

Quo vadis Ressourcenextraktivismus im 21. Jahrhundert – von der Verknappung zum potenziellen Überfluss?

Simon Meißner (Augsburg)

Das 21. Jahrhundert ist zunehmend gekennzeichnet von der Transformation der Energiesysteme hin zu erneuerbaren Energien, klimafreundlicheren Mobilitätskonzepten und -technologien, digitaler Vernetzung, neuartigen Kommunikationskonzepten sowie Innovationen in der Medizin und der Medizininformatik. Dies sind nur einige wenige Beispiele für hochdynamische technische Innovationssysteme, die in den letzten Jahrzehnten zu einer kontinuierlichen Zunahme des Energieverbrauchs und einer fortschreitenden Mobilisierung eines Großteils des Periodensystems der chemischen Elemente geführt haben.¹ Gleichzeitig sind diese technologischen Entwicklungen nicht nur wichtige Treiber für einen stetig wachsenden Energieverbrauch, sondern auch für einen zunehmenden Bedarf an mineralischen und metallischen Rohstoffen. Neben den klassischen Industrierohstoffen, die in großer Menge nachgefragt und eingesetzt werden, wie etwa Aluminium, Kupfer oder Eisen und dessen Veredler Chrom, Molybdän, Vanadium oder Wolfram, betrifft dies zunehmend auch äußerst seltene und aufwendig zu gewinnende Metalle wie Indium, Hafnium, Dysprosium u. a. Diese sogenannten »Gewürzmetalle« (engl. »spice metals«) besitzen spezifische physikalische und chemische Eigenschaften und ermöglichen selbst bei geringstem Mengeneinsatz neuartige mechanische, optische, magnetische oder elektrische Funktionen bei gleichzeitiger Miniaturisierung und Leistungssteigerung der jeweiligen Anwendung.² Dadurch erschließen diese exotischen Materialien wichtige technologische Anwendungsfelder und sind daher essenziell für die Entwicklung vieler technischer Innovationen im Energie-, Automobil-, IT-Sektor u. a. Da diese Metalle jedoch sehr aufwendig und meist nur als Koppelprodukte im Rahmen des Kupfer-, Blei-, Zink-, Zinn- oder Alu-

miniumbergbaus nebenbei gewonnen werden und oftmals geopolitische Abhängigkeiten von einzelnen Geberländern bestehen, werden derartig bedeutende Rohstoffe seitens der Wirtschaft und Politik sehr häufig als strategisch, selten oder gar knapp bezeichnet.³ Darüber hinaus zeichnet sich die Gewinnung dieser »Technologierohstoffe« durch überdurchschnittlich hohe Umweltbelastungen aus.⁴ Die steigende Nachfrage nach diesen Metallen führte in den letzten Jahrzehnten zu einer kontinuierlichen Intensivierung und Expansion der Primärrohstoffwirtschaft und somit eines globalen Ressourcenextraktivismus – mit weitreichenden Folgen für Mensch und Umwelt.

Bereits jetzt sind die Gewinnung und industrielle Verarbeitung natürlicher Ressourcen für rund 50 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich⁵ und die ressourcenbedingten Auswirkungen auf den Wasserstress sowie den Verlust biologischer Vielfalt erstrecken sich mittlerweile auf einen Großteil der globalen Landflächen, mit teils sehr unterschiedlichen Auswirkungen auf lokale und regionale Ökosysteme.⁶ Und falls der steigende Trend bei den ressourcenbezogenen Umweltauswirkungen weiter anhält, werden die Ziele für eine nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals) nur schwer zu erreichen sein. Schätzungen zufolge werden mittlerweile über 35 Milliarden Tonnen Gesteins- und Bodenmaterial pro Jahr als Folge direkter Eingriffe in Form der Rohstoffgewinnung bewegt, was wiederum ein Vielfaches an beobachtbaren natürlichen Masse- und Erdbewegungen weltweit darstellt.⁷ Somit können der Bergbau und der Ressourcenextraktivismus mit ihren weltweit umspannenden Produktions- und Handelsnetzwerken als zentrale Faktoren für eine zunehmende Überprägung und Gestaltung der Erdoberfläche und somit als treibende Kräfte des Anthropozäns gesehen werden. Fisher und Hirschfeld (2020) beschrieben diese Entwicklung durchaus treffend mit der Formulierung »Mining has rewritten the surface of the Earth«⁸, wengleich landschaftliche Änderungen durch die Agrar- und Forstwirtschaft noch gravierendere Dimensionen besitzen.⁹

Angesichts der bisherigen sowie der zu erwartenden künftigen Folgen eines global fortschreitenden Ressourcenbedarfs sind Lösungsansätze gefordert, die sich nicht nur auf technisch-ökonomische Strategien der

Effizienzsteigerung beschränken, sondern vor allem eine ganzheitliche Ressourcen-Governance mit Blick auf eine nachhaltige Entwicklung zum Ziel haben.¹⁰ Denn trotz zunehmender Bemühungen um einen Aufbau einer »Circular Economy« sowie einer Entkopplung der Nutzung natürlicher Ressourcen und damit einhergehender negativer Umweltauswirkungen des Wirtschaftswachstums wird die Extraktion und Bereitstellung von Rohstoffen durch die Bergbauindustrie – und somit ein wesentlicher Einflussfaktor des Anthropozäns – nach wie vor die Hauptquelle für die Versorgung mit mineralischen, metallischen und energetischen Rohstoffen bleiben.

Neben umweltspezifischen Herausforderungen rücken dabei auch sozial- und wirtschaftspolitische Sorgen verstärkt in den Fokus. Immer häufiger diskutierte Probleme hinsichtlich ausbeuterischer Arbeitsverhältnisse in der rohstoffextrahierenden Industrie in Entwicklungs- und Schwellenländern oder »gestörter« Lieferketten, sich vertuernder Rohstoffe, u. a. als Folge sich zuspitzender geopolitischer Verwerfungen und national fokussierter Wirtschaftsstrategien, sowie Hinweise auf sich erschöpfende Lagerstätten schüren die Sorge vor Rohstoffknappheiten, die wiederum das Erreichen globaler umweltpolitischer Entwicklungsziele gefährden könnten. In diesem Kontext wird bspw. die Frage diskutiert, ob die Begrenzung der globalen Erwärmung der Erdatmosphäre auf 1,5 Grad Celsius zum vorindustriellen Zeitalter gemäß des Pariser Klimaschutzabkommens, wofür weltweit flächendeckend innovative Energietechnologien und somit zahlreiche mittlerweile als knapp bezeichnete Metalle erforderlich sind, angesichts angespannter Rohstoffmärkte überhaupt möglich ist? Somit erfährt der Diskurs über die Verfügbarkeit und Endlichkeit diverser Rohstoffe, deren sogenannte »Kritikalität«, und in letzter Konsequenz über die Grenzen der Tragfähigkeit (»Planetary Boundaries«) eine neue Dynamik. Insbesondere wirtschaftspolitische Sorgen um potenzielle Risiken einer künftig zunehmenden Verknappung von Rohstoffen, die für volkswirtschaftliche Schlüsselindustrien essenziell sind, haben in den letzten Jahrzehnten zu zahlreichen Studien geführt, um die Verfügbarkeit von wirtschaftlich als besonders strategisch einzustufenden Rohstoffen zu klären und bei Bedarf Vorschläge zur Reduzie-

rung potenzieller Verknappungen und zur Entschärfung geopolitischer Abhängigkeiten zu entwickeln.¹¹

Hierbei stellt sich jedoch die Frage, ob neben einer marktspezifischen auch eine tatsächliche physische Verknappung im Falle einzelner Rohstoffe befürchtet werden muss, wie dies historisch immer wieder postuliert wurde? Denn insbesondere seit der Veröffentlichung der »Limits to Growth« durch Meadows et al. im Jahre 1972 sowie zahlreicher Folgestudien trafen bislang jegliche Annahmen über eine vermeintlich nahende Verknappung oder gar »das Zur-Neige-Gehen« von Rohstoffen nicht ein. Mehr noch: Bei genauerer Betrachtung zeigen die von geowissenschaftlichen Institutionen geführten Rohstoffstatistiken, aktuellste Prognosen um »Peak-Oil«, »Peak-Coal« und »Peak-Metal« sowie Debatten um deren Reichweiten, dass sich das Angebot des Rohstoffportfolios durch die Entwicklung und Etablierung hocheffizienter Extraktionsverfahren, wie etwa »Hydraulic Fracturing«, »Extended Reach Drilling« oder »Leaching-Techniken«, tendenziell vermehrt oder sich zumindest stabilisiert hat. Trotz des steigenden Aufwandes, der für die Bereitstellung seltener Rohstoffe aus der Natur erforderlich ist, erweisen sich diese Verfahren als zunehmend wirtschaftlich konkurrenzfähig, um selbst geringste Metallkonzentrationen aus Erzen gewinnen zu können. Gleichzeitig mehren sich die Forschungsaktivitäten und bewilligten Konzessionen um die Ausweitung und Intensivierung des Tiefseebergbaus oder die Bemühungen um die Neuverhandlungen der Arktisverträge, um zukünftig neue Rohstoffdeposite sichern und erschließen zu können. Der oftmals prognostizierte globale Förder-Peak bleibt in der Folge für viele Rohstoffe bislang aus oder wird stets weiter in die Zukunft verschoben.

Im Folgenden soll somit der Frage nachgegangen werden, ob die Postulierung einer schwindenden Rohstoffverfügbarkeit angesichts neuer, hocheffizienter Bergbau- und Extraktionsverfahren zumindest mittelfristig noch haltbar ist? Und ob die Weltwirtschaft trotz des zunehmenden Rohstoffbedarfs, steigender Rohstoffpreise und des Einsatzes von hocheffizienten Extraktionsverfahren in eine neue Phase des potenziellen Überflusses steuert? Somit – so die These – könnten zukünftig nicht mehr Fragen der Verknappung, sondern ökologische, soziale und politische

Folgeimplikationen, die mit der Ressourcengewinnung und -nutzung einhergehen, die Grenzen des Wachstums neu definieren. Dies erfordert in Zeiten des fortschreitenden Anthropozäns wiederum eine disziplinübergreifende Auseinandersetzung zur Erfassung neuartiger »Kritikalitäten« und Verantwortlichkeiten im Umgang mit Rohstoffen sowie neue Formen der Ressourcen-Governance. Also, quo vadis Ressourcenextraktivismus im 21. Jahrhundert oder welchen Einfluss üben neue Entwicklungen des Bergbaus auf die zukünftige Verfügbarkeit technologierelevanter Rohstoffe aus?

Das Phänomen der Vorhersage sich verknappender Rohstoffe, welches bisher (noch) nicht eintrat

Sorgen um eine abnehmende Verfügbarkeit oder gar Endlichkeit von natürlichen Ressourcen sind kein Phänomen der Moderne oder gar dieses Jahrhunderts, sondern begleiten wirtschaftsstrategische Diskurse seit jeher. Schon im 16. Jahrhundert drohte die grundsätzlich erneuerbare Ressource Holz knapp zu werden: In ganz Europa wurden Wälder systematisch gerodet, da Holz ein essenzieller Rohstoff für den Bergbau und ein wichtiger Energieträger für die Verhüttung von Metallen war. Der italienische Metallurge Vannoccio Biringuccio (1480–1539) warnte bereits 1540 in seinem Werk »De la Pirotechnia« vor einem zunehmenden Mangel an Holzrohstoffen und Erzen infolge des massiven Raubbaus an der Natur, insbesondere dem Raubbau an den Wäldern und den Erzkörpern.^{1 2} Im Gegensatz zu den Holzvorkommen galt es zu dieser Zeit jedoch als noch nicht erwiesen, dass es sich bei Metallerzen nicht ebenfalls um eine erneuerbare Ressource handeln könnte. Denn Biringuccio berichtete in seinem Werk in Zusammenhang mit den reichhaltigen Eisenerzvorkommen auf der italienischen Insel Elba, dass

[b]ei den Mengen an Erz, die in so vielen Jahrhunderten gewonnen wurden und noch gewonnen werden, [dies zwar dazu führen werde, dass] die Berge und Inseln völlig eingeebnet werden. Trotzdem werde heute mehr und besseres Erz gefördert als je zuvor. Deshalb glaube man, dass sich das Erz dort, wo

es abgebaut wird, nach einer gewissen Zeit im Boden regeneriert. [...] Wenn dies zuträfe, so wäre das etwas Großartiges und würde die große Weisheit der Natur und die große Macht des Himmels bezeugen.¹³

Auch Georgius Agricola (1494–1555), der als Vater der Montanwissenschaften bezeichnet wird, berichtete in seiner 1556 posthum erschienenen Bergbaukunde »De re metallica« von Silberbergwerken in Freiberg, die bereits seit 400 Jahren betrieben wurden, und von Bleiwerken in Goslar, die seit über 600 Jahren »unerschöpft« seien. Ferner wird über den bereits seit über 800 Jahre währenden Silber- und Goldbergbau in Kremnitz, in der heutigen Mittelslowakei, berichtet.¹⁴

Die Suche nach Metallvorkommen war zu dieser Zeit eine große Herausforderung, sodass hierbei verschiedenste Prospektions- und Explorationsmittel zum Einsatz kamen, wie zum Beispiel die Wünschelrute, wie Abbildung 1 anschaulich illustriert. Hierzu hieß es in der »De re metallica«: »[...] [D]ie Kraft der Gänge lasse die Rute ausschlagen, so wie der Magnet das Eisen anzieht [...].«¹⁵ Es war jedoch auch Agricola, der die Umweltauswirkungen des Bergbaus und der Verhüttung erstmals ausgiebig beschrieb:

Viele sind der Meinung, der Bergbau sei [...] eine schmutzige Tätigkeit. [...] Durch das Schürfen nach Erz werden die Felder verwüstet. Durch das Niederlegen der Wälder und Haine aber werden die Vögel und andern Tiere ausgerottet. [...] Die Erze werden gewaschen; durch dieses Waschen aber werden, weil es die Bäche und Flüsse vergiftet, die Fische entweder aus ihnen vertrieben oder getötet.¹⁶

Auch Paulus Niavis (1455–1517) behandelte bereits ausführlich die Nutzungskonflikte und die Eingriffe in die Landschaft durch die Metallgewinnung zu dieser Zeit.¹⁷ Unabhängig davon verteidigten viele Gelehrte jedoch den Bergbau aufgrund seiner wichtigen Bedeutung für die zivilisatorische Entwicklung.



Abb. 1: Aufsuchen der Gänge mit der Wünschelrute und durch Schürfräben. Die Wünschelrute A. Ein Schürfräben B.¹⁸

Eine globale Sichtweise auf die Rohstoffverfügbarkeit, deren potenzielle Begrenztheit und vor allem der Hinweis auf Grenzen der Tragfähigkeit der Erde wurden – wenn auch mit starkem Fokus auf regionale Bezugsgrößen – erst sehr viel später durch den Ökonomen Thomas Robert Malthus im Jahr 1798 thematisiert. Er vertrat die These, dass den Menschen schwere Zeiten bevorstünden, da die Bevölkerungszahl exponentiell wachsen werde, die Produktion von Nahrungsmitteln hingegen lediglich linear zunehmen würde. Versorgungsengpässe könnten somit nur durch eine Verringerung der Geburtenrate – z. B. durch Geburtenkontrolle, ein zölibatäres Leben oder durch mehr Sterbefälle, z. B. ausgelöst durch Hungersnöte und Kriege – verhindert werden.¹⁹ Erste Befürchtungen in Bezug auf eine Verknappung von Metallerzen kamen schließlich vermehrt mit der Industrialisierung auf, als die Nachfrage nach Energie und Metallen lokal stark anstieg

und die zunächst räumlich begrenzte Verknappung, wie im Falle Englands, zu landesweiten Erzhandelssystemen führte. In diesem Zusammenhang prophezeite der Wirtschaftswissenschaftler Stanley Jevons in seiner Monografie »The Coal Question: Can Britain Survive?« im Jahre 1865 den Zusammenbruch der britischen Kohleförderung innerhalb von 100 Jahren, da diesem Energieträger eine entscheidende Rolle im Zeitalter der Industrialisierung zukam und der damit einhergehende technologische Wandel für die steigende Nachfrage nach Kohle verantwortlich gemacht wurde.²⁰

Mit Beginn des 20. Jahrhunderts stieg die globale Nachfrage nach Metallen und fossilen Energieträgern signifikant an, insbesondere in den schnell wachsenden Volkswirtschaften Europas und in den USA, verbunden mit zahlreichen Naturschutzbewegungen, die sich vor allem für die Begrenzung und den Schutz der natürlichen Ressourcen, einschließlich Mineralien, Wälder, Böden und der Fischerei einsetzten.²¹ Mit dem Ersten Weltkrieg wuchs vor allem in den Vereinigten Staaten die Besorgnis, dass die Versorgung mit strategischen Rohstoffen schwierig werden könnte, weil der internationale Handel teilweise zum Erliegen kam. Daraufhin wurden erstmals im Jahr 1917 umfangreiche Bestandsaufnahmen an Materialien und Rohstoffen, deren Verfügbarkeit für die USA und insbesondere deren Militär von Bedeutung sein könnten, für das War Industries Board durchgeführt und veröffentlicht.²² Im Jahr 1921 wurde unter der Leitung von General Harbord eine weitere umfangreiche Bestandsaufnahme durchgeführt, die eine Liste mit 42 für das US-amerikanische Militär als strategisch und kritisch eingestufte Rohstoffe enthielt.²³ Damit wurde das Konzept der kritischen Rohstoffe eingeführt und die akademische Aufmerksamkeit auf die Knappheit von Rohstoffen gelenkt. Dabei ging es in erster Linie um nationale rohstoffpolitische Interessen und somit um die Frage, welche Materialien der US-Wirtschaft und den US-Streitkräften zur Verfügung standen. Wie viele Rohstoffe weltweit verfügbar waren, spielte hingegen zunächst keine vordergründige Rolle.²⁴ Die Knappheit und Verfügbarkeit von Ressourcen wurde dahingehend regelmäßig auf hochrangiger politischer Ebene thematisiert, so z. B. im Rahmen einer Anhörung des US-Senats 1949, in der James Boyd, der damalige Direktor des U. S. Departments of Mining, die »Road to depletion« vorstellte (siehe Abbildung 2).

Darin wurde aufgezeigt, dass die USA mit einem Anteil an der Weltbevölkerung von gerade einmal sieben Prozent, bereits 50 Prozent der global konsumierten Mineralien und 70 Prozent des weltweit geförderten Öls verbrauchen.²⁵ In diesem Zusammenhang wurden auch erste Hinweise und Zeitangaben gemacht, bis wann entsprechende Rohstoffe angesichts des weltweiten Verbrauchs erschöpft sein könnten (siehe Abbildung 2).

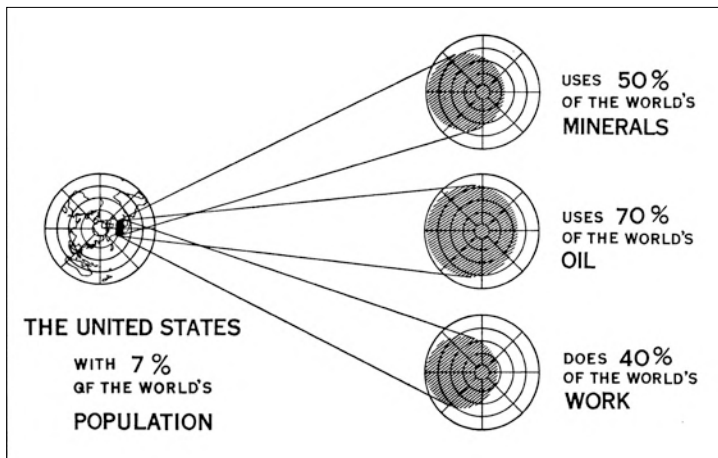
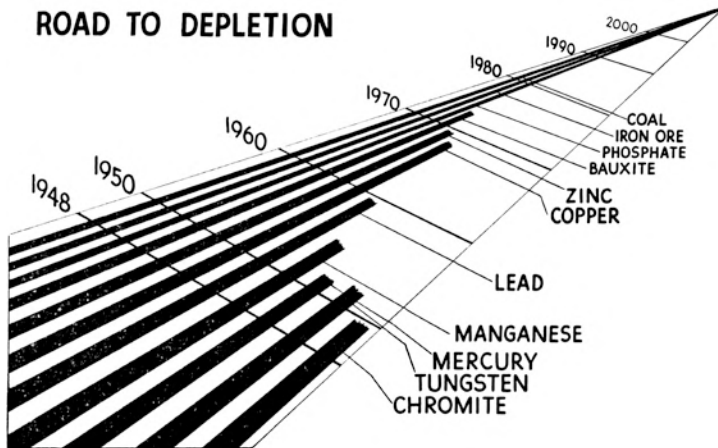


Abb. 2: Anteil der USA am globalen Ressourcenverbrauch im Jahr 1949 und prognostizierte Reichweite »kritischer« Rohstoffe.²⁶

Gestützt wurden diese Hinweise auf zukünftig zur Neige gehende Rohstoffvorkommen durch die Arbeit des amerikanischen Geologen Marion King Hubbert, der in den 1950er-Jahren die historischen Förderdaten fossiler Energierohstoffe, insbesondere für Erdöl, in den USA untersuchte und feststellte, dass die Förderkurven einzelner Lagerstätten alle einen ähnlichen Verlauf aufweisen: Diese stiegen zunächst langsam an, um dann nach einem starken Wachstum einen Wendepunkt, den sogenannten »Inflection-Point«, zu erreichen. Nach Erreichen eines Scheitels sinkt die Fördermenge wieder kontinuierlich ab und lässt sich i. d. R. nicht mehr steigern, so die Annahme Hubberts. Daraus folgerte er, dass sich die Förderkurven grob einer logistischen Verteilung in Form einer Glockenkurve angleichen. Er ging davon aus, dass das Fördermaximum (Peak) erreicht wird, wenn etwa die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Energieträgermengen einer Lagerstätte gefördert worden sind, weshalb er diesen Punkt auch als »Depletion-Midpoint« bezeichnete. Auf Basis seines Modells schätzte Hubbert, dass die US-amerikanische Erdölproduktion im Zeitraum von 1965 bis etwa 1970 ihren Höchststand erreichen wird. 1970 erreichten die USA (ohne Alaska) tatsächlich ihr vorläufiges Fördermaximum für konventionelle Ölvorkommen. Hubberts Prognose hatte sich zu diesem Zeitpunkt zwar für die USA als richtig erwiesen, seine Vorhersagen bezüglich eines globalen »Peak-Oil« haben sich jedoch (noch) nicht bewahrheitet,²⁷ da das Öl-Reservenwachstum durch innovative Fördertechnologien sowie durch die Entdeckung und Erschließung von sogenannten unkonventionellen förderfähigen Lagerstätten maßgeblich beeinflusst wurde und sich somit ein »Depletion-Midpoint« auf globaler Ebene bislang nicht eingestellt hat.

Ungeachtet dessen stellten Barnett und Morse 1963 in »The Economics of Natural Resource Availability« erstmals die These einer abnehmenden und nicht, wie bislang meist vertreten, einer zunehmenden Knappheit auf. Im Zuge einer großen empirischen Studie über historische Trends verschiedener natürlicher Ressourcen zwischen 1870 und 1958 wurden Argumente abgeleitet, wonach zwar immer noch ein kritisches, aber dennoch optimistisches Bild hinsichtlich der Frage einer zukünftigen Verknappung natürlicher Ressourcen vertreten wurde.²⁸ Hintergrund dieses

Optimismus war die Annahme im neoklassischen Wirtschaftssinne, dass die meisten natürlichen Ressourcen, die für die Produktion verwendet werden, zwar nicht erneuerbar sind, es jedoch einen (vorläufigen) Ausweg aus einer »begrenzten Welt« gäbe. Dieser wäre im technischen Fortschritt zu suchen, der im Falle steigender Preise für sich verknappende Rohstoffe ebenfalls eine Steigerung der Ressourceneffizienz, der Rentabilität geringerer Erzkonzentrationen und Lagerstättenqualitäten sowie des zunehmenden Recyclings zur Folge hätte. Daher gingen die beiden Autoren davon aus, dass eine begrenzte Verfügbarkeit an Ressourcen das ökonomische Wachstum nur bedingt beeinträchtigen könne. Dieses anfänglich optimistische Bild änderte sich dann grundlegend durch Publikationen wie »The Population Bomb« von Paul R. Ehrlich (1968) und insbesondere durch die Studie des Club of Rome »The Limits to Growth« von Meadows et al. (1972). Begrenzte natürliche Ressourcen, so die Aussage der Autorinnen und Autoren, stünden einem fast ungebremsten Wachstum der Weltbevölkerung und der globalen Wirtschaftsleistung gegenüber, sodass die absoluten Wachstumsgrenzen auf der Erde im Laufe der folgenden hundert Jahre erreicht werden könnten. Insbesondere die Vorräte an Platin, Gold, Zink und Blei erschienen zum damaligen Zeitpunkt nicht mehr ausreichend, um die Nachfrage langfristig bedienen zu können und bei einer anhaltenden Expansionsrate könnten Silber, Zink und Uran selbst bei sehr hohen Preisen sogar noch im selben Jahrhundert knapp werden.²⁹

In der Diskussion um die Endlichkeit von Rohstoffen wurde und wird häufig der Begriff der »Reichweite« herangezogen, die im Englischen auch als »Reserves-to-production (R/P) ratio« bezeichnet wird und eine Aussage über den Zeithorizont bis zur Erschöpfung der Vorräte ermöglichen soll. Ob sich das »Reichen« des Rohstoffes nun darauf bezieht, wie lange sämtliche Bedürfnisse aus der Nutzung des Rohstoffes befriedigt werden können, oder auf den Zeitpunkt, bis alle Lagerstätten erschöpft sind, ist in der Regel nicht eindeutig definiert und somit je nach Studie unterschiedlich zu interpretieren. Zudem ist in der Literatur zwischen verschiedenen Reichweiten zu differenzieren. Die am häufigsten anzutreffenden Arten der Reichweite sind die statische und die dynamische Reichweite,

wobei im ersteren Falle angenommen wird, dass sich die aktuelle Nachfrage und das Angebot des entsprechenden Rohstoffs in Zukunft konstant verhalten, sich also nicht ändern werden. Die wesentliche Schwäche dieses Indikators ist somit die Missachtung dynamischer Veränderungen auf Angebots- und Nachfrageseite in Form von Status-quo-Annahmen, sodass die dadurch generierten Einschätzungen zu den Verfügbarkeitshorizonten meist nur eine kurze Momentaufnahme der Verfügbarkeit eines Rohstoffes darstellen. Der Umfang der Reserven und die Intensität der Rohstoffextraktion verhalten sich keinesfalls statisch, sondern variieren u. a. in Abhängigkeit vom geologisch-technischen Kenntnisstand und der wirtschaftlichen und politischen Entwicklung. So üben beispielsweise der technische Fortschritt und die Effizienzsteigerung von Explorations- und bergbaulichen Extraktionsverfahren bereits einen großen Einfluss auf die Reichweite aus. Dies führte i. d. R. bei länger anhaltenden hohen Preisniveaus dazu, dass die Reserven vieler Rohstoffe im Laufe der Zeit tendenziell zu- anstatt abgenommen haben, obwohl deren Verbrauch global beständig angestiegen ist. Beispielsweise werden durch neue Explorationskonzepte sogar in alten Lagerstätten immer wieder neue Reserven entdeckt und erschlossen.³⁰ Technologischer Fortschritt begünstigt zudem das Recycling eines Rohstoffs, mit dessen Hilfe die Reserven bzw. das Angebot an einem Rohstoff ebenfalls erheblich erweitert werden können – also durchaus zutreffende Parallelen zur bereits von Barnett und Morse 1963 getätigten Argumentation. Vor diesem Hintergrund werden neben den statischen Reichweiten mittlerweile auch dynamische Reichweiten mittels Annahmen bei der Entwicklung angebots- und nachfrageseitiger Einflussfaktoren abgeleitet. Aber auch dynamische Reichweiten besitzen aufgrund vieler unsicherer und oftmals noch nicht belegter Annahmen erhebliche Unsicherheiten, sodass die Entwicklung von Szenarien hierbei eine wichtige Rolle spielt, um eine Bandbreite möglicher Entwicklungspfade abdecken zu können. Daher können Reichweiten grundsätzlich keinesfalls als Prognoseinstrument, sondern nur als eine Momentaufnahme in einem sich dynamisch entwickelnden System von Angebot und Nachfrage verstanden werden, die in regelmäßigen Abständen aktualisiert bzw. neu berechnet werden sollte.³¹

So bezifferten Meadows et al. (1972) damals die Rohstoffvorräte für Aluminium und deren Reichweite ursprünglich auf nur noch 31 Jahre, dementsprechend wären die Aluminiumvorräte bereits 2003 erschöpft gewesen. Für Wolfram wurde beispielsweise eine Reichweite von 28 Jahren errechnet, für Kupfer und Blei eine Reichweite von 21 Jahren. Die Reichweiten für Zink und Zinn wurden auf 18 bzw. 15 Jahre beziffert, für Silber und Quecksilber auf 13 Jahre und für Gold auf neun Jahre.^{3,2} Tatsächlich sind diese Rohstoffe heute noch immer in großen Mengen verfügbar, ebenso wie Erdgas und Erdöl, deren Reichweiten Meadows et al. auf 22 und 20 Jahre berechneten und deren Verfügbarkeiten zur Jahrtausendwende hätten zur Neige gehen sollen. Viele dieser Rohstoffsegmente zeichnen sich trotz dieser Vorhersagen durch vergleichsweise hohe Vorkommen aus. So liegen beispielsweise die Reserven an Zink gegenwärtig bei 250 anstatt bei 123 Millionen Tonnen, wie ursprünglich von Meadows et al. angegeben wurde. Und die Kupferreserven hatten in 2020 einen Umfang von 870 anstatt der 308 Millionen Tonnen im Jahr 1972. Insbesondere die Bauxitreserven betragen heute mit ca. 30 Milliarden Tonnen das 30-fache der damaligen Annahmen der 1970er-Jahre. Auch die Kobalt-, Molybdän-, Nickel- und Wolframreserven haben zugenommen. Vor allem die Reserven der Edelmetalle Gold und Silber sowie der Platingruppenmetalle sind seit 1972 erheblich angestiegen. Sprachen Meadows et al. noch von 11.000 Tonnen an Goldreserven, 170.000 Tonnen an Silber- und 13.300 Tonnen an Platinmetallreserven, so betragen diese in 2020 nach Angaben des U. S. Geological Survey (2021) selbst nach knapp 50-jähriger Extraktion und Nachfrage mittlerweile 53.000 Tonnen, 500.000 Tonnen und 69.000 Tonnen.^{3,3} Lediglich die Blei-, Eisenerz- und Chromreserven haben geringfügig abgenommen und die Zinnreserven bewegen sich mit ca. 4,3 Millionen Tonnen auf einem ähnlichen Niveau wie Anfang der 1970er-Jahre. Auch die Öl- und Gasreserven haben seit über 50 Jahren historisch einen ihrer höchsten Werte erreicht.^{3,4}

Somit kann zunächst einmal festgehalten werden, dass die Rohstoffvorräte, trotz der historisch zahlreich getätigten pessimistischen Aussagen, bei Weitem (noch) nicht erschöpft sind und dass die bisherigen Prognosen vieler Studien des 20. Jahrhunderts, allen voran die wegweisende

Veröffentlichung von Meadows et al. (1972) nur bedingt eintrafen. Daher stellt sich die Frage, welche Gründe zu dieser offensichtlichen Fehleinschätzung führten – und somit auch zu zahlreichen politischen Fehlinterpretationen? Ungeachtet dieser Tatsache ging es in den »Grenzen des Wachstums« – im Gegensatz zu den bisherigen Studien – nun vermehrt auch um die globalen Entwicklungsperspektiven sowie um eine generelle Kritik an dem bisher sorglosen Umgang mit den Ressourcen. Ferner wurde nicht nur die Verknappung von energetischen und nicht energetischen Rohstoffen thematisiert, sondern auch die damit einhergehenden Umweltauswirkungen aufgezeigt. Speziell dieser Aspekt wird mittlerweile in den meisten modernen Kritikalitätsstudien zu Rohstoffen im 21. Jahrhundert thematisiert, die angesichts der enormen Vielzahl und Intensität ökologischer Implikationen durch den Bergbau zunehmend eine nachhaltige Rohstoffextraktion fordern. Ferner wird die Verknappung nicht in Form eines »Zur-Neige-Gehens« betrachtet, sondern eher als Risiko kurz- oder mittelfristiger Lieferengpässe verstanden.^{3 5}

Die Gründe für das Nichteintreffen bisheriger Verfügbarkeitsprognosen

Obwohl zu unterschiedlichen Zeiten veröffentlicht, betonen die meisten Arbeiten und Studien zur Rohstoffverfügbarkeit im letzten Jahrhundert die Rolle des Bevölkerungswachstums und die damit einhergehende wachsende Nachfrage nach Gütern als Treiber für einen zunehmenden Bedarf an Rohstoffen und damit einer Ausbeutung natürlicher Ressourcen. Daher ergab sich in vielen Fällen ein eher pessimistisches Bild, das zu einer unvermeidbaren Verknappung essenzieller Rohstoffe und Energieträger innerhalb weniger Jahrzehnte führen sollte.^{3 6} Allerdings schenkten diese Studien der Bedeutung der Reaktionen auf Angebots- und Nachfrageseite auf eine zunehmende Knappheit nur wenig bis gar keine Aufmerksamkeit. Dieser Umstand offenbart sich z. B. in der geringen Berücksichtigung des technologischen Wandels, der das düstere Szenario zur Neige gehender Rohstoffe bislang verhindern konnte. Dass die bisherigen Studien eine derart rasante Ressourceneffizienz- und Produktivitätszunahme, wie sie insbesondere in

den letzten Jahrzehnten erzielt werden konnten, nicht berücksichtigten, ist gerade deswegen nicht wirklich verwunderlich, da derart beschleunigte Innovationskräfte im Bergbau historisch bislang noch nicht vorgekommen waren und sich somit dem Erfahrungsschatz der damaligen Wissenschaften entzogen. Eine große Ausnahme hiervon bildete die Studie von Barnett und Morse, in der diese Möglichkeit bereits 1963 zumindest angedeutet wurde. Die schlichte Extrapolation historischer Daten für Angebot und Nachfrage, die häufig für Prognosen zugrunde gelegt wurde, erweist sich somit aus heutiger Sicht als äußerst problematisch. Selbst die Einführung exponentieller Nachfrageentwicklungen und die Annahme unterschiedlicher Ressourcenbestände oder die Untersuchung verschiedener Szenarien, wie sie Meadows et al. ebenfalls vorgenommen haben, setzte der impliziten Annahme, »[...] dass sich von zunehmender Knappheit Betroffene passiv ihrem Schicksal ergeben«, wenig entgegen.³⁷ Marktspezifische Verknappung und somit eine Erhöhung der Rohstoffpreise induzieren jedoch nach heutigem Erfahrungsschatz zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen und in der Folge verbesserte Gewinnungs- oder Recyclingverfahren sowie verstärkte Explorationsanstrengungen bis hin zu einem Abbau von Lagerstätten mit geringeren Erzkonzentrationen bzw. Rohstoffqualitäten. So lässt sich beispielsweise zeigen, dass die deutlichen Preisanstiege für Kupfer in den 1950er- und 1960er-Jahren bzw. für Gold in den 1970er-Jahren jeweils Phasen verstärkter Buntmetall- bzw. Goldexploration auslösten. Vor allem der Explorationsboom nach Gold in den 1980er- und 1990er-Jahren hat die Entdeckung umfangreicher neuer Reserven zur Folge gehabt. Und allein in den letzten 15 Jahren wurden weltweit durchschnittlich ca. 85 Milliarden US-Dollar pro Jahr für die Explorationsanstrengungen von Gold, Kupfer, Zink, Blei, Nickel und Platingruppenmetallen investiert, wobei in 2012 aufgrund der Finanzkrise und der erhöhten Nachfrage der Finanzmärkte nach Edelmetallen insgesamt 16,4 Milliarden US-Dollar zu Explorationszwecken ausgegeben wurden. Auf Gold allein entfielen davon 9,7 Milliarden US-Dollar.³⁸

Der Anstieg vieler Rohstoffreserven ist jedoch nicht ausschließlich höheren Preisen geschuldet, denn sowohl die realen als auch die inflationsbereinigten Preise einiger Basismetallrohstoffe und Stahlveredler sind seit

Anfang der siebziger Jahre sogar gefallen oder zumindest auf etwa demselben Niveau geblieben. Vielmehr muss der Anstieg der Reserven mineralisch-metallischer wie auch energetischer Rohstoffe auf andere Faktoren zurückgeführt werden, allen voran auf das damals noch sehr lückenhafte geologische Wissen um die Mengenpotenziale noch nicht untersuchter und unentdeckter Lagerstätten, bei dem Explorationsfortschritte und -erfahrungen eine wichtige Rolle spielen.³⁹ In diesem Zusammenhang wurde gegen den Bericht von Meadows et al. 1972 häufig eingewendet, dass die Möglichkeiten der Wissenschaft und des technologischen Fortschritts bei der Exploration nicht genügend berücksichtigt wurden.⁴⁰ Insbesondere wurde kritisiert, dass »die Möglichkeiten, Rohstoffe in heute noch ungenügend untersuchten Gebieten der Erde aufzufinden, größer [seien], als im Modell von Meadows und seinem Team berücksichtigt [wurde]«. ⁴¹ Dieser Umstand lässt sich am Beispiel des sogenannten bimodalen Verteilungsmodells von Metallen veranschaulichen (siehe Abbildung 3), welches bereits Mitte der 1970er-Jahre von Brian Skinner entwickelt wurde und damit einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis des Vorkommens und der Zugänglichkeit zu weltweiten Rohstoffvorräten leistete.⁴²

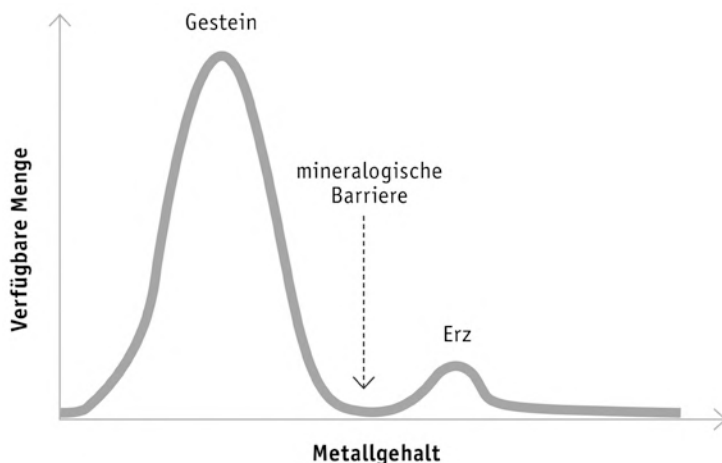


Abb. 3: Bimodales Verteilungsmodell von seltenen Metallen nach Skinner (1976).⁴³ Die meisten Gesteine enthalten geringe Mengen der entsprechenden Metalle. Nur in Erzen sind die wertvollen Metalle höher angereichert und somit wirtschaftlich besonders interessant.

Entsprechend des bimodalen Rohstoffverteilungsmodells ist davon auszugehen, dass von der Gesamtmasse eines Elements in der Erdkruste nur ein relativ kleiner Anteil hochkonzentriert in rentabel abbaufähigen Erzgesteinen und somit Lagerstätten vorliegt. Der weitaus größere Teil liegt jedoch in viel geringeren und meist ökonomisch unrentablen Konzentrationen in Gesteinen vor. Derjenige Anteil der verfügbaren Menge, der bereits durch Exploration und Prospektion bekannt ist sowie aufgrund des aktuellen Preisniveaus und technisch gegebenen Extraktionsverfahren ökonomisch rentabel abbaufähig ist, zählt zu den sogenannten Reserven.⁴⁴ Diese bilden wiederum die Berechnungsgrundlage für Reichweiten. Bei fortschreitendem Abbau der ökonomisch attraktivsten Erzlagerstätten, muss nach deren Erschöpfung auf Lagerstättenstandorte mit deutlich geringeren Elementkonzentrationen zurückgegriffen werden. Je geringer die Konzentration einer Lagerstätte durch fortschreitenden Abbau der Rohstoffe wird, desto technisch anspruchsvoller und somit für gewöhnlich teurer gestaltet sich deren weitere Ausbeutung. Knappheit könnte sich somit immer dann einstellen, wenn der durch die Verschiebung der technisch-ökonomischen Abbaubarkeit entstehende Zuwachs an Reserven die Fördermengen der betreffenden Periode nicht kompensieren kann.⁴⁵ Diesem Umstand wirkt i. d. R. die Entwicklung neuer, innovativer und effizienter Extraktionsverfahren entgegen, die bei anhaltend steigenden Preisniveaus auf den Rohstoffmärkten Erze mit geringeren Konzentrationen und Qualitäten rentabler fördern können. Skinner ging hierbei jedoch davon aus, dass trotz beständig fortschreitender Effizienzsteigerungen im Bergbau irgendwann eine ökonomisch-technische Grenze erreicht werden wird, bei der die Erzkonzentrationen so gering sind, dass ein Abbau dieser »verbleibenden« Konzentrationen selbst bei kontinuierlich steigenden Preisen nicht mehr sinnvoll ist, da alternative Methoden der Rohstoffbeschaffung, u. a. Recycling, viel lukrativer wären. Er nannte diese Grenze die »mineralogische Barriere«. Da unterhalb der mineralogischen Barriere stets ein ökonomisch-technischer Restbestand in der Natur erhalten bleibt, kann somit grundsätzlich nicht von einer zukünftigen physischen Erschöpfbarkeit eines mineralisch-metallischen Rohstoffs ausgegangen werden. Die Erschöpfbarkeit ist daher rein als öko-

nomisch-technische Grenzgröße und nicht als unumkehrbare physische Endlichkeit zu verstehen. Je nach Rohstoffart und Erzlagerstätte ist diese mineralogische Barriere als Schwellenwert einer »nicht mehr veränderbaren ökonomisch-technischen Erschöpfbarkeit« sehr unterschiedlich zu werten und deren tatsächliche Grenze noch nicht vorhersehbar bzw. genau bestimmbar. Allerdings wird eine »temporär« bestehende Grenzgröße der ökonomisch-technischen Rentabilität einer Lagerstätte durch den sogenannten »Cutoff-Grade« festgelegt, der als Mindestkonzentration an Metallgehalten im Erzgestein definiert ist, der für einen rentablen Abbau zu gängigen Marktpreisen gegeben sein muss. Allerdings wird dieser Cutoff-Grade durch kontinuierliche Effizienzsteigerungen im Bergbau stetig verkleinert und somit der Zeithorizont bis zum Erreichen der mineralogischen Barriere einzelner Lagerstätten oder – sofern diese tatsächlich erreicht werden sollte – im globalen Sinne fortwährend zeitlich verschoben.

Ein wichtiger geologischer Faktor, der zu einer ökonomisch-technischen Verknappung von Metallen führen kann, ist somit die Qualität und insbesondere der Metallgehalt in den vorhandenen mineralischen Lagerstätten. Wie nicht anders zu erwarten, ist seit vielen Jahrzehnten ein Trend hin zu abnehmenden Metallgehalten in den Lagerstätten zu verzeichnen. So haben sich beispielsweise die Erzgehalte von Kupfer, Blei, Zink, Nickel und Uran seit Mitte/Ende des 19. Jahrhunderts durchschnittlich um den Faktor zwei bis vier verringert, im Falle von Silber um den Faktor fünf und für Gold sogar um den Faktor zehn.^{4,6} Dies ist wiederum mit einem erhöhten energetisch-technischen Aufwand und somit steigenden Umweltimplikationen verbunden, da für den Abbau dieser Rohstoffe eine kontinuierlich zunehmende Gesteinsmenge bewegt und bearbeitet werden muss. Dies äußert sich in der Folge durch einen gesteigerten Wasserverbrauch, Energieeinsatz und somit Treibhausgasemissionen pro Tonne gefördertem Erzgestein sowie einer Zunahme des Flächenverbrauchs oder des Anfalls von Abraum in Form von taubem Gestein.^{4,7} Gleichmaßen ist eine Weiterentwicklung von Extraktionsverfahren im Bergbau unabdingbar, um die global steigende Nachfrage nach Bergbauprodukten weiterhin bedienen zu können. Durch die neuen Extraktions-

verfahren werden nicht nur neue Deposite mit geringeren Erzqualitäten erschlossen, sondern auch ältere Lagerstätten oder gar deren Abraumhalden (engl. »tailings«) mit ihren Restgehalten an Metallen neu aufgearbeitet. Neben den klassischen chemischen und metallurgischen Verfahren kommen hierbei zunehmend auch biotechnologische Optionen zur Rückgewinnung von mineralischen Rohstoffen zum Einsatz. »Biomining« bzw. »Bioleaching« stellt mittlerweile ein effizientes Verfahren dar, um mithilfe von pflanzlichen oder bakteriellen Mikroorganismen Kupfer, Gold, Uran und Phosphate aus Erzen oder Schlacken zu extrahieren. Die Vorteile bestehen darin, dass Minerale und Metalle im Vergleich zu klassischen pyro- und hydrometallurgischen Verfahren relativ kostengünstig, energieeffizient und mit wesentlich geringeren schädlichen Umwelteinflüssen gewonnen werden können. Zudem lassen sich bislang unrentable Abraumhalden oder Erzvorkommen mit geringen Metallkonzentrationen mit derartigen biotechnologischen Verfahren behandeln. Eine bereits praxistaugliche Anwendung von Biomining ist der Abbau von Kupfer aus sulfidischen Erzen oder Schlacken durch Bakterien und Pilze, die ein rohstoffhaltendes Ausgangssubstrat aus einer schwefelsäurehaltigen Lösung extrahieren und akkumulieren, dessen Ergebnis eine hochkonzentrierte metallhaltige Flüssigkeit ergibt, aus der Kupfer mittels Elektrolyse zurückgewonnen werden kann.^{4 8}

In der Folge der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Extraktionsverfahren, die über und unter Tage zum Einsatz kommen können, verschiebt sich vieler Orts der Cutoff-Grade, sodass sich die ursprünglichen Annahmen einer sich zuspitzenden Verknappung von mineralisch-metallischen und fossil-/atomar-energetischen Rohstoffen weder für viele Lagerstätten noch im globalen Maßstab eingestellt haben. Mehr noch: Anstatt sich kontinuierlich zu verringern, zeichnen sich die Reichweiten vieler Metalle seit mehreren Jahrzehnten durch ähnliche Niveaus mit geringfügig abnehmenden oder sogar steigenden Tendenzen aus. Gleiches trifft auf fossile Energieträger zu: So stellt sich die Reichweite des Erdöls seit Jahrzehnten zwar als volatil, jedoch relativ konstant stabil dar. Von 1945 bis heute bewegt sie sich in einem Korridor zwischen 30 und 50 Jahren mit ausgeprägten Höhen und Tiefen. Grund hierfür

ist, dass die Ölindustrie fortwährend explorierte, neue Erdöllagerstätten entdeckte und effizientere Fördertechnologien entwickeln konnte.⁴⁹ Diese werden unter dem Begriff der »Enhanced-Oil-Recovery-Verfahren« zusammengefasst, die z. B. mittels Flutung der Erdöllagerstätte mit Wasserdampf, Gasen oder chemischen Polymeren zur Verbesserung des natürlichen Entölungsgrades einer Erdöllagerstätte führen und somit die Ausbeute signifikant erhöhen.⁵⁰ Gleiches gilt für den mittlerweile gängigen Einsatz von »Hydraulic Fracturing« zur Gewinnung von Erdgas aus sogenannten unkonventionellen Lagerstätten, mit deren Hilfe das methanhaltige Gestein im Untergrund aufgebrochen und zertrümmert wird, um das darin gebundene Erdgas freisetzen und fördern zu können. Die Menge der zugänglichen Reserven fossiler Energieträger konnte damit in der Vergangenheit trotz einer massiv steigenden Förderung sogar erhöht werden.⁵¹ Vor dem Hintergrund fortwährender Effizienzsteigerungen der rohstoffextrahierenden Industrie ist es somit üblich, bergbauliche Reserven nicht anhand ihres physischen Bestands, sondern aus wirtschaftlich-technischer Sicht zunächst rein rechnerisch auf durchschnittlich 20 bis 60 Jahre begrenzt zu verstehen. Der Grund hierfür ist, dass die weitere Erschließung von bereits bekannten oder die Entdeckung von neuen Lagerstätten über diesen langen Zeithorizont, also aus betriebswirtschaftlicher Sicht in »ferner« Zukunft, für ein Bergbauunternehmen finanziell uninteressant sind. Erst im Falle kontinuierlich steigender Marktpreise, einer erhöhten und langfristig anhaltenden Nachfrage oder durch die Einführung effizienterer Förder- und Aufbereitungstechnologien werden sowohl die Intensivierung der Explorationsaktivitäten als auch die Vorbereitungen zur Extraktion von neu entdeckten Lagerstätten oder die Modernisierung und Ausweitung bereits bestehender Bergbaustandorte betriebswirtschaftlich lukrativ. Diese aus wirtschaftlich-technischer Sicht begründete »optimistische« Perspektive einer sich stabilisierenden und in letzter Konsequenz »niemals« endenden Reichweite des Naturkapitals darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass bei unverändertem Wirtschaften die geologischen Lagerstätten irgendwann tatsächlich weitgehend ausgebeutet sein werden (mineralogische Barriere). Je nach Rohstoff mag der Zeithorizont dafür zwar unterschiedlich dimensioniert

sein, im Sinne eines vorausschauenden Vorsorgeprinzips ist dennoch ein nachhaltiger und schonender Umgang, insbesondere mit seltenen nicht regenerierbaren Rohstoffen, zwingend erforderlich.

Neben neuen Explorationserfolgen und effizienteren Methoden zur Rohstoffgewinnung stehen mit einer effizienteren Nutzung von Rohstoffen, der Substitution durch weniger knappe oder erneuerbare Rohstoffe sowie einer umfassenden Kreislaufwirtschaft weitere Alternativen zur Verfügung, um potenziellen Knappheiten zu entgegenen. Insbesondere zunehmende Recyclingquoten zeigen, dass die stoffliche Rückgewinnung von Rohstoffen eine wichtige ergänzende ökonomische Alternative zur Primärgewinnung mit wesentlichen ökologischen Vorteilen darstellt und somit einer zunehmenden Bereitstellung von Energieträgern, Metallen und Mineralen durch die umweltintensive Primärrohstoffwirtschaft entgegenwirkt. Trotz aller Bemühungen um global steigende Recyclingquoten ist eine Rohstoffversorgung durch die rohstoffextrahierende Industrie nach wie vor die wichtigste Quelle für Metalle. So betragen die globalen Recyclingquoten für Kupfer und andere Metalle wie Aluminium, Titan, Chrom, Eisen sowie vor allem den Edelmetallen Gold, Silber und Platingruppenmetallen mittlerweile deutlich über 50 Prozent, für andere Metalle, speziell im Bereich strategischer Technologiemetalle wie Lithium, Gallium, Indium, Hafnium u. a. belaufen sich die Quoten jedoch auf weniger als ein Prozent, da die Wiedergewinnung technisch wie ökonomisch derzeit noch zu aufwendig ist.⁵² Somit ist die Kreislaufwirtschaft aktuell nur bedingt in der Lage, die Knappheitsfrage und somit die natürlichen Reserven einzelner Rohstoffsegmente signifikant zu entlasten.

Insgesamt kann somit festgehalten werden, dass sich angesichts bisheriger Entwicklungen auf den Rohstoffmärkten die Perspektive der Verknappungsdebatte maßgeblich gewandelt hat: Während die Diskussion über die Grenzen des Wachstums in den 1970er-Jahren einen starken Fokus auf die Verfügbarkeit volkswirtschaftlich wichtiger nicht erneuerbarer Ressourcen legte, stehen heute die Übernutzung und Zerstörung wichtiger Ökosysteme⁵³ oder soziale Missstände, Ausbeutung und mangelnder Arbeitsschutz der Minenarbeiterinnen und Minenarbeiter – zumindest in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern – im Vordergrund.⁵⁴ Die

Frage der Verknappung fokussiert sich lediglich auf die Fraktion der sogenannten »Gewürzmetalle«, die hinsichtlich ihrer exponentiellen Nachfrage in den letzten 20 Jahren noch eine Sonderstellung auf den globalen Rohstoffmärkten einnehmen und derzeit fast ausschließlich durch den industriellen Bergbau bereitgestellt werden müssen. Und selbst in diesen Fällen ist (noch) nicht von einer physischen Endlichkeit, sondern lediglich einer ökonomisch-technisch definierten Verknappung auszugehen.

Ressourcenextraktivismus im 21. Jahrhundert – Quo vadis?

Mineralisch-metallische Rohstoffe sowie fossile Energieträger werden trotz intensiver Bemühungen des Klimaschutzes und zur Einhaltung der Vorgaben des Pariser Klimaschutzabkommens weiterhin ein zentrales Fundament der Weltwirtschaft bilden. Auch die angestrebte Abkopplung der Wirtschaft von der Ressourcennutzung sowie die Entwicklung hin zu mehr Recycling wird kurz- bis mittelfristig diesen Trend nicht brechen können.⁵⁵ Die Nachfrage nach endlichen, nicht regenerierbaren Ressourcen wird vor allem angetrieben von aufstrebenden Volkswirtschaften mit wachsender Bevölkerung, durch das Wachstum einer globalen Mittelschicht, einer Urbanisierung und eines Technologiewandels, einschließlich einer Dekarbonisierung globaler Energiesysteme.⁵⁶ Hierbei wird auch eine Transition der rohstoffextrahierenden Industrie gemäß der Forderungen der Sustainable Development Goals eine wichtige Rolle spielen, um neben wirtschaftlichen vor allem ökologische und soziale Belange in der Rohstoffwirtschaft gemäß internationaler Standards stärken zu können.⁵⁷ Hierzu zählen beispielsweise international anerkannte Standards und Initiativen der Bergbauindustrie selbst, wie etwa die »Initiative for Responsible Mining Assurance (IRMA)«, Zusammenschlüsse rohstoffextrahierender Länder, u. a. durch die »Extractive Industries Transparency Initiative (EITI)«, oder die Bereitstellung von Leitfäden für einen Bezug von Rohstoffen aus Konfliktregionen (vgl. Due Diligence Guidance). Ferner bestehen zahlreiche internationale Vorgaben zur Verbesserung der Sorgfaltspflicht in Lieferketten und einer erhöhten Transparenz bzgl. der

Herkunft von Rohstoffen durch Gesetzgebungen der EU (EU-Verordnung 2017/821 zur Festlegung von Pflichten zur Erfüllung der Sorgfaltpflichten in der Lieferkette), der USA (Dodd-Frank Act, Section 1502) u. a. Dadurch soll eine Rückverfolgbarkeit hinsichtlich der geografischen Herkünfte sowie der sozialen und ökologischen Begleitumstände, die mit der Gewinnung der Rohstoffe verbunden sind, geschaffen und dadurch Anreize zur kontinuierlichen Weiterentwicklung des Bergbaus zu einer nachhaltig wirtschaftenden Industrie gesetzt werden. Aber welche Dynamiken und Entwicklungsperspektiven sind zukünftig im Bergbau selbst zu erwarten? Welche Perspektiven bestehen, um die weltweit wachsende Nachfrage nach endlichen Ressourcen weiterhin zu stillen und wie könnte sich dies auf die zukünftige ökonomisch-technische Verfügbarkeit und die Reichweiten entsprechender Rohstoffe auswirken?

Wie schon erwähnt, werden technische Innovationen den Bergbau weiterhin prägen, insbesondere, um neben dem zunehmenden Preisdruck und dem wachsenden internationalen Wettbewerb den international steigenden Umwelt- und Sozialanforderungen gerecht zu werden. Dies ist allein deswegen von Bedeutung, da die Explorationsanstrengungen und somit die Entwicklung zukünftiger Abbaustandorte zunehmend in technisch äußerst anspruchsvolle sowie ökologisch sensible Standorte vordringen, wie etwa in die zirkumpolaren Regionen der Arktis und der Antarktis sowie der Tiefsee. So wurden in den Polarregionen im globalen Maßstab bedeutende Öl- und Gasvorkommen sowie eine Vielzahl von lukrativen Metallvorkommen, insbesondere der mittlerweile äußerst technologie-relevanten Seltenen Erden, bestätigt. Ein Abbau in diesen Gebieten ist jedoch technisch äußerst aufwendig und mit hohen Umweltrisiken verbunden. Auch die wichtigsten Produktionsstätten für Erdöl und Erdgas der zirkumpolaren Hemisphäre befinden sich aktuell zu über 95 Prozent auf dem arktischen Festland in Alaska sowie im Norden Skandinaviens und Russlands. Dieser geografische Schwerpunkt der Extraktionsstandorte könnte sich jedoch angesichts der Schätzungen des US-amerikanischen geologischen Dienstes (USGS) in marine und grönländische Gebiete verlagern, da dort insgesamt 15 Prozent der weltweit noch unentdeckten Ölreserven und über 30 Prozent der globalen Erdgasreserven in dieser

Region, insbesondere unter dem durch den anthropogenen Klimawandel sukzessive schwindenden arktischen Eis, vermutet werden.⁵⁸ Diese Vorkommen befinden sich größtenteils in extraterritorialen Gebieten, die gemäß des Internationalen Seerechtsübereinkommens der Vereinten Nationen (UN Convention on the Law Of the Sea – UNCLOS) zur ausschließlichen Wirtschaftszone der fünf Arktis-Anrainerstaaten Russland, USA, Kanada, Dänemark (inkl. Grönland) und Norwegen gehören und in enger Abstimmung mit dem Arktischen Rat bewirtschaftet werden, welchem auch Finnland, Island, Schweden sowie die Färöern angehören.

Angesichts großer Befürchtungen in den 1970er-Jahren über zur Neige gehende Industrierohstoffe und eines daraus resultierenden internationalen Wettlaufs um die Erschließung reichhaltiger Rohstoffvorkommen in den Meeren durch die Industrieländer wurde 1982 durch die Vereinten Nationen das o. g. Seerechtsübereinkommen abgeschlossen. Seither regelt das internationale Seerecht, vertreten durch die 1994 gegründete internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority – ISA) mit Sitz in Kingston, Jamaika, hoheitlich die Vergabe von Konzessionen für Exploration und den potenziellen Abbau von Rohstoffvorkommen aus der Tiefsee und verwaltet somit den marinen Bergbau außerhalb der ausschließlichen Wirtschaftszone. Innerhalb dieser Zone sowie im Bereich von darüber hinausragenden Festlandsockeln besitzen die Staaten grundsätzlich die Möglichkeit des Zugriffs auf darin befindliche Rohstoffvorkommen.⁵⁹ Nach Artikel 136 des Seerechtsübereinkommens gelten das Gebiet sowie dessen Ressourcen, die sich außerhalb der ausschließlichen Wirtschaftszone befinden, als gemeinsames Erbe der Menschheit. Dieses Gebiet, genannt »The Area«, umfasst ca. 50 Prozent der Weltmeere und untersteht somit der internationalen Gesetzgebung durch die Vereinten Nationen.

Insbesondere der Tiefseebergbau in »The Area« ist in den vergangenen Jahren wieder verstärkt in den Fokus des internationalen Interesses gerückt, um die Versorgung mit strategischen Rohstoffen zukünftig geopolitisch sicherer zu gestalten. Dies gilt vor allem für Staaten, die nicht über ausgiebige Rohstoffreserven verfügen.⁶⁰ Zwar gilt der Meeresboden bereits als wichtige Quelle zahlreicher Rohstoffe, u. a. werden Erdöl und

Erdgas, sowie Sand und Kies, Diamanten, Zinn, Titan und Gold entlang der Küsten Afrikas, Asiens und Australiens seit vielen Jahren erfolgreich abgebaut, diese ozeanische Förderung beschränkt sich hierbei jedoch meist auf küstennahe Gebiete sowie die Regionen der entsprechend zugehörigen Festlandssockel. In naher Zukunft könnte jedoch die Gewinnung von weiteren, für die Hightech-Industrie relevanten metallischen Rohstoffen hinzukommen, die aus der Tiefsee gefördert werden sollen.^{6.1} Betrachtet man das wirtschaftliche Potenzial von metallischen Rohstoffen in der Tiefsee, so sind vor allem drei Lagerstättentypen von besonderem Interesse: Manganknollen, kobaltreiche Eisen-Mangan-Krusten und Massivsulfide.^{6.2} Diese unterscheiden sich jedoch deutlich hinsichtlich ihrer geophysikalischen Eigenschaften sowie ihrer geografischen Verbreitung.

Manganknollen sind vor allem auf Tiefseeebenen älterer ozeanischer Kruste jenseits von 3.000 Metern unter der Wasseroberfläche zu finden. Hierbei handelt es sich i. d. R. um mehrere Zentimeter durchmessende Mineralanreicherungen, die große Bereiche des Tiefseebodens bedecken und neben Mangan vor allem Eisen, Kupfer, Nickel und Kobalt sowie Molybdän, Zink und Lithium enthalten. Die größte und wirtschaftlich bedeutendste Ansammlung an Manganknollen befindet sich im östlichen pazifischen Ozean zwischen Hawaii und Mexiko, in der sogenannten »Clarion-Clipperton Zone (CCZ)«, ein Gebiet in der Größenordnung Europas. Darüber hinaus sind im Peru-Becken, im Penrhyn-Becken (südwestlich der CCZ) und im Indischen Ozean ebenfalls wirtschaftlich interessante Knollengebiete entdeckt worden. Es gilt jedoch als sehr wahrscheinlich, dass es auch in anderen Teilen der Weltozeane Manganknollenfelder von wirtschaftlicher Bedeutung geben könnte.^{6.3} Allein die metallischen Vorkommen in der CCZ belaufen sich Schätzungen zufolge auf etwa zehnmal mehr Mangan als in aktuell bekannten Lagerstätten an Land. Die Kupfer- und Wolframgehalte entsprechen ca. einem Drittel der globalen Reserven an Land, im Falle von Vanadium sind dies bereits etwa 50 Prozent der terrestrischen Weltreserven, und die Nickel- und Vanadiumvorkommen übersteigen aktuelle Reserven um das Dreieinhalb- bzw. Sechsfache. Die Thalliumvorkommen der CCZ übersteigen die wirtschaftlich nutzbaren Landlagerstätten sogar um das 6.000-Fache. Obwohl bereits mehrere

Staaten und Bergbauunternehmen diese Vorkommen genauer explorieren, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht absehbar, ob und wie viel der dort vorhandenen Metallvorkommen künftig aus Manganknollen tatsächlich gewonnen werden können.^{6 4}

Im Gegensatz zu den Manganknollen lassen sich kobaltreiche Eisen-Mangan-Krusten überwiegend an den Flanken submariner Gebirgszüge und sedimentfreier Vulkanhänge in Tiefen zwischen 1.000 und 3.000 Metern finden. Wirtschaftlich interessante Krustendicken von mehreren Zentimetern werden überwiegend im westlichen Pazifik vermutet, da dieses Gebiet zu den ältesten Ozeanregionen der Welt zählt und sich somit über lange Zeiträume Mineralkrusten mit höheren Konzentrationen an Kobalt, Nickel, Tellur, Molybdän und sogar Platin und Elemente der Seltenen Erden bilden konnten.^{6 5} Besonders ergiebige Krustenareale finden sich nach aktuellem Wissensstand in der sogenannten Primären Krustenzone (PCZ) des Westpazifiks. Vergleicht man die dort geschätzten Metallvorkommen mit terrestrischen Landlagerstätten und dem Manganknollengebiet in der CCZ, so sind dort vor allem die Kobalt-, Tellur- und Arsenvorkommen vergleichsweise groß und übertreffen die Reserven sowohl der Landlagerstätten als auch der CCZ um ein Vielfaches.^{6 6} Darüber hinaus stellen sogenannte Massivsulfide eine weitere vielversprechende marine Rohstoffquelle dar. Sie bilden sich vorwiegend an vulkanisch aktiven Spreizungszentren, die für die Bildung neuer Meeresböden verantwortlich sind, sowie an den Austrittsstellen heißer Quellen in vulkanisch aktiven Meeresgebieten. Die für einen zukünftig potenziellen Abbau infrage kommenden Vorkommen befinden sich u. a. an den Mittelozeanischen Rücken des Atlantiks und des Indischen Ozeans.^{6 7} Je nach Region und Genese enthalten die Massivsulfide unterschiedliche Anteile an Kupfer, Zink, Blei, Gold und Silber sowie zahlreiche industriell bedeutende Spurenmetalle wie Indium, Germanium, Tellur oder Selen.^{6 8}

Die Tiefsee stellt somit ein vergleichsweise enormes Ressourcenpotenzial dar, dessen Abbau jedoch gleichsam große ökologische Risiken birgt, welche mit den Forderungen nach einem nachhaltigen Bergbau aktuell nicht vereinbar sind. Denn für einen submarinen Abbau sind Maschinen erforderlich, die metallhaltige Mineralansammlungen vom ozeanischen

Untergrund abtrennen können. Hierbei gilt es Verfahren zu entwickeln, die möglichst schonend eingesetzt werden können, um die Auswirkungen des Meeresbergbaus auf die dortigen Ökosysteme gering zu halten. Denn die rohstoffreichen Gebiete weisen in verschiedenen Regionen der Weltmeere eine unterschiedliche, in Bezug auf menschliche Eingriffe hoch sensible Flora und Fauna auf. Dies ist auch der Grund dafür, dass die Generalversammlung der Vereinten Nationen die Staaten zu Maßnahmen verpflichtet hat, um einer Schädigung von Lebensräumen und gefährdeten Arten durch die Hochseefischerei, die ebenfalls vergleichbare intensive Auswirkungen auf marine Ökosysteme zur Folge hat, möglichst zu verhindern.⁶⁹ So haben jüngste Forschungen gezeigt, dass der Tiefseebergbau durch die Umwälzung des Meeresbodens, durch starke Vibrationen oder Veränderungen der Lichtverhältnisse viele negative Auswirkungen auf die Ökosysteme der Tiefsee haben kann, einschließlich des Verlusts von Lebensraum und biologischer Vielfalt.⁷⁰ Ähnlich wie die Auswirkungen auf Süßwasserlebensräume können auch potenzielle Verunreinigungen durch Einleitungen, Veränderungen des Sedimentregimes und des lokalen Mikroklimas die biologische Vielfalt und die Ökosystemleistungen teilweise irreversibel beeinträchtigen,⁷¹ sodass kurzfristige sozioökonomische Interessen langfristigen Umweltzerstörungen gegenüberstehen. Obwohl bislang nur unzureichende wissenschaftlichen Daten und Erkenntnisse zur Verfügung stehen, um die Auswirkungen des Tiefseebergbaus auf marine Lebensräume angemessen bewerten zu können, so sind die Folgen mariner Forschungsprojekte zur Erprobung von Tiefseebergbauverfahren selbst nach 40 Jahren auf dem Meeresboden immer noch deutlich zu erkennen. Sowohl die Ökosystemfunktionen als auch die mikrobielle Produktivität sind in diesen Arealen nach wie vor stark reduziert und die ursprünglichen Populationsdichten sowie die Zusammensetzung lokaler Faunengemeinschaften stark verringert.⁷²

Zwar findet bislang noch kein Tiefseebergbau statt, doch werden bereits Lizenzen zur Exploration und Erprobung von Tiefseebergbaumethoden vergeben.⁷³ Zudem entwickelt die Internationale Meeresbodenbehörde einen sogenannten »Mining Codex«, der Vorschriften über einzuhaltende Umweltstandards und Grenzwerte sowie standardisierte Verfah-

ren der Umweltüberwachung beim Abbau von Erzen am Meeresboden in »The Area« enthalten soll.⁷⁴ Allerdings stehen die Entwicklung und verbindliche Einführung eines solchen »Mining Codex« und somit eine Governance des Tiefseebergbaus vor zahlreichen komplexen Herausforderungen, insbesondere um Fragen der Nachhaltigkeit auf marine Areale übertragen zu können. Denn wie bei anderen Industriezweigen sind auch hier wichtige politische Fragen, ob und aus welchen Gründen, an welcher Stelle und in welcher Form der Tiefseebergbau genehmigt oder sogar gefördert werden soll und wer die Haftung für ökologische Schadensfälle trägt, zu berücksichtigen. Diese Entscheidungsgrundlagen und Regelungen müssen nun in außerterritorialen Gebieten Anwendung finden. Damit jedoch ein wirksamer Schutz der Meeresumwelt vor schädlichen Auswirkungen gewährleistet ist, muss der Abbau von Bodenschätzen in der Tiefsee nach internationalem Seerecht (UNCLOS) und in Anlehnung an SDG 14 (Ozeane, Meere und Meeresressourcen im Sinne nachhaltiger Entwicklung erhalten und nachhaltig nutzen) geregelt werden. Dennoch erschwert die Abgelegenheit der Gebiete, in denen Tiefseebergbau zukünftig betrieben werden könnte, die Überwachung und Notfallmaßnahmen in erheblichem Maße.⁷⁵ Ferner gilt es die sozialen Auswirkungen des Tiefseebergbaus zu berücksichtigen. Lokale Gemeinschaften in Ländern wie Papua-Neuguinea setzen sich beispielsweise für ein Verbot des marinen Bergbaus ein, da sie befürchten, dass der Tiefseebergbau ihre Nahrungsressourcen und ihren Lebensunterhalt gefährdet.⁷⁶ Der Fall des Tiefseebergbaus und die Bedenken über seine vielfältigen Auswirkungen unterstreichen somit die Bedeutung eines wirksamen und transparenten internationalen Governance-Systems für die Ressourcengewinnung, das Wissenschaft und Politik effektiv miteinander verbindet und Anforderungen an eine nachhaltige Entwicklung bestmöglich einbindet.⁷⁷

Sollte also in Zukunft ein Abbau von Rohstoffen in der Tiefsee gemäß möglichst nachhaltiger Vorgaben beginnen können, so würde dies nicht nur eine neue Etappe in der Ausweitung des Ressourcenextraktivismus, sondern auch eine neue Phase der Rohstoffgewinnung des Anthropozäns einleiten. Gleichzeitig bestünde für eine Vielzahl von metallischen Rohstoffen auch die Aussicht auf eine erneute Steigerung der Verfügbarkeit

und somit deren Reichweiten. Hinzu käme der Umstand, dass die bislang durch den 1998 in Kraft getretenen Antarktisvertrag geschützte »Schatzkammer im ewigen Eis des Südens«, die Antarktis, ebenfalls in das Visier einer weltweit steigenden Rohstoffnachfrage gerät. Denn 50 Jahre nach Einführung des antarktischen Umweltschutzprotokolls, welches jegliche Aktivitäten eines kommerziellen Bergbaus untersagt, sind Neuverhandlungen vorgesehen, die das bislang absolute Bergbauverbot zur Disposition stellen könnten. Derweil werden weiterhin viele Rohstoffe in den weltweit anwachsenden Städten akkumuliert, die im Sinne eines anthropogenen Lagers der Technosphäre als Bergwerke der Zukunft angesehen werden können. Somit bestünde die Möglichkeit, die ganze Palette an benötigten Rohstoffen in großen Mengen durch ein »Urban Mining« bereitzustellen.⁷⁸ Daher stellt sich grundsätzlich die Frage, wie dieses bereits bestehenden »anthropogenen Lager«, wie kreislauffähige Rohstoffpotenziale auch bezeichnet werden, stärker ressourcenstrategisch in Wert gesetzt werden können und somit eine zunehmende Abkehr von der nach wie vor linear ausgerichteten Rohstoffwirtschaft in Richtung einer kreislauforientierten und bestenfalls nachhaltigen Ressourcennutzung gelingen kann. Denn die angedeuteten Optionen einer Erweiterung des Rohstoffabbaus zeigen, dass zwar eine Reihe von technischen Optionen der Rohstoffbereitstellung bestehen, diese jedoch mit einer Vielzahl unvorhersehbarer Risiken verbunden sind. Ferner mehren sich wissenschaftliche Stimmen und Studien, die einer Ausweitung des Bergbaus in bislang unberührte Gefilde, wie etwa die Tiefsee, aufgrund wirtschaftlicher Ansprüche nicht nur äußerst kritisch gegenüberstehen, sondern zudem darauf hinweisen, dass der zukünftige Bedarf an Rohstoffen selbst bei den ehrgeizigsten Szenarien für erneuerbare Energien und des Klimaschutzes ohne einen erweiterten Abbau in der Tiefsee oder die Erschließung von Depositen in zirkumpolaren Regionen durchaus gedeckt werden könnte.⁷⁹ Allenfalls für strategische »Gewürzmetalle«, wie etwa Indium, Ruthenium, Dysprosium, Terbium oder Scandium, scheinen Knappheitsszenarien nicht gänzlich unwahrscheinlich zu sein.⁸⁰

All diese skizzierten Entwicklungen lassen derzeit den Schluss zu, dass eine physische Rohstoffverknappung aufgrund der zahlreichen bekannten

und potenziell zu erschließenden Vorkommen, neuer Extraktionsverfahren sowie zunehmend etablierter Strategien einer Circular Economy, bis hin zu ressourceneffizienteren, suffizienteren und letztlich resilienteren Wirtschaftsmodellen, in vielen Fällen (noch) nicht abzusehen ist. Hierbei ist allenfalls von einem weiteren Hinauszögern des Peak-Oil, Peak-Metal usw. auf eine unbestimmte Zeitperiode in die Zukunft auszugehen, wenngleich eine marktspezifische und somit temporäre Verknappung, u. a. aus geopolitischen Gründen, zumindest für einzelne Rohstoffsegmente auch in Zukunft nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann. Somit definieren nicht mehr begrenzte Reichweiten »endlicher« Ressourcen die Grenzen des Wachstums, sondern vor allem die Begleitimplikationen ökologischer und sozialer Art, wie etwa die weitere Verschärfung des anthropogenen Klimawandels oder die irreversible Zerstörung ozeanischer Ökosysteme. Dies erfordert wiederum neue Formen der Governance in politischen und rechtlichen Bereichen, für die bislang nur bedingt Erfahrungen vorliegen. Und selbst der Blick in die ferne Zukunft offenbart ganz neue Dimensionen des Ressourcenextraktivismus: Denn werden Konzepte eines extraterrestrischen Bergbaus zur Versorgung der irdischen Wirtschaft wie auch für eine anzustrebende Eigenversorgung von zukünftigen Außenposten der Menschheit auf anderen Himmelskörpern tatsächlich einmal Realität,⁸¹ wie dies Planungskonzepte internationaler Raumfahrtagenturen und privater Raumfahrtunternehmen bereits andeuten, so würde dies die »Grenzen des Wachstums« nochmal in einem gänzlich anderen Licht erscheinen lassen. Ist das Anthropozän also eine Ära des potenziellen Überflusses, in welcher nicht die eigentliche Knappheit von Rohstoffen, sondern die herausfordernden Begleitimplikationen das Nadelöhr wirtschaftlicher Entwicklung darstellen? Eine Frage, die vielleicht erst in den nächsten Jahrzehnten oder darüber hinaus rückblickend beantwortet werden kann.

Anmerkungen

- 1 Vgl. Achzet et al. (2010): Strategien für einen verantwortlichen Umgang mit Metallen; Krohns et al. (2011): The Route to Resource-Efficient Novel Materials.
- 2 Reller et al. (2009): The Mobile Phone: Powerful Communicator and Potential Metal Dissipator, S. 131.
- 3 Vgl. Gandenberger et al. (2012): Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen.
- 4 Vgl. Tost et al. (2018): Metal Mining's Environmental Pressures; Mudd (2010): The Environmental sustainability of mining in Australia.
- 5 Oberle et al. (2019): Global Resources Outlook 2019, S. 8.
- 6 Vgl. stellv. Meißner (2021): The Impact of Metal Mining on Global Water Stress and Regional Carrying Capacities.
- 7 Harnischmacher (2015): Relief aus Menschenhand, 8 (basierend auf Hook 2000).
- 8 Fisher/Hirschfeld (2020): The scarred landscapes created by humanity's material thirst.
- 9 Vgl. Harnischmacher (2015): Relief aus Menschenhand.
- 10 Ayuk et al. (2020): Mineral resource governance in the 21st century, S. 229 ff.
- 11 Vgl. EU (2011): Tackling the Challenges in Commodity Markets and on Raw Materials; EU (2020): Critical Raw Materials Resilience; BMWi (2019): Rohstoffstrategie der Bundesregierung, etc.
- 12 Vgl. Johannsen (1925): Biringuccios Pirotechnia.
- 13 Ibid. (1925).
- 14 Agricola (1556): De Re Metallica Libri XII, S. 3.
- 15 Ibid. (1556): S. 31.
- 16 Ibid.(1556): S. 6.
- 17 Vgl. Navius (1485): Iudicium Iovis oder Das Gericht der Götter über den Bergbau.
- 18 Agricola (1556): De Re Metallica Libri XII, S. 32.
- 19 Ziesemer (2012): Eine ressourcenökonomische Perspektive auf den Abbau erschöpflicher Ressourcen, S. 89–90.
- 20 Frondel et al. (2007): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen, S. 24.
- 21 Vgl. Pinchot (1911): The Fight for Conservation.
- 22 Vgl. Leith (1917): International Control of Minerals.
- 23 Vgl. Spicer (1950): Stock Piling of Strategic Materials.
- 24 Schmidt (2018): Scarcity and Environmental Impact of Mineral Resources, S. 3.
- 25 U. S. Senate (1949): Mineral Resources Development.
- 26 Ibid. (1949): S. 30; S. 34.
- 27 Baic/Clostermann (2016): Ist Peak Oil Geschichte, S. 7.
- 28 Schmidt (2019): Scarcity and Environmental Impact of Mineral Resources, S. 4.
- 29 Meadows et al. (1972): The Limits to Growth, S. 45.
- 30 Frondel (2007): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen, S. 15.

- 31 Vgl. BGR (2020): Energiestudie 2019, S. 81 ff.
- 32 Meadows et al. (1972): *The Limits to Growth*, S. 46–49.
- 33 USGS (2021): *Mineral Commodity Summaries 2021*, S. 70f, S. 124f, S. 150f.
- 34 BGR (2020): Energiestudie 2019, S. 96–97.
- 35 Vgl. Gandenberger et al. (2012): Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen; Achzet/Helbig (2013): How to evaluate raw material supply risks; Schrijvers et al. (2020): A review of methods and data to determine raw material criticality.
- 36 Ziesemer (2013): Eine ressourcenökonomische Perspektive auf den Abbau erschöpflicher Ressourcen, S. 89.
- 37 Ibid. (2013): S. 90.
- 38 S&P (2019): SNL Metals & Mining Database.
- 39 Frondel (2007): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen, S. 24.
- 40 Meadows et al. (1972): *The Limits to Growth*, S. 166.
- 41 Frondel (2007): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen, S. 26.
- 42 Vgl. Skinner (1976): *A Second Iron Age Ahead*.
- 43 Wäger et al. (2010): Rohstoffe für Zukunftstechnologien, S. 10.
- 44 Haas/Schlesinger (2007): Umweltökonomie und Ressourcenmanagement, S. 78.
- 45 Ziesemer (2013): Eine ressourcenökonomische Perspektive auf den Abbau erschöpflicher Ressourcen, S. 91.
- 46 Vgl. Mudd (2009): The Sustainability of Mining, in: Australia; McLellan et al. (2010): Critical Minerals and Energy – Impacts and Limitations; Dehoust et al. (2017): Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung, S. 50.
- 47 Vgl. Mudd (2007): Gold mining in Australia; Mudd (2009): The Sustainability of Mining in Australia; Mudd (2010): The Environmental sustainability of mining in Australia; Spitz/Trudinger (2009): Mining and the Environment; Tost et al. (2018): Metal Mining's Environmental Pressures.
- 48 Gäth/Meißner (2013): Ressourcenschonung durch innovative Recycling- und Kreislaufkonzepte, S. 121–122.
- 49 Vgl. Neumayer (2000): *The Economics of Natural Resource Availability*.
- 50 BGR (2012): Energiestudie 2012, S. 86.
- 51 Meißner (2013): Ressourcengeographie, S. 49; BGR (2020): Energiestudie 2019, S. 81 ff.
- 52 Graedel et al. (2011): *Recycling Rates of Metals*, S. 18.
- 53 Faulstich et al. (2012): *Umweltgutachten 2012 des SRU*, S. 33.
- 54 Vgl. Meißner (2017): Globale Rohstoffumbrüche erfordern Umdenken.
- 55 Oberle (2019): *Global Resources Outlook 2019*, S. 101.
- 56 Ayuk et al. (2020): *Mineral resource governance in the 21st century*, S. 6ff.
- 57 Oberle (2019): *Global Resources Outlook 2019*, S. 111 ff.
- 58 Vgl. Gautier et al. (2009): *Assessment of Undiscovered Oil and Gas in the Arctic*.
- 59 Petersen et al. (2019): *Mineralische Rohstoffe aus der Tiefsee*, S. 28.
- 60 Lehmköster (2014): *Tagebau am Meeresgrund*, S. 69.
- 61 Petersen et al. (2019): *Mineralische Rohstoffe aus der Tiefsee*, S. 3.

- 62 Jorzik (2018): Metalle aus dem Meer für unsere High-Tech-Gesellschaft, S. 26.
- 63 Ibid. (2018): S. 26.
- 64 Lehmköster (2014): Tagebau am Meeresgrund, S. 67.
- 65 Jorzik (2018): Metalle aus dem Meer für unsere High-Tech-Gesellschaft, S. 26.
- 66 Lehmköster (2014): Tagebau am Meeresgrund, S. 75.
- 67 Jorzik (2018): Metalle aus dem Meer für unsere High-Tech-Gesellschaft, S. 26.
- 68 Lehmköster (2014): Tagebau am Meeresgrund, S. 69.
- 69 Ayuk et al. (2020): Mineral resource governance in the 21st century, S. 122.
- 70 van Dover et al. (2017): Biodiversity loss from deep-sea mining, S. 464.
- 71 Ayuk et al. (2020): Mineral resource governance in the 21st century, S. 137.
- 72 Jorzik et al. (2018): Metalle aus dem Meer für unsere High-Tech-Gesellschaft, S. 43.
- 73 Petersen et al. (2019): Mineralische Rohstoffe aus der Tiefsee, S. 37.
- 74 Ibid. (2019): S. 28.
- 75 Ali et al. (2017): Sustainable Mineral Sourcing Requires International Action, S. 370.
- 76 Ayuk et al. (2020): Mineral resource governance in the 21st century, S. 186.
- 77 Ibid. (2020): S. 187.
- 78 Vgl. Swilling et al. (2018): Resource Requirements of Future Urbanization; Ciacci et al. (2017): Urban Mines of Copper: Size and Potential for Recycling in the EU.
- 79 Teske et al. (2016): Renewable Energy and Deep Sea Mining, 37; Ayuk et al. (2020): Mineral resource governance in the 21st century, S. 186.
- 80 Vgl. Marscheider-Weidemann et al. (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien; Huisman et al. (2020): Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU.
- 81 Vgl. Hall (2021): NASA's blueprint for space mining.

Literatur

- Achzet, Benjamin / Helbig, Christoph (2013): How to evaluate raw material supply risks – an overview, in: Resources Policy, 38(4), S. 435–447, doi:10.1016/j.resourpol.2013.06.003.
- Achzet, Benjamin et al. (2010): Strategien für einen verantwortlichen Umgang mit Metallen und deren Ressourcen, in: Chemie Ingenieur Technik, 82(11), S. 1919–1924, doi: 10.1002/cite.201000144.
- Agricola, Georgius (1556): De Re Metallica Libri XII, unveränderter Nachdruck der Ausgabe Berlin von 1928, 5. Auflage, 2021, Matrix-Verlag, Wiesbaden.
- Ali, Saleem H. / Giurco, Damien / Arndt, Nicholas et al. (2017): Sustainable Mineral Sourcing Requires International Action, in: Nature, 543, S. 367–372, doi: 10.1038/nature21359.
- Ayuk, Elias T. et al. (2020): Mineral resource governance in the 21st century. Gearing extractive industries towards sustainable development. International Resource Panel (IRP) of the United Nations Environment Programme, Nairobi.

- Baic, Boris/Clostermann, Jörg (2016): Ist Peak Oil Geschichte? Heft Nr. 39 aus der Reihe »Arbeitsberichte – Working Papers«. Technische Hochschule Ingolstadt, Ingolstadt.
- Barnett, Harold J./Morse, Candler (1963): *Scarcity and Growth: The Economics of Natural Resource Availability*, John Hopkins Press, Baltimore.
- Bleicher, Alena et al. (2017): Rohstoffgewinnung und Technologieentwicklung in Deutschland im Wandel – Sozialwissenschaftliche Perspektiven, UFZ-Bericht, 05/2017, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) (Hrsg.), Leipzig.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hrsg.) (2012): *Energiestudie 2012 Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen*, Hannover.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hrsg.) (2020): *BGR Energiestudie 2019 – Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung*, Hannover.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2019): *Rohstoffstrategie der Bundesregierung Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen*, Berlin.
- Calvo, Guiomar et al. (2016): Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality?, in: *Resources*, 5(4), 36, S. 1–14, doi:10.3390/resources5040036.
- Ciacci, Luca/Vassura, Ivano/Passarini, Fabrizio (2018): Urban Mines of Copper: Size and Potential for Recycling in the EU, in: *Resources*, 6(1), 6, S. 1–14, doi:10.3390/resources6010006.
- Dehoust, Günter et al. (2017): Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I), Dessau-Roßlau.
- Ehrlich, Paul R. (1968): *The Population Bomb*, Sierra Club, San Francisco.
- European Commission (EC) (2011): *Tackling the Challenges in Commodity Markets and on Raw Materials*, Brüssel.
- European Commission (EC) (2020): *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*, Brüssel.
- Faustich, Martin et al. (2012): Verantwortung in einer begrenzten Welt. Umweltgutachten 2012 des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU), Erich Schmidt-Verlag, Berlin.
- Fisher, Richard/Hirschfeld, Javier (2020): The scarred landscapes created by humanity's material thirst [https://www.bbc.com/future/article/2021117-mining-and-anthropocene-landscapes (zuletzt aufgerufen am 01.07.2022)].
- Frondel, Manuel et al. (2007): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Essen.
- Gäth, Stefan/Meißner, Simon (2013): Ressourcenschonung durch innovative Recycling- und Kreislaufkonzepte, in: Reller, Armin/Marschall, Luitgart/Meißner, Simon/Schmidt, Claudia (Hrsg.): *Ressourcenstrategien. Eine Einführung in den nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, S. 105–122.
- Gandenberger, Carsten et al. (2012): *Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien – Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie. TAB-Arbeitsbericht Nr. 150. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag*, Berlin, 226 Seiten, doi:10.5445/TR/100008570.
- Gautier, Donald L. et al. (2009): Assessment of Undiscovered Oil and Gas in the Arctic, in: *Science*, 324(5931), S. 1175–1179, doi: 10.1126/science.1169467.

- Graedel, Thomas E. et al. (2011): Recycling Rates of Metals – A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, United Nations Environment Programme (UNEP) (Hrsg.), ohne Ortsangabe.
- Haas, Hans-Dieter/Schlesinger, Dieter M. (2007): Umweltökonomie und Ressourcenmanagement, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Hall, Matthew (2021): In space, no one can hear you mine: NASA's blueprint for space mining, in: Mining Technology, June 9, 2021 [<https://www.mining-technology.com/features/in-space-no-one-can-hear-you-mine-nasas-blueprint-for-space-mining/>].
- Harnischmacher, Stefan (2015): Relief aus Menschenhand, in: Praxis Geographie, 1/2015, S. 4–9
- Hook, Roger (2000): On the history of humans as geomorphic agents, in: Geology, 28(9); S. 843–846, doi: 10.1130/0091-7613(2000)28<843:O THOHA>2.0.CO;2
- Huisman, J./Pavel, C. et al. (2020): Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. A Foresight Study, ohne Ortsangabe, doi: 10.2873/58081.
- Johannsen, Otto (1925): Biringuccios Pirotechnia: ein Lehrbuch der chemisch-metallurgischen Technologie und des Artilleriewesens aus dem 16. Jahrhundert, Vieweg, Braunschweig.
- Jorzik, Oliver/Kandarr, Jana/Klinghammer, Pia (2018): ESKP-Themenspezial Rohstoffe in der Tiefsee. Metalle aus dem Meer für unsere High-Tech-Gesellschaft, Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ (Hrsg.), Potsdam, doi: 10.2312/eskp.20182
- Krohns, Stephan et al. (2011): The Route to Resource-Efficient Novel Materials, in: Nature Materials 10(12), S. 899–901. doi: 10.1038/nmat3180.
- Lehmköster, Jan (2014): Tagebau am Meeresgrund, in: Lehmköster, Jan (Hrsg.): World Ocean Review 3 – WOR3, Rohstoffe aus dem Meer – Chancen und Risiken, Maribus, Hamburg, S. 52–93.
- Leith, Charles K. (1917): International Control of Minerals, in: McCaskey, H. D. (Hrsg.): Mineral Resources of the United States, Government Printing Office, Washington, S. 7–17.
- Marscheider-Weidemann, Frank/Langkau, Sabine/Baur, Sarah-Jane et al. (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021 – DERA Rohstoffinformationen 50, Berlin.
- McLellan, B. (2016): Critical Minerals and Energy – Impacts and Limitations of Moving to Unconventional Resources, in: Resources 5(2), 19, S. 1–40, doi:10.3390/resources502019
- Meadows, Donella H./Meadows, Dennis L./Randers, Jorgen/Behrens III, William W. (1972): The Limits to Growth, Universe Books, New York.
- Meinert, Lawrence D./Robinson, Gilpin R./Nassar, Nedat T. (2016): Mineral Resources: Reserves, Peak Production and the Future, in: Resources 5(1), 14, S. 1–14, doi:10.3390/resources5010014.
- Meißner, Simon (2013): Ressourcengeographie: Eine Einführung, in: Reller, Armin/Marschall, Luitgart/Meißner, Simon/Schmidt, Claudia (Hrsg.): Ressourcenstrategien. Eine Einführung in den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Meißner, Simon (2017): Globale Rohstoffumbrüche erfordern Umdenken, in: Umwelt-Dialog. Wirtschaft. Verantwortung. Nachhaltigkeit, 7(05/2017), Macondo, Münster, S. 28–33.

- Meißner, Simon (2021): The Impact of Metal Mining on Global Water Stress and Regional Carrying Capacities—A GIS-Based Water Impact Assessment, in: *Resources, Special Issue Economic, Environmental and Social Assessment of Raw Materials for a Green and Resilient Economy*, 10(12), 120, doi: 10.3390/resources10120120.
- Moreau, Vincent/Dos Reis, Piero/Vuille, Francois (2019): Enough Metals? Resource Constraints to Supply a Fully Renewable Energy System, in: *Resources*, 8(1), 29, doi:10.3390/resources8010029
- Mudd, Gavin M. (2007): Gold mining in Australia: linking historical trends and environmental and resource sustainability, in: *Environmental Science & Policy*, 10(7–8), S. 629–644, doi:10.1016/j.envsci.2007.04.006.
- Mudd, Gavin M. (2009): The Sustainability of Mining in Australia: Key Production Trends and Their Environmental Implications for the Future, Research Report No. RR5, Department of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute, Melbourne.
- Mudd, Gavin M. (2010): The Environmental sustainability of mining in Australia: key megatrends and looming constraints, in: *Resources Policy*, 35(2), S. 98–115, doi:10.1016/j.resourpol.2009.12.001.
- Neumayer, Eric (2000): Scarce or Abundant? The Economics of Natural Resource Availability, in: *Journal of Economic Surveys*, 14(3), S. 307–335, doi:10.1111/1467-641900112
- Niavis, Paulus (1485): Iudicium Iovis oder Das Gericht der Götter über den Bergbau. Ein literarisches Dokument aus der Frühzeit des deutschen Bergbaus, in: *Freiburger Forschungshefte D3*, Akademie-Verlag, Berlin, 1953.
- Oberle, Bruno et al. (2019): Global Resources Outlook 2019 Natural Resources for the Future We Want, International Resource Panel (IRP) of the United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi.
- Petersen, Sven/Haackel, Matthias/Steffen, Jan (2019): Mineralische Rohstoffe aus der Tiefsee Entstehung, Potential und Risiken, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Kiel.
- Pinchot, Gifford (1911): *The Fight for Conservation*, Doubleday, Page & Company, New York.
- Reller, Armin et al. (2009): The Mobile Phone: Powerful Communicator and Potential Metal Dissipator, in: *GAIA*, 18(2), S. 127–135, doi:10.14512/gai a.18210.
- Rötzer, Nadine/Schmidt, Mario (2018): Decreasing Metal Ore Grades – I the Fear of Resource Depletion Justified?, in: *Resources*, 7(4), 88, S. 1–14, doi:10.3390/resources7040088.
- S&P Global Market Intelligence (S&P) (2019): SNL Metals & Mining Database, Essential Mining Industry Data with Actionable Insights. 2019 (verfügbar unter: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/solutions/metals-and-mining>)
- Schmidt, M. (2019): Scarcity and Environmental Impact of Mineral Resources – A Old and Never-Ending Discussion, in: *Resources*, 8(1), 2, S. 1–12, doi:10.3390/resources8010002
- Schrijvers, D. et al. (2020): A review of methods and data to determine raw material criticality, in: *Resources, Conservation & Recycling*, 155, S. 104617, doi:10.1016/j.resconrec.2019.104617.
- Skinner, Brian J. (1976): A Second Iron Age Ahead?, in: *American Scientist*, 65(3), S. 258–269
- Spicer, Lucille G. (1950): *Stock Piling of Strategic Materials*, Master's Thesis, Boston University, Boston.

- Spitz, Karlheinz/Trudinger, John (2009): *Mining and the Environment. From Ore to Metal*, CRC Press Taylor & Francis, London.
- Swilling, Mark et al. (2018): *The Weight of Cities: Resource Requirements of Future Urbanization*. International Resource Panel (IRP) of the United Nations Environment Programme, Nairobi.
- Teske, Sven/Florin, Nick/Dominish, Elsa et al. (2016): *Renewable Energy and Deep Sea Mining: Supply, Demand and Scenarios*. Report prepared by ISF for J. M. Kaplan Fund, Oceans 5 and Synchronicity Earth, July 2016. University of Technology, Sydney.
- Tost, M. et al. (2018): *Metal Mining's Environmental Pressures: A Review and Updated Estimates on CO₂ Emissions, Water Use, and Land Requirements*, in: *Sustainability*, 10(8), S. 1–14, doi:10.3390/s110082881.
- U. S. Geological Survey (USGS) (Hrsg.) (2021): *Mineral Commodity Summaries 2021*. Reston, doi: 10.3133/mcs2021.
- U. S. Senate (1949): *Mineral Resources Development. Hearings before the Committee on Interior and Insular Affairs*, U. S. Senate, Washington. (<https://hdl.handle.net/2027/uiug.3011211983486>).
- Van Dover, Cindy L./Ardron, Jeff A./Escobar, Elva et al. (2017): *Biodiversity loss from deep-sea mining*, in: *Nature Geoscience*, 10, S. 464–465, doi: 10.1038/ngeo2983.
- Wäger, Patrick et al. (2010): *Seltene Metalle. Rohstoffe für Zukunftstechnologien*. SATW Schrift Nr. 41, Seltene Metalle, Zürich.
- Ziesemer, Thomas (2013): *Wie viel Kuchen für wie lange? Eine ressourcenökonomische Perspektive auf den Abbau erschöpflicher Ressourcen*, in: Reller, Armin/Marschall, Luitgard/Meißner, Simon/Schmidt, Claudia (Hrsg.): *Ressourcenstrategien. Eine Einführung in den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.