies den Blick darauf, dass in der Großen Transformation die Verteilungsfrage von Anfang an einzubeziehen ist. Ein Rohstoffimperialismus, bei dem Kritikalität *ausschließlich* als Versorgungssicherheit strategischer Metalle für die Industrien der früh industrialisierten Länder definiert wird, entspricht in diesem Sinn nicht dem umfassenden Kritikalitätskonzept einer nachhaltigen Entwicklung. Letzteres fordert: Enkeltauglich und für alle Länder der Erde tauglich! Damit die Kluft zwischen Nord und Süd, die Kluft innerhalb der Gesellschaften geschlossen werden kann.

Die Weichen sind dafür heute zu stellen: In der Energiewende als einem Bestandteil der Großen Transformation ist die Nutzung der Atomkraft rasch an ein Ende zu bringen. Ebenso ist es essenziell, dass die nichtnachhaltige Nutzung von fossilen, nichterneuerbaren Ressourcen wie Kohle, Erdöl und Erdgas in der Großen Transformation geordnet und

zünftig zurückgefahren wird. Dies wird nach derzeitigem Wissen auch großen Einfluss auf unseren Umgang mit Metallen haben, den es nachhaltig zu gestalten gilt – sonst wird auch die Energiewende enorm erschwert.

Der derzeitige Umgang mit Metallen ist ebenfalls nichtnachhaltig. Gemessen an den Regeln einer strengen Nachhaltigkeit dürften Metalle überhaupt nicht mehr neu im Bergbau gewonnen werden. Gemäß den Regeln einer schwachen Nachhaltigkeit dürften Metalle noch für eine Übergangszeit neu gewonnen werden (SRU 2012, s. Kap. 2; Held et al. 2000; Gleich et al. 2006; Bradshaw und Hamacher 2012).

Aber es ist offenkundig: Wir erleben seit den 1980er-Jahren geradezu eine Explosion in der Funktionalisierung von Metallen. Dies ist Voraussetzung für die Digitalisierung und die sich dadurch entwickelnden Möglichkeiten einer zunehmend vernetzten Welt. Ebenso sind sie die stoffliche Voraussetzung für die Energiewende. Die Nutzung nahezu aller stabilen Metalle des Periodensystems ist wichtiger denn je. Ohne Metalle wird es nicht gehen.

Daraus folgt: Für die Große Transformation sind *Regeln für einen nachhaltigen Umgang mit Metallen* zu erarbeiten, die Orientierung geben können. Dabei ist die Gültigkeit der Thermodynamik für Stoffe von Anfang an ebenso zu beachten wie die Unterschiedlichkeit der Metalle hinsichtlich ihrer Verteilung, Zugänglichkeit und ihrer Funktion. Ökologische und soziale Fragen sind vergleichbar von Anfang an zu beachten. Und ebenso ist in Zukunft tatsächlich mit Metallen zu wirtschaften, d. h. die Verschwendung von Metallressourcen ist zu beenden.

1.7 Stoffliche Voraussetzungen der Energiewende – energetische Voraussetzungen der Stoffwende

Windenergie, Fotovoltaik, Energiespeicherung, Smart Grids, Leuchtsysteme, Elektrifizierung des motorisierten Straßenpersonenverkehrs – seltene Erden und andere Metalle sind eine wichtige Voraussetzung für den gelingenden Übergang ins postfossile Zeitalter. Damit ist das Augenmerk in der Energiewende zusätzlich zum Klimaschutz verstärkt auch auf die Ressourcen und damit die stofflichen Voraussetzungen der Energiewende zu lenken.

In der sich entwickelnden Energiewende dominiert aktuell die Auseinandersetzung der Interessen der bisher dominanten Akteure mit den Interessen neuer Mitspieler. Pfadabhängig wird das bisher vorherrschende mentale Modell (Denzau und North 1994) von reichlichen und billigen Energien in die neue Welt der Energie, Stoffe, Materialien und Produkte übertragen gemäß dem Motto: „Die Energiekosten müssen niedrig bleiben“. Tatsächlich widerspricht dies nicht nur eklatant der naturwissenschaftlichen, sondern auch der wirtschaftlichen Logik: Damit Preise ihre Steuerungswirkung entfalten können, brauchen sie ein entsprechendes marktliches Umfeld. Wenn auf niedrige Energiekosten gesetzt wird, widerspricht dies den gleichzeitig deklarierten Zielen der Erhöhung der Energieeffizienz und des Energiesparens.

Demgegenüber wird in diesem Buch das Augenmerk auf eine neue, herausfordernde Aufgabe in der Großen Transformation gelenkt: den nachhaltigen Umgang mit Metallen als grundlegenden Teil der stofflichen Voraussetzungen der Energiewende. Es gilt ein resilientes, robustes Energiesystem aufzubauen, das dauerhaft zukunftsverträglich, enkel- bzw. enkelinnentauglich ist. Damit wird klar: Nicht etwa nur Seltenerdmetalle sondern auch Basismetalle wie Kupfer, Halbmetalle und andere Elemente sind von Anfang der Großen Transformation an unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten zu nutzen.

Die stofflichen Voraussetzungen der Energiewende sind das eine. Das andere sind die energetischen Voraussetzungen der Stoffwende. Nur selten wird beachtet, dass für den Erzbergbau, Transport und die Verarbeitung der Erze im großen Stil nichterneuerbare, fossile Energie eingesetzt wird (SRU 2012, Ziff. 111). Beide Teile sind thermodynamisch wie Schloss und Schlüssel, sie gehören zusammen. Metalle sind essenziell als stoffliche Voraussetzungen der Energiewende. Energie ist erforderlich, um die Metalle aus der Primärproduktion zu gewinnen und mit guter Sortenreinheit aus genutzten Beständen wiederzugewinnen (Steinbach und Wellmer 2010; Bardi 2013).

Kurz gefasst: Die großen fossilen Lagerstätten, etwa die großen Erdölfelder wie Al Ghawar in Saudi-Arabien und Cantarell im Golf von Mexiko, wurden zuerst ausgebeutet. Im Zeitablauf nimmt der EROEI, der *energy return on energy invested* (Bardi 2014), ab. Je Einheit gefördertes Erdöl steht damit tendenziell ein geringer werdender Anteil an Nutzenergie zur Verfügung. Zusätzlich steigt tendenziell der erforderliche Aufwand je Menge geförderter Erze, da der Metallgehalt der Erze (Konzentration) abnimmt. Bei einer sich tendenziell ebenfalls verschlechternden Zugänglichkeit der Minen steigt der erforderliche Energieaufwand zusätzlich. Gleiches gilt für das Recycling immer komplexerer und vielfältigerer Produkte.

Je weiter die Große Transformation vorankommt, umso stärker ist die energetische Basis vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen. Die Substitution des Einsatzes schwerster, mit fossilem Diesel angetriebener Transporter im Bergbau erfordert eine weitergehende Elektrifizierung. Herausfordernde Aufgaben in mittlerer Sicht, die frühzeitig vorzubereiten sind, um einen Übergang ohne gravierende Krisen hinzubekommen.

Die stofflichen Voraussetzungen der Energiewende und die energetischen Voraussetzungen der Stoffwende sind in den Gesamtzusammenhang der Großen Transformation und ihrer weiteren Bausteine einzubetten: etwa der Landwirtschafts- und Ernährungswende sowie der Verkehrs- bzw. Mobilitätswende (Held und Schindler 2012).

Dabei geht es zugleich um eine grundlegende Veränderung der gesellschaftlichen Formen des Stoffwechsels mit der Natur, in vergleichbarer Dimension und Tragweite, wie dies im Fall des epochalen Wandels in der Großen Transformation der industriellen Revolution und der Etablierung der Marktgesellschaft der Fall war.

1.8 Zusammenfassung: Grundmaxime für Metallnutzung

Seit den 2000er- und beginnenden 2010er-Jahren gibt es eine Renaissance der Ressourcenpolitik. Kritische Metalle spielen dabei erfreulicherweise die ihnen zukommende

wichtige Rolle. Trotz aller Erfolge im Umgang mit Abfällen und Reststoffen bei den großen Mengenströmen ist die Dynamik der Dissipation vieler Metalle ungebrochen. Damit werden kumulativ Jahr für Jahr vergleichsweise leichter förderbare Minen nicht klug genutzt. Beispielsweise gibt es bisher nahezu kein Recycling von Seltenerdmetallen und anderen kritischen Metallen. Vielmehr werden die Metalle dissipiert und damit verbraucht. Je länger dies anhält, desto schwieriger wird die Große Transformation von einer fossil geprägten Nichtnachhaltigkeit hin zu einer postfossilen nachhaltigen Entwicklung auf einem relativ hohen Niveau von Technologie und Produktivität. Und das dauerhaft verfügbare Potenzial an Metallen wird weiter begrenzt.

Das Kritikalitätskonzept hat das Augenmerk auf die Versorgungssicherheit gelenkt. Ein umfassend verstandenes Konzept von Kritikalität bezieht mit der Fragestellung: Kritisch für wen, wo und wann? alle Akteure ein und öffnet den Blick noch weiter. Ein nachhaltiger Umgang mit Metallen als Teil der Stoffwende in der Großen Transformation bedeutet, die Thermodynamik für Stoffe *von Anfang an* zu beachten. Dazu ist der in der Ressourcenpolitik bisher beliebte, aber irreführende Indikator der statischen Reichweite an Metallreserven beiseitezulegen. Stattdessen sind Regeln für einen nachhaltigen Umgang mit Metallen zu erarbeiten. Dazu sind grundlegende Parameter wie die Entwicklung der Konzentration der Erze und Zugänglichkeit der Minen, Unterschiedlichkeit der Metalle hinsichtlich ihrer Häufigkeitsverteilung etc. ebenso zu beachten wie soziale und ökonomische Rahmenbedingungen einzubeziehen sind.

Ressourceneffizienz ist ein wichtiges Ziel. Dabei ist jedoch zu beachten, dass durch weitergehende Stoffvermischung bzw. Stoffreduzierung Recycling verhindert bzw. die Sortenreinheit deutlich verringert werden kann. Reller und Dießenbacher (2014, S. 111) nennen dies den „tertiären Rebound-Effekt“.

Daraus lassen sich unterschiedliche konkrete Schritte ableiten: Depotbildung von Metallen, Kataster als Wissensspeicher, Verbesserung der Verfahren zur Rückholbarkeit von bisher nicht bzw. nur mit extrem hohem Aufwand rückholbaren Metallen, dissipationsvermeidendes Design und Reduzierung eines verschwenderischen, knappe Ressourcen verbrauchenden Konsumverhaltens etc. Dazu ist ein angemessenes institutionelles Setting zu schaffen (Wäger et al. 2012, S. 305 ff.). Ebenso ist darauf zu achten, bisher in der Evolution weitgehend inerte Metallagerstätten nicht so zu mobilisieren, dass dadurch Ökosysteme und menschliche Gesundheit in Mitleidenschaft gezogen werden. Es geht um einen grundlegenden Wandel des gesellschaftlichen Stoffwechsels mit der Natur.

Wir haben unser einführendes Kapitel mit den unkonventionellen Metalldepots auf dem Meeresgrund und den damit verbundenen Hoffnungen auf einen Tiefseebergbau begonnen. Die Anstrengungen sollten nicht darauf gerichtet werden, sich die letzten Winkel der Erde anzueignen und damit großflächig in bisher wenig berührte Ökosysteme der Erde einzugreifen. Vielmehr weist die Analyse als Grundorientierung für einen nachhaltigen Umgang mit Metallen in eine andere Richtung:

Kritische Metalle nicht länger im großen Stil verbrauchen, sondern sie klug gebrauchen.

Literatur

- Angrick M (2013) Ressourcenschutz. Bausteine für eine Große Transformation Ökologie und Wirtschaftsforschung, Bd. 93. Metropolis, Marburg
- Bardi U (2013) Der geplünderte Planet. Die Zukunft des Menschen im Zeitalter schwindender Ressourcen. Oekom, München
- Bardi U (2014) The mineral question: How energy and technology will determine the future of mining. *Frontiers in Energy Research* 2, Article 9. DOI
- BDI – Bundesverband der Deutschen Industrie (2014) Die Chancen des Tiefseebergbaus für Deutschlands Rolle im Wettbewerb um Rohstoffe. Positionspapier. BDI, Berlin
- Bradshaw AM, Hamacher T (2012) Nonregenerative natural resources in a sustainable system of energy supply. *ChemSusChem* 5:550–562
- Burchardt H-J, Dietz K, Öhlschläger R (Hrsg) (2013) Umwelt und Entwicklung im 21. Jahrhundert. Impulse und Analysen aus Lateinamerika. Nomos, Baden-Baden
- Denzau AT, North DC (1994) Shared mental models: Ideologies and institutions. *Kyklos* 47:3–31
- EK-Kommission – Enquete-Kommission Schutz des Menschen und der Umwelt des Deutschen Bundestages (Hrsg) (1994) Die Industriegesellschaft gestalten. Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Economica, Bonn
- EU Com (2010) Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. EU Commission Enterprise and Industry, Brussels
- Exner A, Lauk C, Zittel W (2014) Sold futures? The global availability of metals and economic growth at the peripheries: Distribution and regulation in a degrowth perspective. *Antipode*: 1–18. doi:10.1111/anti.12107
- von Gleich A, Ayres RU, Gößling-Reisemann S (2006) Sustainable Metals Management. Securing our future – steps towards a closed loop economy. Springer, Dordrecht
- Grober U (2010) Die Entdeckung der Nachhaltigkeit. Kulturgeschichte eines Begriffs. Kunstmann, München
- Gunn G (Hrsg) (2014) Critical metals handbook. Wiley, Chichester
- Held M (2016) Große Transformation von der fossilen Nichtnachhaltigkeit zur postfossilen nachhaltigen Entwicklung. *Jahrbuch 15 Normative und institutionelle Grundfragen der Ökonomik*. Metropolis, Marburg (in Vorbereitung)
- Held M, Schindler J et al (2012) Verkehrswende – wann geht’s richtig los? In: Leitschuh H (Hrsg) Wende überall? Von Vorreitern, Nachzüglern und Sitzenbleibern. *Jahrbuch Ökologie* 2013. Hirzel, Stuttgart, S 38–48
- Held M, Hofmeister S, Kümmerer K, Schmid B (2000) Auf dem Weg von der Durchflußökonomie zur nachhaltigen Stoffwirtschaft. Ein Vorschlag zur Weiterentwicklung der grundlegenden Regeln. *GAIA* 9:257–266
- Kaiser R (2014) ProgRes II – Das deutsche Ressourceneffizienzprogramm 2016. *uwf* 22:115–123. doi:10.1007/s00550-014-0321-8
- König W (1997) Einführung in die „Propyläen Technikgeschichte“. In: Hägermann D, Schneider H (Hrsg) Propyläen Technik Geschichte 1. Landbau und Handwerk. Propyläen, Berlin, S 11–16 (5 Bde.; Einzelbände haben verschiedene Hrsg)
- Moss RL, Tzimas E, Willis P, Arendorf J, Tercero Espinoza L et al (2013) Critical metals in the path towards the decarbonisation of the EU energy sector. Assessing rare metals as supply-chain