



IST DIE DEUTSCHE RESSOURCENSTRATEGIE RESILIENT?

BERGBAU
VERHÜTTUNG
RECYCLING



Impressum

IST DIE DEUTSCHE RESSOURCENSTRATEGIE RESILIENT?

Bergbau – Verhüttung – Recycling

Autoren

Prof. Dr. Christoph Hilgers, Prof. Dr. Jochen Kolb, Dr. Ivy Becker

Karlsruher Institut für Technologie [KIT]

Adenauerring 20a/b, 76131 Karlsruhe

Institut für Angewandte Geowissenschaften [AGW]

Herausgeber

Dr. Christian Kühne

Geschäftsführer

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

ansässig am Karlsruher Institut für Technologie [KIT]

Hertzstraße 16, Geb. 06.36, 76187 Karlsruhe

www.thinktank-irs.de

Grafische Konzeption, Illustration, Satz

unger+ kreative strategien GmbH

www.ungerplus.de

Erscheinungsjahr

2021

DOI-Nummer

10.5445/IR/1000124406

Copyright

Wiedergaben in jeglicher Form, auch in Auszügen, müssen mit Quellenangaben gekennzeichnet werden.

Der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien ist gefördert aus Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.



Baden-Württemberg

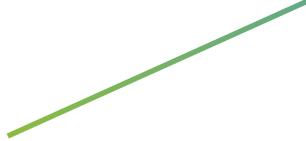
MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

IST DIE DEUTSCHE RESSOURCENSTRATEGIE RESILIENT?

BERGBAU

VERHÜTTUNG

RECYCLING



Inhaltsverzeichnis

Einleitung	7
Zusammenfassung	8
Wissenswertes und Bedenkenswertes	10
Nachfrage	12
Bevölkerungs- & Wohlstandswachstum	12
Neue Technologien	16
Versorgung	21
Exploration und Bergbau	21
Verhüttung und Raffination	29
Recycling	39
Resiliente Strategien	44
Diskussion	50
Bergbau – Verhüttung – Raffination – Recycling	51
Diversifizierungsstrategien	54
Wissensdreieck und Innovation	60
Schlussfolgerung	64
Literaturverzeichnis	66

Der Zugang zu Rohstoffen, deren effiziente Gewinnung, Nutzung und Kreislaufführung sind für eine industriell geprägte Wirtschaft von essenzieller Bedeutung. Durch eine wachsende Weltbevölkerung, intensive technologische Weiterentwicklung und voranschreitende Industrialisierung in den Schwellenländern sind die Rohstoffmärkte unter Druck gekommen. Der Weg zu einer ressourcenschonenden Industriegesellschaft bedarf deshalb einer Entwicklung, die sowohl die materiellen Bedürfnisse der Menschen als auch die ökologischen und sozialen Konsequenzen betrachtet. Dies bedarf gemeinsamer Anstrengungen von Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Zivilgesellschaft. Politik und Wirtschaft haben dazu 2018 den THINKTANK „Industrielle Ressourcenstrategien“ gegründet und am Karlsruher Institut für Technologie etabliert.

Der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien als unabhängiger Vordenker wichtiger Trends und Innovationen von technologisch-strategischen Fragestellungen auf nationaler und internationaler Ebene zur Ressourceneffizienz, -nutzung und -politik befasst sich intensiv mit dem Einsatz neuer Technologien zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs, mit der Steigerung der Ressourceneffizienz und der Resilienz der gesamten Rohstoffkette. Insbesondere der industrielle Strukturwandel, aber auch die COVID-19-Pandemie haben gezeigt, wie anfällig bestehende globale Lieferketten sein und welche Bedeutung regionale Wertschöpfungs- und Lieferketten haben können.

Die vorliegende Broschüre gibt aus wissenschaftlicher Sicht einen umfassenden und übergeordneten Einblick in die Wertschöpfungskette von Rohstoffen, indem sie ausgehend vom Bedarf und der Nachfrage durch neue Technologien auf die zentralen Prozesse der Exploration, Verhüttung, Raffination und des Recyclings eingeht und Ansätze für resiliente Strategien auch im internationalen Vergleich aufzeigt.

Mit der vorliegenden Broschüre leistet der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien einen Beitrag zum nationalen wie auch internationalen Rohstoff-Diskurs. Die Darstellung der Faktenlage kann als Grundlage für den Austausch zwischen den Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik dienen und einen guten Ausgangspunkt für einen Dialog bieten, um neue Wege für eine resiliente Rohstoffversorgung aufzuzeigen und industrielle Ressourcenstrategien zu definieren.



Prof. Dr. Thomas Hirth

Vizepräsident für Innovation und Internationales des Karlsruher Instituts für Technologie und Sprecher des THINKTANKS Industrielle Ressourcenstrategien

Der LVI als Spitzenorganisation der baden-württembergischen Industrie und industrienaher Dienstleister vertritt die überfachlichen Interessen von 37 Branchenverbänden, mehr als 100 Einzelunternehmen sowie diverser Cluster aus den Bereichen Mobilität, Luft- und Raumfahrt sowie Umwelt-/Energiewirtschaft.

Die baden-württembergische Industrie zeichnet sich durch einen sehr hohen Anteil an produzierendem Gewerbe aus. Mit 33,7 % Anteil am Bruttoinlandsprodukt nimmt sie sowohl im europäischen als auch im globalen Maßstab eine herausragende Rolle ein.

Sichere, stabile Lieferketten von Rohstoffen, Materialien und Halbzeugen sind dafür eine wesentliche Voraussetzung. Krisen, wie Kriege, Verwerfungen an den Finanz- und Warenmärkten oder – gegenwärtig gut sichtbar – Pandemien, aber auch nationale politische Entscheidungen machen die bisher gut funktionierenden globalen Lieferketten angreifbar. Die Herausforderungen wie der Strukturwandel hin zu einer klimaneutralen Industrie, wie sie im Green Deal der EU beschrieben sind, erfordern in den nächsten Jahrzehnten mehr Rohstoffe und eine breitere Vielfalt von Rohstoffen. Durch die Kreislaufwirtschaft werden wir nur einen Teil des notwendigen Ressourcenbedarfs abdecken können. Daher ist zukünftig eine resiliente, krisensichere Rohstoffversorgung nicht nur für die baden-württembergische Industrie, sondern für ganz Europa von entscheidender Bedeutung. Hier die richtigen Antworten zu finden, ist eine wichtige Aufgabe von Politik und Industrie.

Wir begrüßen daher, dass der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien dieses für die Zukunft immer bedeutsamer werdende Thema aktuell aufgreift, die Fakten zusammenstellt, die Situation analysiert und Handlungsoptionen erfasst. Diese Broschüre bildet eine gute Grundlage für Industrie und Politik, faktenbasiert Entscheidungen zu treffen und sich über notwendige Maßnahmen zu verständigen.



Senator E. h. Wolfgang Wolf

Geschäftsführendes Vorstandsmitglied des Landesverbandes der Baden-Württembergischen Industrie e. V.

Die deutsche Industrie ist auf eine sichere und wettbewerbsfähige Versorgung mit Rohstoffen angewiesen, um ressourcenschonende Technologien und Produkte liefern zu können. Salze, Metalle und viele andere Mineralien gehören ebenso zu ihrer Rohstoffbasis wie Erdöl. Zudem kommen auch nachwachsende Rohstoffe aus Biomasse und Erdgas zum Einsatz. Für die Auswahl der passenden Rohstoffe sind Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz wichtige Leitlinien der chemischen Industrie.

Neue Technologien rund um Digitalisierung, Elektromobilität, Klimaschutz und Energiewende verändern den industriellen Rohstoffbedarf stetig. Viele Zukunftstechnologien erfordern teilweise andersartige Rohstoffe. Ihre Verfügbarkeit ist damit eine zentrale Herausforderung für den Industriestandort Deutschland. Die drei Säulen zur Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung sind: Importrohstoffe, heimische Rohstoffe und Recyclingrohstoffe. Diese Säulen gilt es zu stärken. Hierfür müssen aber die Rahmenbedingungen stimmen, welche auf Basis fundierter Daten und Erkenntnisse gestaltet und weiterentwickelt werden müssen.

Die notwendigen Informationen hierfür liefert der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien, indem er das Rohstoffthema technologieunabhängig wie auch differenziert bearbeitet. Dadurch können die Entscheidungsprozesse von Politik und Industrie in geeigneter Weise unterstützt und vorangetrieben werden.

Die vorliegende Broschüre, die die wichtigen Teilaspekte Bergbau und Verhüttung anorganischer Rohstoffe aufgreift, leistet hierzu einen bedeutenden Beitrag. Das Wissen über und die Erfahrung in Bezug auf diese Themen haben bei uns nach wie vor Exzellenzniveau, welches wir für Deutschland und Europa nutzen müssen.



Thomas Mayer

Hauptgeschäftsführer und Vorstand
Verband der Chemischen Industrie e.V.,
Landesverband Baden-Württemberg;
Vorsitzender des Beirates THINKTANK
Industrielle Ressourcenstrategien



© Parlov, stock.adobe.com



Einleitung

Rohstoffe bilden die Basis unseres täglichen Lebens. Die großen gesellschaftlichen Herausforderungen erfordern auch in Zukunft eine sichere und stabile Versorgung mit einer Vielzahl von Rohstoffen.

Zwar sind Rohstoffe geologisch gesehen nicht knapp, jedoch bedarf es eines effizienten und nachhaltigen Ressourcenmanagements, um die Versorgung mit den notwendigen Rohstoffen sicherzustellen. Gerade für die neuen Technologien, die notwendig sind, um das 2-Grad-Ziel bzw. unter 2-Grad-Ziel zu erreichen und eine klimaneutrale Industrie und Gesellschaft zu sichern, wird es in den nächsten Jahrzehnten einen zunehmenden Bedarf an Rohstoffen aus Minen geben. Die Kreislaufwirtschaft wird zwar einen wesentlichen Beitrag leisten, aber selbst bei 100 % Recycling nicht den Gesamtbedarf an Rohstoffen abdecken können. Resiliente, das heißt widerstandsfähige Rohstofflieferketten sind daher zukünftig mehr als bisher notwendig.

Am Beispiel von Kupfer und dem Seltene-Erden-Metall Europium haben wir die unterschiedlichen Aspekte von Bergbau, Verhüttung und Recycling im Kontext der Rohstoffstrategien führender Wirtschaftsnationen untersucht und die wichtigsten Instrumente und Vorgehensweisen zusammengestellt. Unsere Broschüre befasst sich mit der Frage nach der Resilienz unserer Industrie, also ihrer Fähigkeit, diese neuen Herausforderungen ohne anhaltende Beeinträchtigung zu überstehen und sich für die Zukunft entsprechend auszurichten. Dies bietet Rückschlüsse auf eine deutsche und vor allem europäische Rohstoffsicherung, die für die Umsetzung der Ziele des Green Deals der EU von besonderer Bedeutung sind.

Ich wünsche Ihnen mit der Broschüre viele Anregungen und freue mich auf interessante Diskussionen.



Dr. Christian Kühne

Geschäftsführer

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

Zusammenfassung

Länder mit hoher Produktionsleistung benötigen resiliente Rohstofflieferketten. Deutschland ist zu 100 % von der Einfuhr von Metallerzen und -konzentraten abhängig, die meisten von ihnen werden nach der Produktion als Waren wieder exportiert. Deutschland steht mit einem Anteil von 23 % am nationalen und 7 % des globalen BIP auf Rang vier der weltweiten Produktion des verarbeitenden Gewerbes. Die Diversifizierung der Lieferketten spiegelt sich in Regierungsstrategien wider, die sich in den fünf führenden Fertigungsländern China, Deutschland, Japan, Südkorea und den USA unterscheiden. Außer Deutschland lagern alle diese Länder strategische Metalle über staatliche Behörden und diversifizieren mit staatlichen oder privatwirtschaftlichen Investitionen in primäre Lagerstätten weltweit. Trotz hervorragender Bemühungen durch die Gründung einer neuen Agentur und eines neuen Forschungsinstituts für Ressourcentechnologien in Deutschland scheiterten alle bisherigen Bemühungen zur Förderung von Unternehmen im Bergbau. Weder Deutschland noch die EU-27 beherbergen ein großes Top-30-Bergbauunternehmen, das sich auf Metalle konzentriert und international tätig ist. Die Erfolge des Recyclings sind rohstoffabhängig. Während der Anteil von Altkupfer an der deutschen Kupferproduktion bei 41 % liegt [EU 17 %], fehlt in Europa z. B. ein Recycling von Seltenerdelementen [SEE].

Das vorhandene Spektrum an Verhüttung und Raffination in der EU, um alle Trägermetalle abdecken und somit auch weitere Metalle als Nebenprodukte aus Erz und Schrott gewinnen zu können, ist unvollständig. Auch ein bedeutender Metallhandel bzw. eine Metallbörse fällt mit dem Austritt Großbritanniens aus der EU-28 weg. Das Fehlen einer vertikal integrierten Lieferkette limitiert eine Zusammenarbeit zwischen Hochschulen und Industrie und erschwert Innovation in der gesamten Wertschöpfungskette, die Exploration, Bergbau und Metallurgie umfasst. Das globale Wachstum von Bevölkerung und Wohlstand sowie der Übergang zu materialintensiven Technologien wie für erneuerbare Energien werden zu einer höheren Nachfrage und einem globalen Wettbewerb auf dem Rohstoffmarkt führen. Es ist fraglich, ob mit der deutschen Fokussierung auf bilaterale Vereinbarungen über Primärrohstoffe ohne eine tatsächliche primäre Rohstoffversorgung sowie auf Recyclingtechnologien, die nur einen Teil des Verbrauchs decken können, ein Erfolg versprechender Ansatz gewählt wurde, um die Rohstoffversorgung auch in Zukunft zu sichern. Die aktuelle Coronakrise führt mehrere deutsche Metallraffinerien mit Expertise in Primärrohstoffen und Recycling in den Konkurs, sodass das Know-how und die Kapazitäten in der Verhüttung und Raffination von Primärrohstoffen und Schrottreycling weiter schwinden.

Wissenswertes und Bedenkenswertes

Der Zugang zu Rohstoffen wird durch die geologischen Bedingungen, insbesondere aber durch das Umfeld sozialer, technologischer, wirtschaftlicher, ökologischer, politischer, rechtlicher und ethischer Aspekte, oft in einer sogenannten STEEPLE-Analyse zusammengefasst, gesteuert (z. B. More et al. 2015, Hilgers et al. 2020). Die multidimensionalen STEEPLE-Aspekte tragen dazu bei, dass die Öffentlichkeit für die Exploration und das Recycling von Rohstoffen sensibilisiert wird. Das Versorgungsrisiko kann anhand der Konzentration von Bergwerken und Raffinerien in Ländern (der sogenannte Herfindahl-Hirschman-Index HHI) und des gewichteten Länderrisikos (DERA 2019) bewertet werden, wobei Letzteres unter Berücksichtigung des Prozentsatzes des globalen Bergbau- und Raffinerievolumens, gewichtet durch die Worldwide Governance Indicators WGI der Weltbank (Kaufmann et al. 2010, World Bank 2019a), bewertet wird. Veröffentlichte Studien zur Rohstoffkritikalität haben jedoch Grenzen und bedürfen einer kritischen Überprüfung unter Anwendung kohärenter Risikomodelle und transparenter Datenbanken (Frenzel et al. 2017, Schrijvers et al. 2020). Darüber hinaus zeigen Marktdaten keine Korrelation mit dem Länderisiko und der Konzentration von Bergwerken und Raffinerien (Renner & Wellmer 2019). Die Komplexität der Risikobewertung spiegelt sich in Vorhersagen von Peak Öl, Peak Kupfer und anderen wider, die häufig an neuen disruptiven Technologien und neuen geologischen Explorationsentdeckungen scheitern (Golding & Golding 2017: 161-183).



Viele nationale Strategien befassen sich mit der Versorgung mit kritischen Rohstoffen. Länder mit hohen BIP-Anteilen des verarbeitenden Gewerbes (China, Deutschland, Japan, Südkorea, USA und andere) haben daher ein Interesse an resilienten Lieferketten. Ein resilientes System passt sich den sich ändernden Bedingungen an und widersteht Störungen bzw. erholt sich schnell davon [Gardner & Colwill 2018, Bhamra et al. 2011].

Hier geben wir einen kurzen Überblick über die Wertschöpfungskette von Exploration, Bergbau, Metallurgie mit Verhüttung, Raffination und Recycling in Bezug auf Nachfrage und Angebot. Wir zeigen am Beispiel des Seltenerdelements Europium und des Basismetalls Kupfer aktuelle und zukünftige Rohstoffvolumina und diskutieren resiliente Strategien der Rohstoffversorgung in der Wertschöpfungskette. Schließlich argumentieren wir, dass der Verlust vertikal integrierter Industrien das Wissensdreieck beeinflusst, was die resiliente Rohstoffversorgung in Deutschland und Europa schwächt.

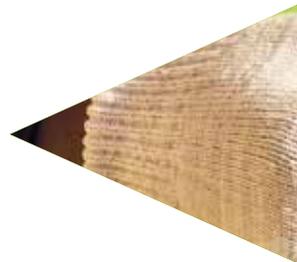
Nachfrage

Mehr Menschen benötigen bei steigendem Wohlstand immer komplexere und ressourcenintensivere Produkte ...

Nachfrage durch Bevölkerungs- & Wohlstandswachstum

Die Weltbevölkerung hat sich seit den 1970er Jahren auf heute 7,8 Mrd. verdoppelt und nimmt derzeit jährlich etwa um die Gesamtbevölkerung Deutschlands, d. h. um etwa 80 Mio. Menschen, zu [UN 2017]. Seit 1970 hat sich das jährliche Bevölkerungswachstum auf die heutigen 1,1 % etwa halbiert und es wird davon ausgegangen, dass sich die Weltbevölkerung bei 10 bis 11 Mrd. Menschen im Jahr 2060 stabilisiert [Steffen et al. 2015, UN DESA 2017, 2019] (Abb. 1). Das globale BIP wird sich voraussichtlich bis 2060 verdreifachen [ab 2017, OECD 2019: 15] und der globale Wohlstandszuwachs weiter ansteigen (Abb. 1).

Das rasche Wirtschaftswachstum Chinas und anderer Schwellenländer (Abb. 2) führt dazu, dass der Anstieg des Energie- und Rohstoffverbrauchs größer ist als der jährliche Bevölkerungszuwachs (Biomasse 2,1 %, fossile Energien 2,6 %, Erzminerale 5,7 %, Industriemineralien 4,0 %; Krausmann et al. 2018). Andere Länder wie Indien werden mit einem starken Wirtschaftswachstum wahrscheinlich folgen und die Nachfrage nach Rohstoffen wird weiter steigen. Unterdessen schwankt das Metall-BIP-Verhältnis seit 1980 unverändert um 110 kg/1000 USD BIP [Rietveld et al. 2018: 26]. Länder wie China (jetzt 1,44 Mrd. Menschen, 2060 1,33 Mrd.), Indien (jetzt 1,3 Mrd. Menschen, 2060 1,65 Mrd.) [UN DESA 2020] und Russland werden den derzeitigen Lebensstandard Europas (EU-4 Frankreich, Deutschland, Italien, Vereinigtes Königreich) im Jahr 2060 erreichen [OECD 2019: 65], begleitet von einem steigenden Rohstoffverbrauch. Im Vergleich wird die EU-27 von 446,8 Mio. Menschen im Jahr 2019 [Eurostat 2020a] auf 2060 436,8 Mio. Menschen [Eurostat 2020b] schrumpfen.



Der gestiegene Rohstoffbedarf geht mit einem steigenden Energiebedarf für Exploration, Verarbeitung, neue Technologien und Produkte sowie Recycling einher. Insgesamt wird der weltweite Primärenergieverbrauch bis 2030 weiter auf 177 PWh [1 Petawattstunde = 10^{15} Wh] ansteigen und 2050 voraussichtlich auf das Niveau 2017 von 160 PWh sinken (DNV 2019: 132). Dies ist auf die Steigerung der Energieeffizienz zurückzuführen, die größer ist als das Wirtschaftswachstum, sowie das Ende des Bevölkerungswachstums (DNV 2019: 78, McKinsey 2019). Fossile Brennstoffe und Kernenergie werden 2050 voraussichtlich 60 % [95 PWh] der weltweiten Nachfrage decken, verglichen mit den heutigen 86 % [140 PWh im Jahr 2017], wobei der Anteil von Erdgas zu- [41 auf 47 PWh/Jahr] und von Kohle und Erdöl abnimmt. Der weltweite Handel und der Wettbewerb mit Rohstoffen zur Deckung der Nachfrage einer wachsenden Bevölkerung mit steigendem Wohlstand werden zunehmen, dominiert von asiatischen Ländern [z. B. Nakajima et al. 2018]. Unterdessen könnte sich der Metallmarkt, der derzeit überwiegend ein Käufermarkt ist (Renner & Wellmer 2019), zu einem Verkäufermarkt entwickeln.



Abbildung 1 a)

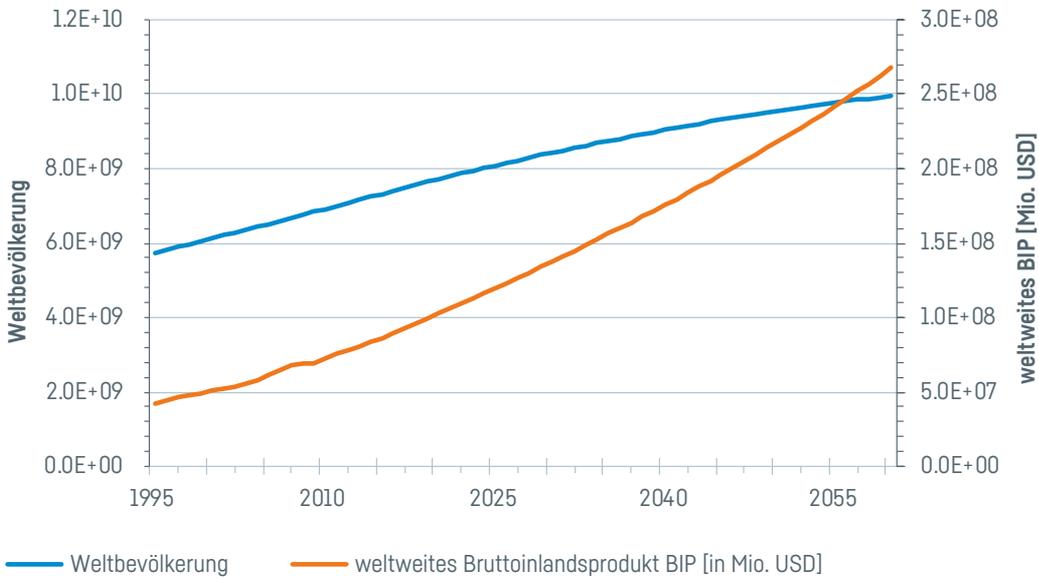


Abbildung 1 b)

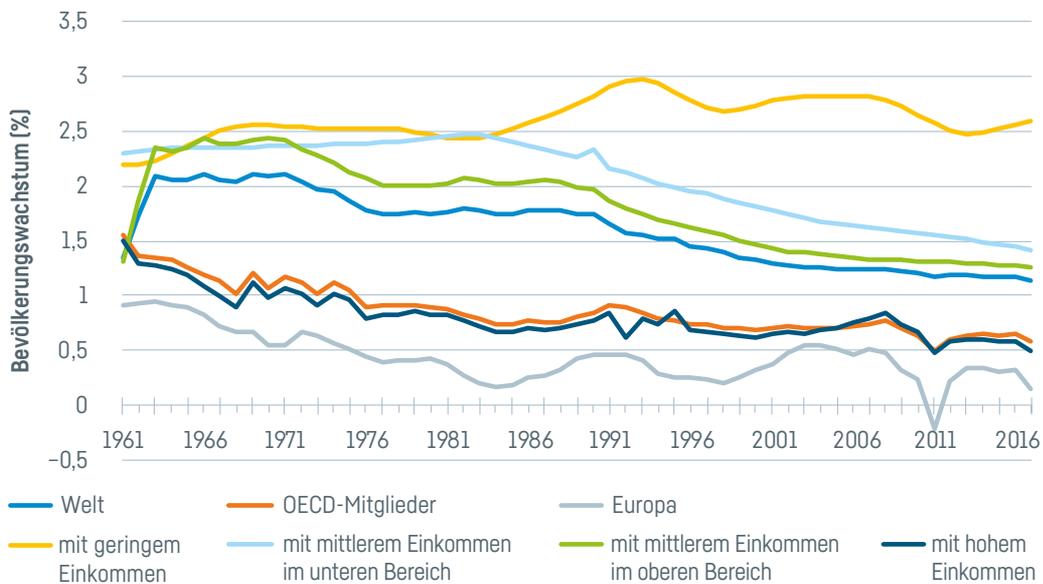


Abb. 1 a) Vorhersage des globalen Bevölkerungswachstums und des Bruttoinlandsprodukts [BIP] bis 2060 in USD bei Kaufkraftparitäten Stand 2010 (OECD 2020, Roser et al. 2020). Das Bevölkerungswachstum folgt einem logistischen Trend und wird sich voraussichtlich bei etwa 10 Mrd. Menschen einpendeln (OECD 2020). Abb. 1 b) Das weltweite Bevölkerungswachstum ging seit den 1970er Jahren auf heute 1,1 % pro Jahr zurück, außer in Ländern mit niedrigem Einkommen (World Bank 2020).

Abbildung 2 a)

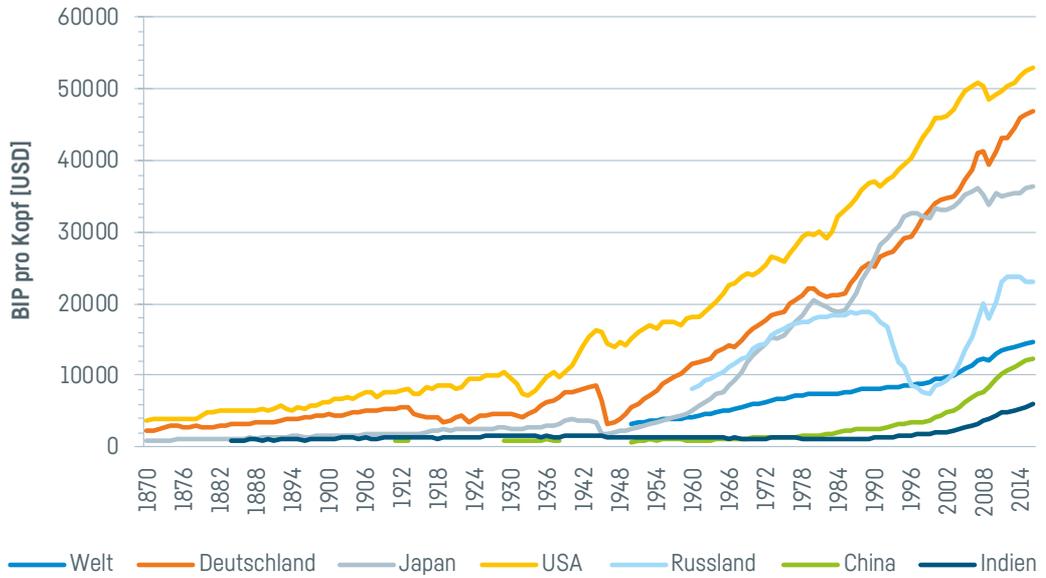


Abbildung 2 b)

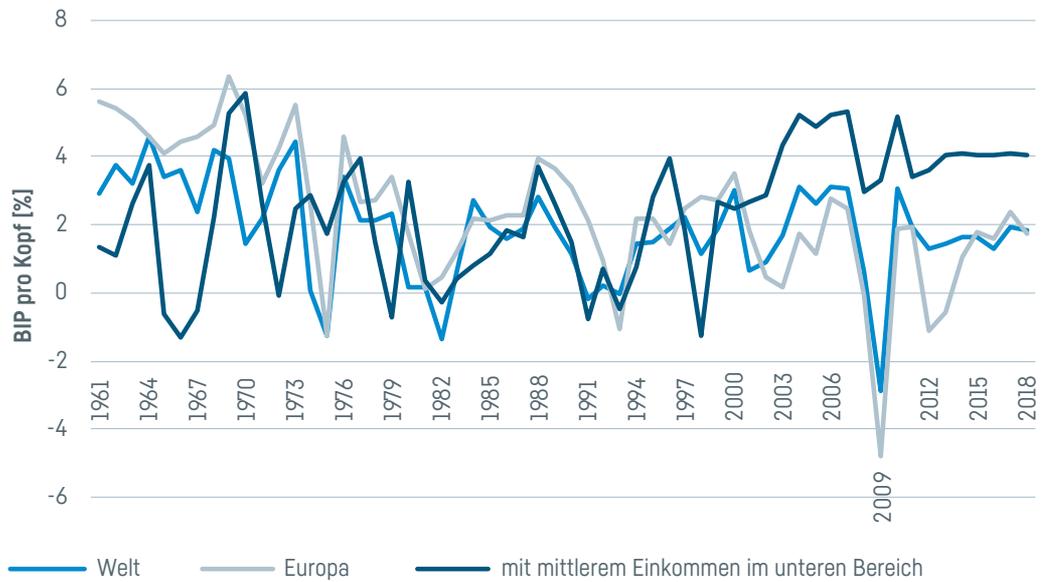


Abb. 2 a) Pro-Kopf-BIP-Wachstum ausgewählter Länder und weltweit seit 1870. Das weltweite BIP stieg um das 11-Fache, das US-BIP seit 1870 um das 14-Fache (Roser et al. 2020). Abb. 2 b) Das jährliche Pro-Kopf-BIP liegt in den letzten acht Jahren weltweit um 2 %. Seit 2003 wird das jährliche BIP-Wachstum der EU von Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen übertroffen (World Bank 2020).



Nachfrage durch neue Technologien

Die vom Menschen in der Technosphäre benötigten Elemente werden durch gezielte Exploration entdeckt und aus geologisch angereicherten Mineral- und Erzvorkommen in der Geosphäre abgebaut, verhüttet und raffiniert. Sie werden aus Lagerstätten gewonnen, um die steigende Nachfrage zu decken. Die Erz- und Elementkonzentration wird während der Aufbereitung im Bergbaubetrieb, der Verhüttung und der Raffinade weiter angereichert und als reines Metall gehandelt. In einem Produkt werden die reinen Metalle häufig in Legierungen wie Messing [Kupfer mit Zink], Bronze [Kupfer mit Zinn], Aluminiumlegierungen oder Stahl sowie in Verbundwerkstoffen wie Halbleiterplatten oder optischen Gläsern in ihrer Konzentration abgereichert.



Neue Technologien, die Digitalisierung und die Mobilitäts- und Energiewende erfordern sowohl neue als auch hochreine Rohstoffe. Zum Beispiel wurde das Seltenerdelement (SEE) Europium (Eu) seit der Erfindung des Farbfernsehers abgebaut. Es gibt eine rote Farbe ab, wenn es von Elektronen in der Fernsehrohr getroffen wird. Die Menge des Seltenerdmetalls Europium in einer Fernsehrohr liegt bei 0,03 bis 0,05 g [UNEP 2013: 220]. Die künftige Nachfrage nach Europium dürfte deutlich zurückgehen, da die Menge der LEDs zunehmen wird, was mit weniger SEEs und einer längeren Lebenserwartung einhergeht [EU 2017: 377].

Auch durch erneuerbare Energien wird die Nachfrage steigen [Vidal et al. 2013, Drexhage et al. 2017: 10-25, Hilgers & Becker 2020]. So benötigt ein einziges 150 m hohes 3-Megawatt-Windkraftwerk derzeit etwa 4,7 t Kupfer, 3 t Aluminium, 335 t Stahl, 1200 t Beton [Kalkstein, Sand, Kies, Gips, Schlackensand aus der Stahlherstellung [Hilgers et al. 2020]] und je nach Generator bis 0,6 t SEEs [World Bank 2019b]. Die Seltenerdelemente (SEE) Neodym, Praseodym und Dysprosium werden für wartungsarme, getriebelose Direktantriebsturbinen mit Permanentmagneten benötigt. Pro Rotorblatt aus epoxid-eingebetteter Glasfaser (GFK) oder kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) werden bis zu 12 t Petrochemikalien benötigt [BGR 2016a, D-EITE 2018: 77]. Eine detaillierte Liste zum Metallverbrauch für erneuerbare Energien sind auch in Rietveld et al. [2018: 24] zusammengefasst. Es wird erwartet, dass die Windenergie im Jahr 2050 auf 4 TW [1 Terawatt = 10^{12} Watt] globale Kapazität ansteigen wird und 17 PWh (11 %) der globalen Primärenergie liefert [DNV 2019: 133, 159 ff.], mit der damit verbundenen Nachfrage nach Rohstoffen. Die heutige Gesamtkapazität von 0,5 TW, die 0,7 % zum weltweiten Primärenergiebedarf [Jahr 2017] beiträgt, muss bis 2050 ersetzt werden. Der Jahresnutzungsgrad [Kapazitätsfaktor] wird voraussichtlich von 21 % [2017, 29 % Offshore] auf 34 % im Jahr 2050 [51 % Offshore] für Windkraftanlagen steigen [DNV 2019: 161].

Solar-Photovoltaik-Energie (PV) wird wahrscheinlich 12 % der globalen Primärenergie mit einer installierten Leistung von 11,6 TW decken, die 2050 ein Drittel [18,7 PWh] des weltweiten Stroms liefert [DNV 2019: 155 ff.]. Der derzeitige Beitrag der PV-Solarenergie beträgt 0,3 % zum weltweiten Primärenergiebedarf. Der Jahresnutzungsgrad [Kapazitätsfaktor] von PV wird voraussichtlich von 13 % auf 19 % im Jahr 2050 steigen [DNV 2019: 125]. Mit einem erwarteten Ende der Lebensdauer von 25 Jahren für Solar-PV-Module [DNV 2019: 123] wird der Bedarf an Rohstoffen entsprechend steigen. Die Zellen aus kristallinem Silizium [c-Si] haben als mono- oder polykristalline Siliziumwafer weltweit einen Marktanteil von etwa 90 %. Ein heute produziertes waferbasiertes c-Si-Solarmodul hat derzeit in Deutschland einen Nennwirkungsgrad von 17,5 % [Durchschnitt pro Jahr] mit einer Nennleistung von 150 W/m² [Fraunhofer ISE 2020: 41, siehe auch Laborexperimente von Green et al. 2019]. Erforderliche Rohstoffe für c-Si-PVs sind 70 % hochreiner Quarz oder Sand mit < 200 ppm Eisengehalt [Seifert et al. 2015], Polymere [10 %], Aluminium [7 %], Kupfer [1 %] und < 0,1 % Zinn, Blei und Silber, von denen Letzteres 7 % der weltweiten Silbernachfrage ausmacht [World Bank 2019b]. Die c-Si-PVs benötigen 10 bis 20 kg Silber und 880 kg Kupfer pro MW Spitzenkapazität [Månberger & Stenqvist 2018].



Dünnschicht-Photovoltaik der zweiten Generation benötigen zusätzliche Rohstoffe. Die CdTe-PV (5 % Marktanteil) benötigt ca. 62 kg Cadmium, 70 kg Tellur und 5,1 Kupfer pro MW, während CIGS-PVs ($\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$) ca. 450 kg Kupfer, 13 kg Indium, 4 kg Gallium und 41 kg Selen pro MW enthalten (Månberger & Stenqvist 2018, siehe auch BGR 2016a). Die Rohstoffnachfrage kann sich mit neuen PV-Technologien wie Perowskit (CaTiO_3) und organischen Dünnschichten ändern. Konzentrierte Solarenergie (CSP) benötigt 1,4 t Kupfer, 1,8 t Nickel und 16 kg Silber für den Turm sowie 3,2 t Kupfer, 940 kg Nickel und 16 kg Silber für die Parabolspiegel pro MW (Månberger & Stenqvist 2018). Die Copper Alliance (2019) geht sowohl für Multi-Megawatt-PV-Anlagen als auch für PV-Dachanlagen von 4 t Kupfer pro MW-Solarenergie aus.

Erneuerbare Energien erfordern höhere Rohstoffmengen pro MW als Kernkraft und fossile Brennstoffe (Vidal et al. 2013, Hertwich et al. 2015). In den meisten Ländern wird Strom aus Wind- und Photovoltaikanlagen jedoch bis 2030 preiswerter sein als die bestehende Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen (McKinsey 2019: 15). Die Nutzungsdauer liegt bei etwa 25 Jahren für Windkraft- und Solarenergie-PV-Anlagen, 40 Jahren für Kohle-, 30 Jahren für Öl- und Gas-, 200 Jahren für Wasserkraft- und 75 Jahren für Kernkraftwerke (DNV 2019: 123). Die Erneuerung der Energieanlagen erfordert dann entsprechend einen neuen Rohstoff- und damit einhergehenden Energieeinsatz.

Insgesamt stieg die Menge der weltweit gewonnenen metallischen Erze von 2,6 Gt (1970, UNEP 2017: 28) auf 9 Gt (2017, OECD 2019: 124) und die Nachfrage wird auf 20 Gt im Jahr 2060 anwachsen (Basisszenario, OECD 2019: 124). In ähnlicher Weise stieg der Verbrauch von Kupfer und Seltenerd-oxiden in den letzten 20 Jahren insgesamt und pro Kopf (Abb. 3). Metallerze spiegeln 17 % der weltweiten Gewinnung von Gesteinen, Mineralien und Erzen im Jahr 2017 wider, der Anteil der Metalle wird 2060 voraussichtlich auf 19 % ansteigen (Basisszenario, OECD 2019: 124). In ähnlicher Weise wird die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen von 15 auf 24 Gt zwischen 2017 und 2060 unter der Annahme der derzeitigen Politik (OECD 2019) weiter steigen. Bei einem Klimaziels von +4 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit wird der erforderliche Metallbedarf voraussichtlich um etwa um 150 % durch den Bau von Windkraft- und PV-Anlagen anwachsen (Drexhage et al. 2017: 12-15, 58). Bei Einhaltung des Klimaziels von +2 °C steigt der Metallbedarf für den schnelleren Ausbau der Windkraft- und PV-Anlagen um 250 bis 300 % (Drexhage et al. 2017: 12-15, 58).

Elshkaki et al. [2016] berechnen, dass alle heute bekannten Kupferreserven bis 2050 mit einer weltweiten Kupferproduktion von 550 Mio. t aufgebraucht sein könnten, wovon 74 % für Wind- und Solarenergie bis 2050 erforderlich seien. Somit wird in den nächsten 30 Jahren mehr Kupfer benötigt als die 540 Mio. t Kupfer, die in den 90 Jahren seit 1920 (bis 2010), und wahrscheinlich mehr, als in der Geschichte der Menschheit verwendet wurden [Elshkaki et al. 2016]. Der tatsächliche Kupferverbrauch seit 1970 lag vermutlich eher bei 593 Mio. t Kupfer [Wellmer pers. comm.]. Die dynamische Größe von Reserven und Ressourcen (z. B. Wellmer 2008, Castillo & Eggert 2020) wird in zahlreichen Studien nicht berücksichtigt.

Abbildung 3

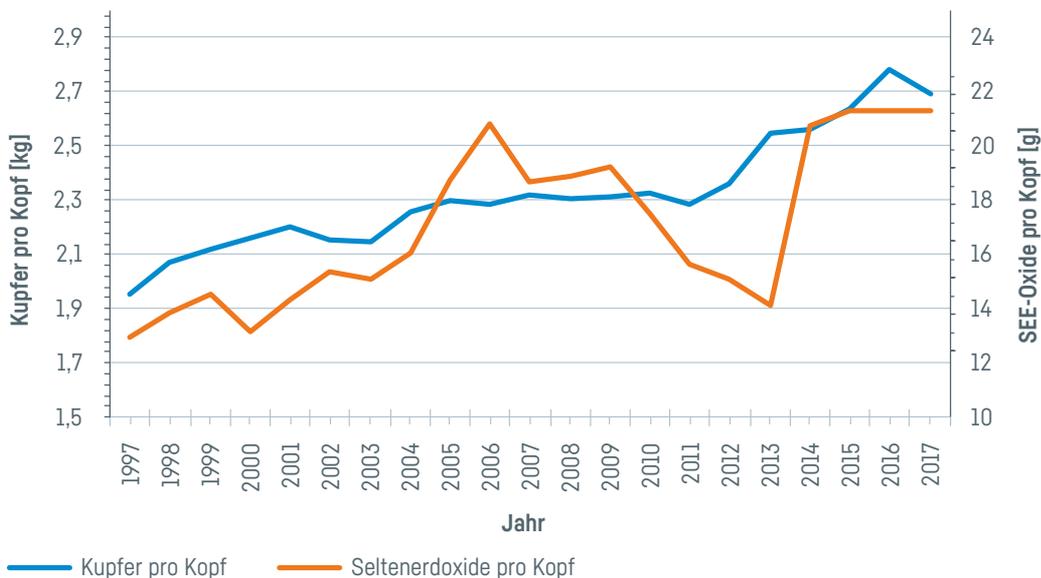


Abb. 3 Der Pro-Kopf-Verbrauch an Kupfer und Seltenerdoxiden (SEE) steigt durch den Ausbau des Stromnetzes und neue Technologien kontinuierlich an. Entsprechend wächst die Rohstoffgewinnung des weltweit abgebauten Kupferkonzentrates stärker als das Wachstum der Weltbevölkerung. In ähnlicher Weise steigt die Produktion von Seltenerdelementen (SEE) pro Kopf, wobei Chinas Exportbeschränkung für Seltene Erden und die steigenden Preise in den Jahren 2010 bis 2013 zu einem temporären Rückgang führten [BGS 2020 a, b].

Versorgung

Unsere Industrie braucht Sicherheit für ihren Bedarf – einen logistisch wie strategisch bestmöglich gesicherten Zugang zu den Rohstoffen durch ein nachhaltiges Ressourcenmanagement von innovativem Bergbau, Metallurgie und Recycling.

Exploration und Bergbau

Bergbau

Die Exploration „auf der grünen Wiese“, aber in prinzipiell hoffigen Gebieten (sogenannte Grünfeldexploration) oder im Umfeld von bekannten Lagerstätten (sogenannte Braunfeldexploration) beinhaltet verschiedene Bewertungsschritte, die bei positiven Ergebnissen zu einer profitablen Mine führen können (für eine detaillierte Beschreibung siehe z. B. Long et al. 2010: 21 ff.). Die Erfolgsquoten der Exploration vom potenziellen Fund bis zum Betrieb einer Mine liegen bei 1 bis 5 % [Braunfeldexploration] und 0,03 bis 0,5 % [Grünfeldexploration] (Kreuzer et al. 2008 am Beispiel porphyrischer Kupferlagerstätten, s. auch Wellmer & Dalheimer 2012 zu Seltenerdelement-Lagerstätten). Die Bewertung einer Lagerstätte folgt nationalen Bewertungsstandards,



von denen einige international anerkannt und von den Börsennotierungsregeln akzeptiert werden, um Zugang zu Aktienmärkten wie TSX Toronto, ASX Australian Securities Exchange, Sydney, HKEx Hongkong oder LSE London zu erhalten (z. B. Uberman 2014, Baker & McKenzie International 2017). Die Vorlaufzeit zwischen Wiederauffahren bzw. Entdeckung und Produktion liegt zwischen 5 und 15 Jahren und lässt sich durch höhere Investitionen kaum reduzieren (Rietveld et al. 2018: 34, Wellmer & Dalheimer 2012). Wenn die untersuchten Ressourcen genug Hinweise für eine potenziell abbauwürdige Lagerstätte aufweisen, werden sie als Reserven (das ökonomisch und technisch förderbare Material) klassifiziert (Wellmer 2008: 56). Da die Rohstoffpreise variieren, ändert sich die Höhe der Reserven kontinuierlich.

Die Entwicklung einer Mine benötigt Investitionen von einer halben Milliarde Dollar oder mehr, die über Jahrzehnte gebunden sind (Long et al. 2010: 23). Die bekannten und unbekannt Aspekte des Selbst- und Fremdbilds werden im Johari-Fenster dargestellt (Abb. 4) und der Ablauf von der Exploration bis zu den Commodities zusammengefasst. Kleine Junior-Unternehmen erkunden unbekannt Regionen (Geopotenzial, Grünfeldexploration) und entdecken neue Vorkommen. Neue Lagerstätten werden auch rund um bestehende Minen (Braunfeldexploration) entdeckt. Solche Funde können auf Messen wie der PDAC (Prospectors & Developers Association of Canada) Convention in Toronto, Kanada, der Mining Indaba in Kapstadt, Südafrika oder der FEM (Fennoscandian Exploration and Mining) in Finnland für mittlere und große Unternehmen oder andere Investoren zum Buy-in gehandelt werden. Die Funde können sich nach weiteren Bewertungen zu einer Ressource und schließlich (wenn wirtschaftlich) zu einer Reserve entwickeln. Die Qualität der Lagerstätten und volatile Marktpreise der Rohstoffe bestimmen, ob eine Ressource zu einer Reserve wird oder umgekehrt. Nur wenige Rohstoffe wie Ag, Al, Co, Cu, Ni, Sn, Pb, Zn und Stahlschrott werden über eine Börse wie die London Metal Exchange (LME) gehandelt. Die meisten Rohstoffe werden über Business-to-Business (B2B)- oder Business-to-Government (B2G)-Verträge gekauft (Abb. 4).

Bergbau-Perspektive

dem Bergbau bekannt dem Bergbau unbekannt

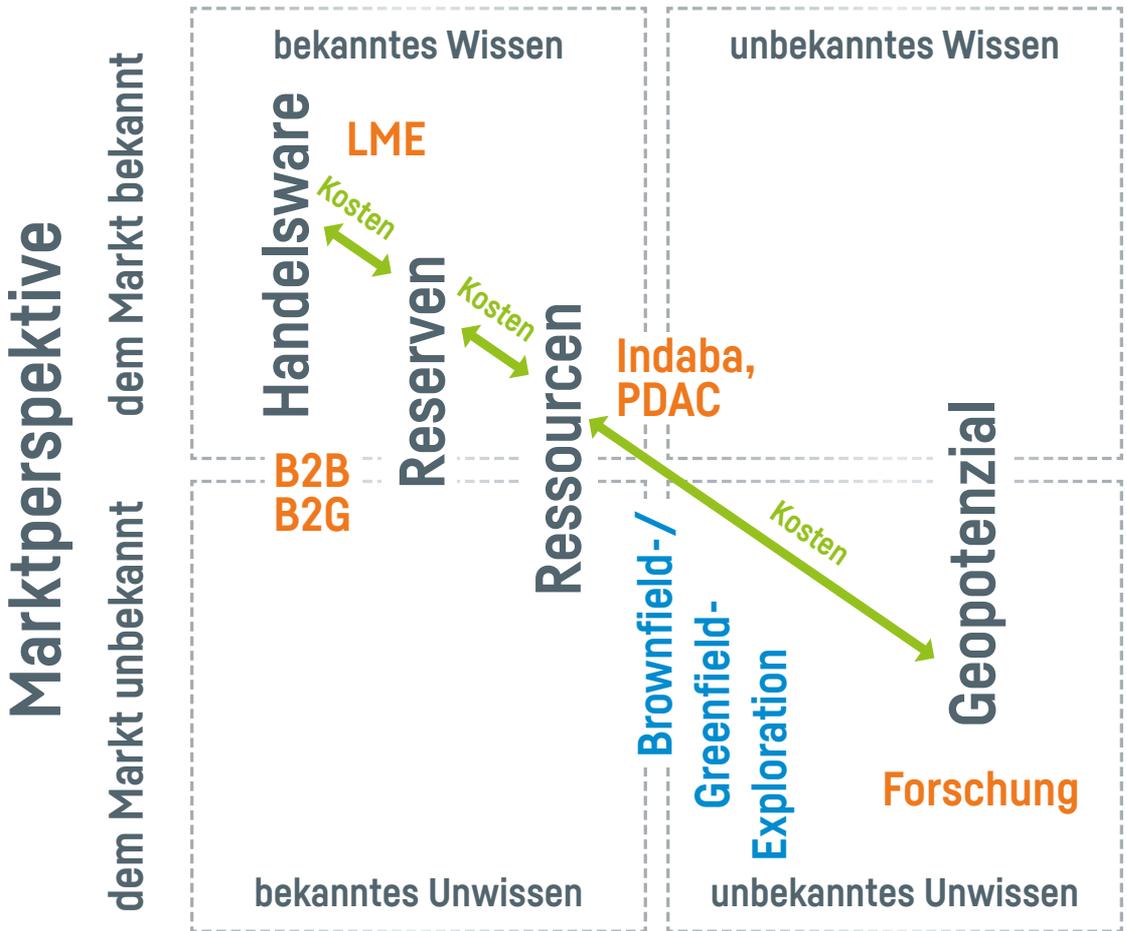


Abbildung 4

Abb. 4 Matrix des Bewusstseins [Johari-Fenster, nach Luft & Ingham 1955], angepasst an das Bergbaugeschäft. Die Matrix betrachtet den Bergbau [Unternehmensperspektive] und den Rohstoffmarkt [Marktperspektive]. Neue Funde werden bspw. auf Rohstoffmessen wie der PDAC Convention in Kanada oder der Indaba in Südafrika angeboten. Rohstoffe werden direkt [Business-to-Business B2B und Business-to-Government B2G] oder über Börsen wie die LME [London Metal Exchange] gehandelt. Greenfield – Exploration auf der „grünen Wiese“, Brownfield – Exploration im Umfeld existierender Minen.

Neue Bergbau- und Verarbeitungstechnologien können die Produktionskosten senken, wodurch die Ressourcen verringert und die Reserven erhöht werden. Darüber hinaus besteuern einige Länder Bergbauunternehmen auf der Grundlage



der gemeldeten Reserven. Unternehmen definieren die Reserven in der Regel nur für einen bestimmten Zeitraum (in der Regel 10 bis 20 Jahre) des Minenbetriebs, sodass die Reserven bei erfolgreicher Exploration über mehr als ein halbes Jahrzehnt konstant bleiben können.

Viele Lagerstätten beherbergen polymetallische Erze, sodass bei der Investitionsentscheidung neben dem Gewinn aus dem Trägermetall auch Gewinne aus weiteren assoziierten Metallen (sog. Nebenprodukten) berücksichtigt werden können. Beiprodukte beeinflussen Investitionsentscheidungen nicht, können aber zur Profitabilität beitragen (Frenzel et al. 2017 und Referenzen darin). So enthält die größte Nickelmine Finnlands Talvivaara 0,22 % Nickel, 0,13 % Kupfer, 0,02 % Kobalt und 0,5 % Zink, während andere Nickelminen Platingruppenelemente (PGE) und mit Kupfer assoziiertes Gold führen können (Ni-Cu-PGE, Makkonen et al. 2017). Obwohl es in Finnland andere Lagerstätten mit höheren Konzentrationen von bis zu 1,5 % Ni gibt (Makkonen et al. 2017), werden sie nicht zu Bergwerken entwickelt, weil die Tonnage und, falls vorhanden, die Nebenprodukte eine Mine mit niedrigeren Gehalten wirtschaftlich machen. Die Verringerung des Erzgehaltes im Abbau wird in der Literatur häufig mit einer Reduktion der Vererzung und dem Verlust qualitativ hochwertiger Lagerstätten korreliert (z. B. Mudd 2009, Calvo et al. 2016), hängt aber nicht notwendigerweise mit einem Mangel an Erzvorkommen oder einer Verringerung des Erzgehalts in der Lagerstätte zusammen. Innovationen in der Großtonnage-Bergbautechnik, höhere Erlöse durch Gewinnung von Bei- und Nebenprodukten sowie eine verbesserte Konzentrat-, Verhüttungs- und Raffinations-technologie können den Abbau von niedrigkonzentrierten Lagerstätten favorisieren (West 2011, Rötzer & Schmidt 2018). Des Weiteren trägt die Haufenlaugung der Abraumhalden zur Gewinnung von Kupfer bei (Northey et al. 2014). Durch die geringen Gehalte von 0,1 bis 0,3 % Kupfer führt die Laugung zu Nebeneinnahmen, gleichzeitig reduziert sich jedoch der durchschnittliche Erzgehalt der Lagerstätte (Schodde in Wellmer et al 2019: 76).

Andererseits können Minen unwirtschaftlich werden, weil unerwünschte Nebenprodukte zusätzliche Kosten verursachen. Dies kann sich im Laufe der Zeit aufgrund neuer Umweltstandards ändern. Das Seltenerdelement (SEE) Europium wird aus Monazit $[(\text{SEE,Th})\text{PO}_4]$ - und Bastnäsit (SEECO_3F) -Mineralen gewonnen und zu Europiumoxid (Eu_2O_3) raffiniert. Insbesondere Monazitvorkommen sind mit Thorium und Uran assoziiert, die in Konzentrationen von bis zu 15 Gew.-% ThO_2 und 1 Gew.-% U_2O in Monazit auftreten können (z. B. Binnemans & Jones 2015). Diese verursachen Herausforderungen für deren Deponierung, die vermieden würden, wenn ein Markt für das Nebenprodukt Thorium zur Verfügung stünde (das sogenannte Gleichgewichtsproblem), wie z. B. eine Verwendung in Thorium-Flüssigsalzreaktoren (Binnemans & Jones 2015, IAEA 2019).

Der aus einer Erzlagerstätte abgebaute Rohstoff kann sich während des Betriebs einer Mine ändern. Lagerstätten können eine hohe Konzentration unterschiedlicher Elemente aufweisen, die zunächst nicht als abbauwürdig galten. So wurde beispielsweise die Karbonatit-Mine Mountain Pass in den USA in den 1950er Jahren bei der Exploration nach Uran gefunden, aber als Seltenerdelemente-Mine zur Gewinnung von Bastnäsit in Betrieb genommen. Zunächst wurde Thorium zur Herstellung von Glühstrümpfen abgebaut, während das SEE-Nebenprodukt Europium erst in den 1960er Jahren mit der entsprechenden technologischen Anwendung des Farbfernsehers von Bedeutung war (Binnemans & Jones 2015). Vor Mitte der 1980er Jahre gab es keine industrielle Anwendung für die SEEs Dysprosium und Neodym und die großen Mengen, die derzeit unter anderem für NdFeB-Permanentmagnete benötigt werden, waren zu dieser Zeit unbekannt (Binnemans & Jones 2015). So bieten Abraumhalden eine zusätzliche Möglichkeit, auf Rohstoffe zu geringeren Kosten zuzugreifen (Re-Mining), da bereits das Erz abgebaut und zerkleinert wurde. So ist z. B. in den Abraumhalden der Kamativi-Zinnminen in Simbabwe eine ausgewiesene Ressource von 26,32 Mio. Tonnen Li_2O mit einem Grad von 0,5 % enthalten (Zimbabwe Lithium 2020). Das Re-Mining von Abraumhalden ist im Bergbau üblich und Metalle wurden an zahlreichen Standorten weltweit gewonnen. Detaillierte Daten zu den Erzgehalten und den Tonnagen sind in Europa und in den Entwicklungsländern jedoch häufig unbekannt.

Europium-Bergbau

China ist der Hauptproduzent von Seltenerdelement (SEE)-Bergbau mit einem Anteil an der globalen Förderung von 63 % [\approx 132.000 t Seltenerdoxide im Jahr 2019] [USGS 2020: 133]. Davon entfallen durchschnittlich 407 t/a auf das Seltenerdoxid Europium [Binnemans et al. 2018]. Die 100%ige EU-Importabhängigkeit wurde 2014 von China [40 %], den USA [34 %] und Russland [24 %] gedeckt [EU 2017: 374]. Das gewichtete Länderrisiko für SEEs ist hoch: China liefert 82 % der Bergbauförderung und 86 % der Raffinerieprodukte weltweit. SEE gelten daher als risikoreiche, kritische Rohstoffe [DERA 2019: 69]. Die einzige nordamerikanische Mine Mountain Pass in den USA wurde 2015 wegen niedriger Rohstoffpreise geschlossen, 2018 an MP Minerals verkauft und inzwischen wiedereröffnet [Boykoff & Sebastian 2019, Rees et al. 2019]. Unterdessen wurde die SEE-Lagerstätte Mt. Weld [entdeckt 1988] in Westaustralien 2011 von der Lynas Corporation eröffnet, die heute 11 % der weltweiten Förderung ausmacht [DERA 2019: 69]. Russland als drittgrößter Hersteller von SEE (Förderung 2,4 %, raffinierte Erzeugnisse 2,5 %) erwägt ebenfalls eine Ausweitung der Produktion [Fedorinova 2019]. Kürzlich einigten sich Geoscience Australia und der Geologische Dienst der USA darauf, die Abhängigkeit von der chinesischen Dominanz bei der SEE-, Kobalt- und Wolframversorgung zu überwinden und Innovation zu fördern [Vella 2020].

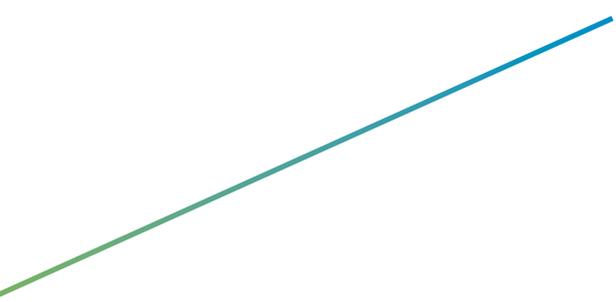


Die künftige Nachfrage nach dem Seltenerdmetall Europium dürfte sich reduzieren, da Kathodenstrahlröhren in Fernsehern durch LCD-Bildschirme und Leuchtstofflampen durch LEDs ersetzt werden und Europium in fünf Jahren wahrscheinlich nicht mehr als kritischer Rohstoff aufgeführt wird (Binnemans et al. 2018). Dies wird sich jedoch nicht auf die insgesamt steigende Nachfrage nach anderen SEEs, z. B. für Magnete und Batterien, auswirken.

Kupfer-Bergbau

China ist der drittgrößte Produzent bei der globalen Bergwerkförderung von 20 Mio. t (2019) mit 8 % nach Chile (28 %) und Peru (12 %) (USGS 2020: 53). In Deutschland wurde der letzte Kupferbergbau 1990 im Mansfelder Revier eingestellt, in Polen wurden 2018 aus denselben Gesteinsschichten 401 kt Kupferkonzentrat gewonnen (Statistica 2020). Kupfer gilt aufgrund der geringen Länderkonzentration und des internationalen Handels an den Rohstoffbörsen als Rohstoff mittleren Risikos (DERA 2019: 60). Die Umsätze der 40 größten Bergbauunternehmen blieben in den letzten zehn Jahren konstant, wobei Kupfer und Kohle mit jeweils 23 % die wichtigsten Rohstoffe mit dem größten Anteil sind (PwC 2019).

China dominiert die Raffinadeproduktion von Kupfer (36 % vor Chile 11 % und Japan 7 %) und besitzt Anteile an Kupferminen, -hütten und -raffinaden weltweit. Eine kürzlich getätigte Investition war der Erwerb eines Anteils von 63 % für 1,26 Mrd. USD für eine Kupfermine und Schmelzanlage von RTB Bor in Serbien durch die chinesische Zijin Mining im Jahr 2018 (Jamasmie 2018). Andere Länder wie Afrikas zweitgrößter Kupferproduzent Sambia produzieren 790 kt raffiniertes Kupfer (4 % der weltweiten Produktion im Jahr 2019, USGS 2020). Das Land verzeichnete zwischen 2011 und 2018 einen vierfachen Anstieg der Auslandsverschuldung und soll sich wie mehrere andere Länder in der sogenannten chinesischen Schuldenfalle befinden (Servant 2019). Die Mehrheit der vier großen Kupferminen, die mit 80 % zur Kupferproduktion Sambias beitragen, wird jedoch nach wie vor von den beiden kanadischen Unternehmen Barrick und FQM, dem indischen Unternehmen Vedanta Resources und Glencore mit Sitz in der Schweiz gehalten. Dennoch hat China seine globale Strategie einer vertikalen Integration seiner Lieferketten umgesetzt.



Aufbereitung und Energie

Der Rohstoff wird in der Regel am Bergwerksstandort konzentriert und zur metallurgischen Verarbeitung an eine Hütte oder zur Raffinade an anderer Stelle transportiert. Erze mit Erzgehalten von in der Regel < 1 % werden in der Mine zerbrochen, gemahlen und in Aufbereitungsanlagen auf 20 bis 35 % konzentriert. Die Trennung kann durch Schwerkraft oder Magnetabscheidung, Laugung (verschiedene Arten von Flüssigkeiten oder Bakterien) und/oder Flotation erfolgen. Bei der Flotation, einer physikalisch-chemischen Trennung aufgrund unterschiedlicher Oberflächenbenetzbarkeit, aggregieren die gemahlenden, hydrophoben Erze in einem Rührbecken und werden über einen Abstreifer gewonnen. Die Aufbereitung von Kupfererz am Bergwerksstandort benötigt für die Zerkleinerung und Flotation des gemahlenden Kupfererzes rund 70 % der gesamten Energie bei der Kupferproduktion (Hübner et al. 2020: 12). Großtonnageminen benötigen aufgrund geringeren Erzgehalts höhere Aufbereitungskosten (z. B. mehr Energie zur Beförderung des Abbaus), auf der anderen Seite reduzieren optimierte Prozesse, technische Innovationen und neue Verfahren die Energieintensität (Alvarado et al. 1999).

Importabhängigkeit

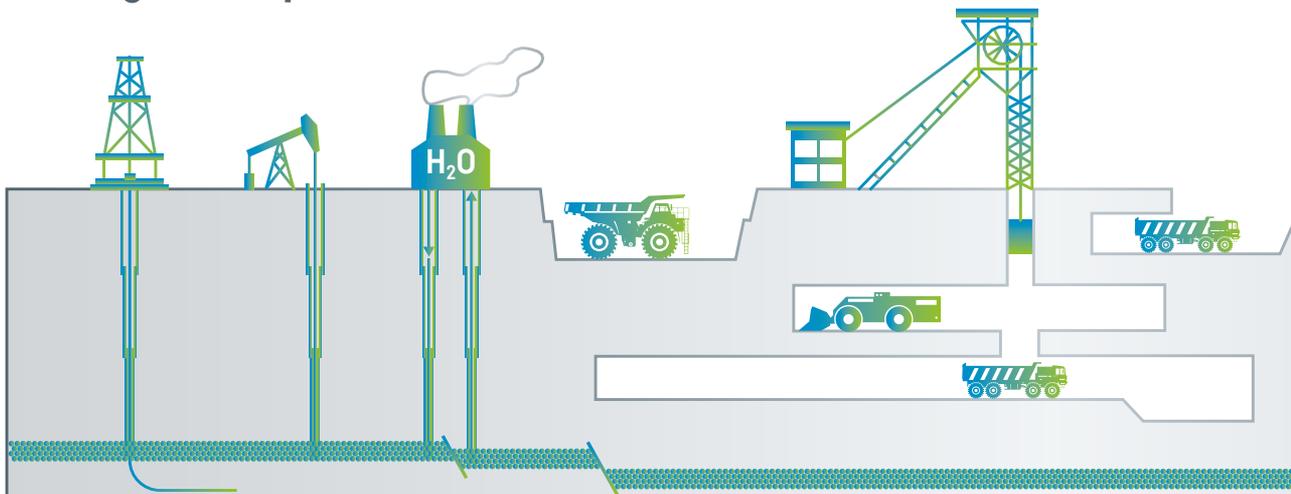
Die EU-Importabhängigkeit liegt beim SEE Europium bei 100 %. Zwischen 2010 und 2014 wurden durchschnittlich 36 Tonnen Europium pro Jahr in der EU verbraucht (EU 2017: 375). Die EU-Importabhängigkeit für Kupfer beträgt 82 % (EU 2018a: 33). Nur 1 % der weltweiten nichteisenhaltigen Metalle (Al, Cu, Ni, Sn, Pb, Zn) und 4,1 % des weltweit geförderten Kupfers werden in Europa abgebaut (IES 2019).

Verhüttung und Raffination

Das Konzentrat des Bergwerks wird global zur Weiterverarbeitung verschifft. In einer Hütte wird aus dem Konzentrat des Erzes das Metall extrahiert und weiter angereichert, bevor es auf den Markt geliefert wird. Die Verhüttung [Extraktion des Metalls aus dem Erz] kann vor der Raffination [Erhöhung der Metallkonzentration durch jedweden Prozess, z. B. bei Kupfer, Nickel] oder nach der Raffination [z. B. bei Tonerde Al_2O_3 aus Bauxit] stattfinden.

Die Metallurgie der Verhüttung und Raffination und assoziierter Technologien begann in der Kupferzeit (5000 bis 3000 v. Chr.) [Reardon 2011]. Die Metalle wurden dann ab etwa 3500 v. Chr. durch Legierungen von Kupfer mit Arsen verfestigt. Die Legierung von Kupfer mit Zinn zu Bronze wurde bei etwa 1000 °C in der Bronzezeit (ca. 3000 bis 800 v. Chr.) hergestellt. Die sulfidischen (z. B. Chalkopyrit CuFeS_2) und karbonatischen (z. B. Malachit $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) Kupfererze wurden mechanisch aufbereitet (zerkleinert und geklaubt), oxidiert (geröstet) und geschmolzen. Der Schmelzpunkt des Chalkopyrits liegt bei 950 °C. Später wurden durch Innovationen im Ofenbau und neue Energierohstoffe (Holzkohle, Kokskohle) höhere Temperaturen erreicht, sodass die aufbereiteten Eisenerze in der Eisenzeit (800 bis 50 v. Chr.) zu Eisen verhüttet werden konnten. Dies gelang durch Rösten des Eisenerzes (damals im Wesentlichen Brauneisenstein (Limonit) $\text{FeO}(\text{OH})$ und Siderit FeCO_3) und den Zusatz von Quarzsand bei der Verhüttung, wodurch die Schmelztemperatur des Eisenkonzentrats auf etwa 1250 °C (Eisen schmilzt bei 1524 °C) reduziert wurde. Bei der Verhüttung wurde das Eisenerz mit Kohle reduziert und aufschwimmende Verunreinigungen flüssiger Schlacke abgetrennt. Neue Technologien beim Bau von Öfen und neue, energiedichte Rohstoffe (Erdöl, Erdgas) führten zu den heutigen Multielement-Legierungen, basierend auf einer mehr als 5000 Jahre alten Entwicklung [Chan 1980, Abb. 5].

Umwelt nachhaltig nutzen, auf und unter der Erde. Klimaneutrale Energie, grüner Bergbau und Untergrund-Speicher.



1 KEINE ARMUT 	1 KEINE ARMUT 	7 BEZAHLBARE UND SAUBERE ENERGIE
7 BEZAHLBARE UND SAUBERE ENERGIE 	7 BEZAHLBARE UND SAUBERE ENERGIE 	11 NACHHALTIGE STÄDTE UND GEMEINDEN
8 MENSCHENWÜRDIGE ARBEIT UND WIRTSCHAFTSWACHSTUM 	9 INDUSTRIE, INNOVATION UND INFRASTRUKTUR 	12 NACHHALTIGE/-R KONSUM UND PRODUKTION
11 NACHHALTIGE STÄDTE UND GEMEINDEN 	11 NACHHALTIGE STÄDTE UND GEMEINDEN 	13 MASSNAHMEN ZUM KLIMASCHUTZ
12 NACHHALTIGE/-R KONSUM UND PRODUKTION 	13 MASSNAHMEN ZUM KLIMASCHUTZ 	

- > Keine Armut
- > Kein Hunger
- > Gesundheit und Wohlergehen
- > Sauberes Wasser
- > Bezahlbare und saubere Energie
- > Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum
- > Industrie, Innovation und Infrastruktur
- > Nachhaltige Städte und Gemeinden
- > Nachhaltige/-r Konsum und Produktion
- > Maßnahmen zum Klimaschutz

1 KEINE ARMUT
7 BEZAHLBARE UND SAUBERE ENERGIE
8 MENSCHENWÜRDIGE ARBEIT UND WIRTSCHAFTSWACHSTUM
9 INDUSTRIE, INNOVATION UND INFRASTRUKTUR
11 NACHHALTIGE STÄDTE UND GEMEINDEN
12 NACHHALTIGE/-R KONSUM UND PRODUKTION
13 MASSNAHMEN ZUM KLIMASCHUTZ

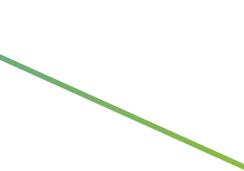
Die globalen Ziele
Für nachhaltige Entwicklung



Abb. 5: Seit vielen tausend Jahren werden Rohstoffe gewonnen, um den Bedarf der Technosphäre zu decken. Zur Erreichung der UN-Nachhaltigkeitsziele (UN 2019), zur Digitalisierung, Energie- und Mobilitätswende ist auch zukünftig die Gewinnung von Rohstoffen und deren Verhüttung notwendig (Bildmitte). Die Geo-Organik (Erdöl, Erdgas, Kohle) liefert die Rohstoffvolumina für die chemische und andere Industrien, dient als Reduktionsmittel bei der Verhüttung und wird für die Hochtemperaturprozesse der Metallurgie verwendet (linke Bildhälfte). Seit vielen Jahrzehnten wird der Untergrund zur Gewinnung von Erdgas als Übergangsenergieträger der Energiewende, von Geothermie als erneuerbarer Energie (linke Bildhälfte), sowie zur Speicherung im Untergrund (Luftdruckspeicher/CAES, grünes Methan/gCH₄, Wasserstoff, Kohlendioxid, rechte Bildhälfte) genutzt und im Rahmen der Energiewende ausgebaut.

Abbildung 5

Innovation in der Metallurgie trieb die gesellschaftliche Entwicklung voran. Zum Beispiel wurde bereits 3300 v. Chr. zur Reduktion der Schmelztemperatur und zur Erhöhung der Härte dem Kupfer Arsen beigemischt (bei dem mumifizierten Körper von „Ötzi“ gefundene Kupferaxt). Die Verhüttung von Eisen ermöglichte die Entwicklung der Eisenschar des Wendepflugs, der schwere Böden urbar machte und Grund der landwirtschaftlichen Revolution war (6. Jahrhundert, siehe auch Andersen et al. 2016). Dank schmiedeeiserner und später gusseiserner Schienen sowie druckfester Dampfkessel konnten Güter und Personen mit der Eisenbahn seit 1825 im Vereinigten Königreich und 1835 in Deutschland erstmalig schnell über große Entfernungen transportiert werden. Die Entwicklung hochfester Legierungen aus AlCuMg (Duralumin) führte zu den ersten kommerziellen Flugzeugen mit einer vollen Duralumin-Metallhaut (z. B. Junkers Ju 52 1932). Neue Legierungen werden in zahlreichen Anwendungen genutzt, wie z. B. biokompatible und korrosionsbeständige Titan-Hüftgelenke (Ti6Al4V, Ti6Al7Nb, 1960er und 70er Jahre), starke SEE-Permanentmagnete für Festplattenantriebe und Windenergieanlagen (NdFeB 1984) oder für energieeffiziente Elektromotoren (z. B. Traktionsantriebe für E-Mobilität, Maschinen, E-Bikes).



Bei der Verhüttung und Raffination handelt es sich um ausgefeilte metallurgische Prozesse und Technologien. In Europa betreiben unter anderem der schwedische Konzern Boliden (Kupfer, Blei, Nickel, Zink; 4,7 Mrd. € Umsatz 2018), die belgische Umicore (11,9 Mrd. € 2017) und Nyrstar (Blei, Zink; Umsatz 3,5 Mrd. € 2017) die Verhüttung von Erzen in Europa. In Deutschland stellen Unternehmen wie Aurubis (Kupfer), Badische Stahlwerke / Dillinger Hüttenwerke / Salzgitter AG / ThyssenKrupp (Eisen und Stahl), Berzelius Metall Holding (Blei), GfE Gesellschaft für Elektrometallurgie (Titan), Heraeus (Edelmetalle), Nickelhütte Aue (Nickel), Nordenhamer Zinkhütte (Zink), Trimet (Aluminium), Aluminium Oxid Stade GmbH und andere die Kapazitäten für metallurgische Prozesse.

Nur mit den Hütten für die Trägermetalle wie Aluminium, Kupfer und Nickel, Eisen, Blei und Zink, Chrom und Mangan, SEEs, Zinn sowie Titan können weitere Metalle als Nebenprodukte aus Erzen und Schrott verhüttet werden, was durch das Metallrad visualisiert wird [Reuter & Verhoef 2004, Verhoef et al. 2004, Reuter und Kojo 2012, Reuter et al. 2019] (Abb. 6). Viele kritische Elemente können nur als Nebenprodukte aus Erzkonzentraten und Schrott gewonnen werden. So sind Rohstoffe für Dünnschicht-Solarmodule ein Nebenprodukt des Raffinationsprozesses. Indium wird aus der Zink-, Gallium aus der Zink- oder Aluminiumraffination und Selen und Tellur werden aus dem Anodenschlamm während der Kupferraffination gewonnen [BGR 2016a, NREL 2015, World Bank 2017]. Die Konzentration solcher Elemente in Mineralen ist entweder zu gering oder die Exploration wurde nicht auf diese Rohstoffe ausgerichtet. Hütten gewinnen auch zahlreiche andere Metalle wie Kobalt aus Nickelerz, was Deutschland zu einer Kobaltexportnation macht, obwohl es weder Nickel noch Kobalt fördert [Simoes & Hidalgo 2011]. Ohne den Zugang zu Hütten aller Trägermetalle ist auch die Gewinnung kritischer Metalle nicht möglich.

Europium-Raffination

Die globale SEE-Oxidproduktion stieg von 107 kt im Jahr 2012 auf 183 kt im Jahr 2017 (BGS 2020a Datenbank). Die Aufbereitung und Metallurgie von SEEs wie Europium wird hauptsächlich von chinesischen Unternehmen durchgeführt, die von 2003 bis 2011 für 95 % der weltweiten Produktion verantwortlich waren (EU 2017: 334, BGS 2020a Datenbank). Das pulverisierte Erzkonzentrat wird durch mehrere Säure- und alkalische Behandlungen bei erhöhten Temperaturen weiter aufbereitet, was mit toxischen und radioaktiven Nebenprodukten einhergeht. Fast alle Erze werden weltweit nach China verschifft, weil es die meisten SEE-Raffinerien und das damit verbundene technische Know-how besitzt. Auch in Australien und den USA geförderte Erze werden nach China exportiert, um aus den Erzen Neodym- oder Praseodym-Seltenerdmetalle zu gewinnen (Mancheri et al. 2019). Nach dem SEE-Preis-Höchststand im Jahr 2011 (BGR 2018) aufgrund des chinesischen Exportverbots im Jahr 2009 und dem Beginn der SEE-Förderung in Australien im Jahr 2011 liefert Australien seit 2012 auch rund 11 % der weltweiten Raffinade durch die Raffination in Malaysia (DERA 2019: 69, BGS 2020a). Derzeit wird der Bau einer Verhüttung in Kalgoorlie, Australien, geplant (Lynas 2020). Europas einzige SEE-Produktionsstätte in La Rochelle, Frankreich, wurde 1994 aufgrund der ökologischen Herausforderungen durch Thorium bei der Aufbereitung von Monazit (Binnemans & Jones 2015) geschlossen.

Kupfer-Verhüttung und -Raffination

Bei Verhüttung und Raffination wird das Metall aus dem Erz gewonnen und dessen Konzentration in verschiedenen Schritten erhöht. Das in der Mine mit 20 bis 35 % Kupfergehalt angereicherte Kupferkonzentrat wird in der Hütte zu 65 % Cu [Kupferstein Cu_2S] verhüttet und die Verunreinigungen als Schlacke abgetrennt. Der Kupferstein wird in einem Konverterofen oxidiert, um 98 % reines Blisterkupfer [Rohkupfer] zu erzeugen. Das Blisterkupfer wird durch Erdgas im Anodenofen reduziert, durch die Entfernung von Resten von Eisen und Schwefel erhöht sich die Konzentration des Kupfers durch die Verhüttung auf 99,5 %. Dieses Anodenkupfer wird raffiniert, indem Anodenplatten aus Kupfer gegossen werden, die sich bei der Elektrolyse als reines Kupfer (99,99 %) an der Kathode [Kathodenkupfer] ablagern [Alvarado et al. 1999, Golding & Golding 2017: 178]. Die Produktion von raffiniertem Kupfer erreichte 20,1 Mio. Tonnen im Jahr 2012 mit einem Anstieg auf 25 Mio. Tonnen im Jahr 2019, von denen China 9,1 Mio. Tonnen produziert [Credit Suisse 2017: 16, USGS 2020: 53]. Das Basismetall Kupfer wird in 124 Kupferhütten [Stand BGS 2020] weltweit veredelt: Japan hielt 2002 12 %, Russland 7 %, Deutschland und die USA je 5 % und Südkorea 3 %



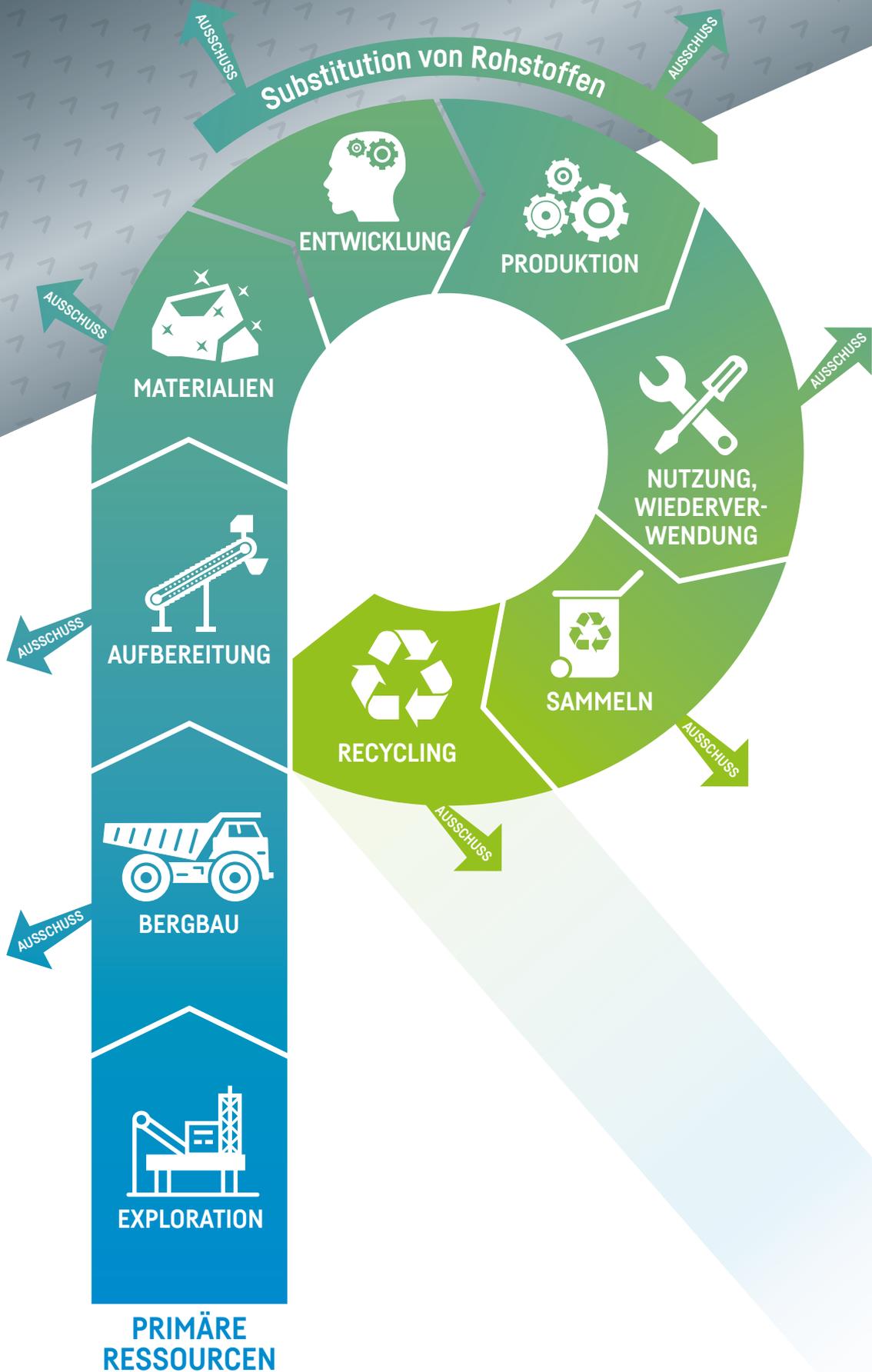
Kapazität [US-Innenministerium 2020, Stand 2002]. Allein in den Jahren 2018/19 stieg die globale Hüttenkapazität um 1,3 Mio. t vor allem in China [DERA 2020]. China verbraucht etwa 50% des weltweit produzierten Kupfers. Größtes europäisches Kupferwerk ist die Hamburger Aurubis AG mit rund 6 % des weltweiten Anteils an raffinierten Kupferprodukten. Aurubis produzierte 1,14 Mio. t Kupferprodukte [Aurubis 2020], was etwa $\frac{3}{4}$ der deutschen Nachfrage entspricht [DERA 2013]. Die wirtschaftliche Lage hängt weitgehend von den Preisen für Kupferkonzentrate und -schrotte, Auflagen und betriebswirtschaftlichen Kosten wie Energiekosten ab.

Energie- und Importabhängigkeit

Für Hochwärmeprozesse während der Verhüttung und Raffination wird Energie benötigt. Obwohl der Gehalt an Kupfer im Erz in den letzten 50 Jahren abnahm, verringerte sich die Energiemenge, die benötigt wurde, um Kupfer aus dem Erz zu gewinnen. Durch energiesparende Technologien reduzierte sich der Energieverbrauch von fast 12 kWh/kg auf weniger als 8 kWh/kg raffiniertes Kupfer [Golding & Golding 2017: 178, 179]. Der gegenwärtige Energiebedarf für die Primärproduktion von Basismetallen und Stahl beträgt etwa 2,2 % des weltweiten Energiebedarfs [nach Rankin 2012], etwa 0,2 % des weltweiten Energiebedarfs werden für das Recycling von Basismetallen und Stahl nach der Sammlung und Sortierung benötigt [nach Rankin 2012 und ISRI 2019].

Insgesamt werden nur 6 % der gesamten nichteisenhaltigen Metalle der Welt (mit 13,1 % Kupfer) in Europa verhüttet und raffiniert [IES 2019]. Europium wird außerhalb Europas verhüttet und raffiniert. Eine Zunahme des kumulativen Energieaufwands pro Tonne Kupfer vom Bergbau bis zur Kupferkathode hat seit 1930 nicht stattgefunden [Rötzer & Schmidt 2020].





Recycling

Wiederverwendung, Wiederaufarbeitung, Recycling [RRR – Reuse, remanufacturing, recycling] verlängert die Produkt- und Elementnutzungsdauer, reduziert Abfall und liefert Sekundärrohstoffe in die Wertschöpfungskette. Darüber hinaus ist die Reduktion der Material- und Energiekosten durch Änderung der Materialeigenschaften oder Substitution ein üblicher Ansatz in einem wettbewerbsorientierten Markt.

RRR stehen immer kürzere Innovationszyklen von Produkten gegenüber, die neue Rohstoffe in neuen Produkten erfordern. RRR für Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE – Waste Electrical and Electronic Equipment), die etwa 40 % Metalle enthalten, wird durch EU-Ziele für die Sammlung und Wiederverwendung/Recycling forciert. Die heutigen Multielement-Hightech-Produkte mit kurzen Innovationszyklen (Mobiltelefone, Computer, Fernseher) erreichen oft ihr Nutzungsende vor Produktversagen. Viele End-of-Life (EoL)-Elektronikprodukte funktionieren noch, wie z. B. 60 % der in Deutschland gesammelten und entsorgten Flachbildschirme [UBA 2016: 24, 25, siehe auch Bundgaard & Remmen 2018: 20]. In Deutschland lag die Sammelquote bei den Elektro- und Elektronik-Altgeräten in den letzten Jahren bei etwa 45 % der in Verkehr gebrachten 2,08 Mio. Tonnen/Jahr Elektro- und Elektronikgeräte. Das vorgeschriebene Ziel von 45 % konnte nicht durchgängig erreicht werden. In vielen europäischen Ländern sollen Wiedernutzungs-/Recyclingziele von 50 % erreicht worden sein [EU 2018b]. Seit 2019 liegt die Mindestquote bei 65 %; zum Erreichen dieses Ziels sind wesentliche Änderungen bei der Sammlung erforderlich. Hohe Rohstoffkosten führen allerdings zu Substitution oder abnehmender Konzentration des gewünschten Metalls im Elektroschrott und damit zu abnehmender Wertschöpfung beim Recycling [Sprecher et al. 2017].

Die Kreislaufwirtschaft des Recyclings geht oft mit einem geringeren Wasser- und Energieverbrauch und einem insgesamt geringeren ökologischen Fußabdruck einher [z. B. EU 2018b, c: 11, Hertwich et al. 2015], muss allerdings rohstoffspezifisch geprüft werden [Schmidt et al. 2020]. Die Recyclingquote kritischer Rohstoffe in der EU ist jedoch insgesamt noch gering [z. B. EU 2018c: 10] (Abb. 7). Die Menge an Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) ist in Deutschland und der übrigen Welt im letzten Jahrzehnt um fast 30 % gestiegen. Der weltweite

E-Schrott belief sich auf 44,7 Mio. Tonnen im Jahr 2016 und wird voraussichtlich auf 52,2 Mio. Tonnen weltweit im Jahr 2025 ansteigen [Baldé et al. 2017]. Hauptsächlich Edelmetalle in 0,0001 Gew.-% (ppm) Konzentration und Kupfer werden aus wirtschaftlichen Gründen aus WEEE recycelt (z. B. Hagelüken 2014). Andere gewinnbare Elemente werden oft aus Rentabilitätsgründen mit der Schlacke deponiert (siehe Metallrad, Abb. 6). Gleichzeitig muss unter höchsten Standards der Eintrag toxischer Nebenprodukte beim Recycling von WEEE wie Blei, Quecksilber und Cadmium, PCB (polychloriertes Biphenyl) und Dioxin verhindert werden [Herrat 2008]. Obwohl Unternehmen wie Umicore in Belgien einen Schmelz- und Raffineriekomplex für Edel- und PGE-Metalle aus E-Schrott mit einer Kapazität von 500.000 Tonnen/a [Paben 2020] betreiben, deckt er nur einen Anteil der 12,3 Mio. t E-Schrott, der jährlich in der EU produziert wird [2016, Baldé et al. 2017]. Durch den Export von WEEE nach Asien und Afrika und die dort oft geringen oder nicht vorhandenen Umweltschutzstandards bei der Gewinnung von Metallen können europäische Recycler kaum bestehen [Hagelüken 2006, 2014].

Europium-Recycling

Die SEE-Produktionsstätte von Solvay in La Rochelle, Frankreich, recycelte SEEs aus Lampen und produzierte 14 t Eu/Jahr. Nachdem die Weltmarktpreise für SEE im Juli 2011 auf 6760 USD/kg Europium angestiegen waren, fielen die Preise auf 385 USD/kg Europium im November 2015 und die Anlage wurde 2016 geschlossen [BRGM 2015: 154, EU 2017: 374 ff.]. Obwohl das Seltenerdmetall Europium bis heute nicht substituiert werden kann, ist keine Recyclinganlage im Industriemaßstab in Europa im Betrieb [Ciacci et al. 2018]. Die technischen Maßnahmen zum Umweltschutz beim Recycling von SEEs bleiben kostenintensiv [de la Torre et al. 2018] und wegen des geringen Marktpotenzials gibt es keinen ökonomischen Anreiz zum Recycling [Schmidt et al. 2020].

Kupfer-Recycling

Etwa 15 bis 20 % der globalen Kupferproduktion stammen aus Schrott [Elshkaki et al. 2016, Credit Suisse 2017: 17]. Im Jahr 2017 wurde mit 5,7 Mio. Tonnen Kupferschrott gehandelt [ISRI 2019]. Zwar wird der Energiebedarf für die Primärproduktion oft als höher beschrieben als der für das Recycling (30 bis 90 MJ/kg vs. 8,4 MJ/kg), jedoch können Energieaufwand und Klimabilanz des Kupferrecyclings aus schlecht sortierten Stofffraktionen wie Bauschutt höher bzw. schlechter als für den Primärrohstoff sein [Schmidt et al. 2020]. Aufgrund der langen Nutzungsdauer von Kupferprodukten mit 440 Mio. Tonnen weltweit genutztem Kupfer [ICA 2017a, b] und der steigenden Nachfrage einer wachsenden Bevölkerung bleibt

das Recycling gering. In der EU-28 beträgt der Kupferbestand 73 Mio. Tonnen Kupfer mit einem Ende der Lebensdauer von 50 bis 75 Jahren (Passarini et al. 2018: 4). Kupfer gilt bei einigen Autoren unter Annahme einer begrenzten geologischen Verfügbarkeit als eines der wahrscheinlichsten Elemente, für die das Angebot die Nachfrage in der Zukunft möglicherweise nicht decken kann (Hertwich et al. 2015, Elshkaki et al. 2016, Bonnet et al. 2019). Dem stehen allerdings Modelle entgegen, die die Unsicherheit der Nachfrageszenarien und Extraktionskosten sowie das Geopotenzial (zukünftige neu gefundene Lagerstätten) berücksichtigen und in einem innovativen Umfeld von keinem absehbaren Kupfermangel ausgehen (z. B. Castillo & Eggert 2020, Kesler & Wilkinson 2008, Arndt et al. 2017: 127 ff.).

Recyclinganforderungen und Importabhängigkeit

Produktentwicklung ist ein Ansatz des modularen Aufbaus und der einfachen Demontage, um die Recyclingraten von Produkten zu erhöhen, begleitet von der Ökodesign-Richtlinie [EU-Richtlinie 2009/125/EG] (Bundgaard & Remmen 2018). Da jedoch verschiedene Branchen in der Wertschöpfungskette von der Mine über die Hütte bis zur Fertigung beteiligt sind, bleibt der Informationstransfer zwischen den verschiedenen Branchen eine Herausforderung. Die Blockchain-Technologie kann eine Option bieten, Informationen über Rohstoffe branchenübergreifend von Primärressourcen bis hin zu Fertigung und Recycling zu übertragen (RCS 2017). Zhejiang Huayou Cobalt (China, Kongo), LG Chem (Südkorea), Ford, Volkswagen und Volvo sind beispielsweise Mitglieder des verantwortungsvollen Beschaffungsnetzwerks für Kobalt, das Blockchain-Technologie sektorübergreifend nutzt und von der RCS Global Group (RCS 2019) initiiert wurde.

Das Recycling von Metallen erfordert Hütten mit dem gesamten Spektrum aller Trägermetalle, um weitere Metalle als Nebenprodukte aus den Schmelzen gewinnen zu können (Verhoef et al. 2004, Reuter et al. 2019 [Abb. 6]). Unerwünschte Metalle im Schrott reduzieren die Qualität von recycelten Metallen und erfordern die Zugabe von Primärmetallen, um die notwendige Qualität zu erhalten und ein Downcycling zu vermeiden (Verhoef et al. 2003, Wellmer & Becker-Platen 2002). Beispielsweise kann Kupfer nicht kommerziell bei der Stahlverhüttung separiert werden (sogenanntes Begleitelement) und Ziehstähle erfordern Kupfergehalte kleiner als 0,06 Gew.-% (Daehn et al. 2017). Ebenso erfordert Titan- und Aluminiumschrott eine Sortierung, um Kontaminationsmetalle wie Magnesium und ein Downcycling der recycelten Metalle zu vermeiden. Im Gegensatz dazu ist Kupfer ohne Auswirkungen auf die Materialeigenschaften zu 100 % recycelbar (ICA 2017b).

Das Fehlen von Trägermetallen führt zum Wegfall der Wertschöpfungsketten beim Recycling. Löst beispielsweise das geplante europäische Bleiverbot in Wertschöpfungsketten die Schließung von Bleihütten aus, wird dies zu einem Mangel an recycelten Nebenprodukten und kaskadierenden Auswirkungen auf andere Recyclingbranchen führen (Blanpain et al. 2019, Reuter et al. 2019, Abb. 5). Obwohl die Nachfrage nach Rohstoffen steigt, wird die Produktion weiterhin in Regionen mit niedrigeren Umweltstandards und geringerer Materialeffizienz ausgelagert (UNEP 2016: 16, Krausmann et al. 2018).

Die Recyclingraten von SEEs liegen bei < 1 % und das Recycling dieser Elemente ist oft unwirtschaftlich. Stattdessen konzentriert sich das Recycling auf Edelmetalle und Kupfer, da es sich um eine einfache und bekannte Technologie mit hoher Wertschöpfung handelt (PPM 2018). Der Anteil an Kupfer beträgt rund 16 % in WEEE (Maurell-Lopez et al. 2012). Insgesamt werden 24 % der weltweiten NE (Nicht-Eisen)-Basismetalle in Europa recycelt, Kupfer hält einen Anteil von 23 % (IES 2019: 22). Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der EU-28 61 % des Altkupfers für das Recycling gewonnen werden, durch den Ausschuss und Schrottexport aber nur 28 % des Altkupfers in der EU für das Recycling verbleiben und der Anteil des in der EU recycelten Altkupfers am EU-Kupferbedarf 17 % beträgt (Passarini et al. 2018: 22). In Deutschland liegt der Anteil von Altkupfer an der Kupferproduktion bei 41 % (BGR 2019: 37).

Abb. 7: Periodensystem der Elemente sowie Steine und Erden und Industrieminerale, farbkodiert nach dem Prozentsatz der End-of-Life-Recycling-Eingangsrates EoL-RIR: End-of-Life Recycling Input Rate; der Anteil von Sekundärmetallen (Schrott) an der Gesamtmenge der Produktion (Primär- und Sekundärmetalle) in %, nach EU 2018c: 24, DERA 2019, siehe auch OECD 2019: 145). Platingruppenelemente (PGE) mit grünem Rahmen, leichte (LSEE) und schwere (HSEE) Seltenerdelemente mit rotem bzw. blauem Rahmen hervorgehoben. In großer Tonnage produzierte Nichteisenmetalle sind alle Metalle außer Eisen, von denen Buntmetalle eine Untergruppe darstellen. Metalle, die in größeren Tonnagen produziert werden und Hauptbestandteil in vielen Legierungen sind, werden als Basismetalle (Kupfer, Blei, Zink und Aluminium, Nickel, Zinn) bezeichnet.

Gruppe:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Periode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Alkalimetalle Wasserstoff H	Erdalkali- metalle																Helium He 1
1	Lithium Li 0	Beryllium Be 0	Scandium Sc 0	Titan Ti 19	Vandium V 44	Chrom Cr 24	Mangan Mn 12	Eisen Fe 31	Kobalt Co 35	Nickel Ni 34	Kupfer Cu 17	Zink Zn 31	Bor B 0.6	Kohlenstoff C 0	Stickstoff N 0	Sauerstoff O 0	Fluor F 1	Neon Ne 10
2	Natrium Na 13	Magnesium Mg 13	Yttrium Y 31	Zirkonium Zr 40	Niob Nb 41	Molybdän Mo 42	Technetium Tc 43	Ruthenium Ru 44	Rhodium Rh 45	Palladium Pd 46	Silber Ag 47	Aluminium Al 13	Aluminium Al 13	Silizium Si 0	Phosphor P 0	Schwefel S 0	Chlor Cl 0	Argon Ar 18
3	Kalium K 0	Calcium Ca 0	Strontium Sr 0	Yttrium Y 31	Niob Nb 41	Molybdän Mo 42	Technetium Tc 43	Ruthenium Ru 44	Rhodium Rh 45	Palladium Pd 46	Silber Ag 47	Zink Zn 31	Gallium Ga 0	Germanium Ge 0	Arsen As 0	Selen Se 0	Brom Br 0	Krypton Kr 36
4	Rubidium Rb 0	Strontium Sr 0	Yttrium Y 31	Zirkonium Zr 40	Niob Nb 41	Molybdän Mo 42	Technetium Tc 43	Ruthenium Ru 44	Rhodium Rh 45	Palladium Pd 46	Silber Ag 47	Zink Zn 31	Gallium Ga 0	Germanium Ge 0	Arsen As 0	Selen Se 0	Brom Br 0	Krypton Kr 36
5	Caesium Cs 1	Barium Ba 1	La-Lu 0	Hafnium Hf 72	Tantal Ta 73	Wolfram W 74	Rhenium Re 75	Osmium Os 76	Iridium Ir 77	Platin Pt 78	Gold Au 79	Quecksilber Hg 80	Indium In 0	Zinn Sn 0	Antimon Sb 0	Tellur Te 0	Jod I 0	Xenon Xe 54
6	Francium Fr 0	Radium Ra 0	Ac-Lr 0	Rutherfordium Rf 104	Dubnium Db 105	Seaborgium Sg 106	Bohrium Bh 107	Hassium Hs 108	Mitlenium Mt 109	Darmstadtium Ds 110	Roentgenium Rg 111	Copernicium Cn 112	Thallium Tl 0	Blei Pb 0	Bismut Bi 0	Polonium Po 0	Astat At 0	Radon Rn 86
7													Nihonium Nh 0	Flerovium Fl 0	Moscovium Mc 0	Livermorium Lv 0	Tenness Ts 0	Oganesson Og 118

PGE (Platingruppen-Elemente), Edelmetalle
Basismetalle
 Collan = Niob-Tantal-Erz
kritische Rohstoffe
(Risikogruppe 3, DERA 2019)

Schwere Seltenelemente

Leichte Seltenelemente

Lanthanoide:	Lanthan La 1	Cer Ce 1	Praseodym Pr 10	Neodym Nd 1	Promethium Pm 61	Samarium Sm 1	Europium Eu 1	Gadolinium Gd 1	Terbium Tb 1	Dysprosium Dy 1	Holmium Ho 1	Erbium Er 1	Thulium Tm 1	Ytterbium Yb 1	Lutetium Lu 1
Actinoide:	Actinium Ac 1	Thorium Th 1	Protactinium Pa 1	Uran U 1	Neptunium Np 1	Plutonium Pu 1	Americium Am 1	Curium Cm 1	Berkelium Bk 1	Californium Cf 1	Einsteinium Es 1	Fermium Fm 1	Mendelevium Md 1	Nobelium No 1	Lawrencium Lw 1

Industriemineralien & Koks Kohle:

Steine & Erden	7	Bentonit	50	Koks Kohle	0	Diatomit	0	Feldspat	10	Gips	1	Kaolin	0	Kalkstein	58	Magnesit	2	Perlit	42	Quarzsand	0	Talk	5	Bornminerale		Disthen		Fluorit		Graphit		Phosphat		Magnesit	
----------------	---	----------	----	------------	---	----------	---	----------	----	------	---	--------	---	-----------	----	----------	---	--------	----	-----------	---	------	---	--------------	--	---------	--	---------	--	---------	--	----------	--	----------	--

Abbildung 7



Resiliente Strategien

Resiliente Lieferketten reduzieren das Versorgungsrisiko von Rohstoffen. Dies kann die Diversifizierung der Versorgung, Lagerhaltung sowie Substitution beinhalten (Acatech 2017, Sprecher et al. 2017). Den Risiken der Rohstoffversorgung begegnen die Länder mit nationalen Rohstoffstrategien (BMW 2010, BMW 2020, DEFRA 2012, DoE 2011, Bartekova & Kemp 2016). Von den nach Deutschland importierten Primärrohstoffen werden etwa 80 % in raffinierter Form als Produkt wieder aus Deutschland reexportiert und stehen nicht für ein Recycling zur Verfügung (CDU/CSU 2010). Die Versorgungssicherheit wird jedoch durch die steigende Nachfrage, mehr Kunden und den zunehmenden Ressourcennationalismus gefährdet (Verisk Maplecroft 2020, STRADE 2017: 35) und kann daher angepasste Strategien erfordern.

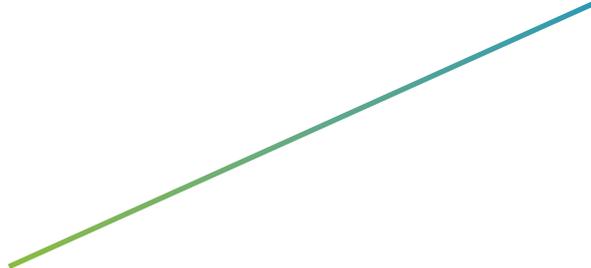
Der Aufbau eines eigenen oder der [anteilige] Erwerb eines international tätigen Explorations- und Bergbauunternehmens oder einzelner Bergwerke (Reverse Integration) ist ein erster Ansatz zur Sicherung von Lieferketten, der mit hohen Investitionen und langen Investitionsrenditen einhergeht (Acatech 2017: 37 ff.). Die Japan Oil, Gas and Metals National Corporation JOGMEC und die Korea Resources Corporation KORES sind staatliche Stellen, die für private Unternehmen in Übersee-Entwicklungen investieren oder diese unterstützen.



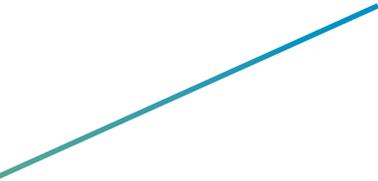
In ähnlicher Weise erwerben China und Indien Anteile an ausländischen Minen. Die Summe bisheriger chinesischer Auslandsinvestitionen könnte allein im Jahr 2009 30 Mrd. USD für Minen in Übersee betragen haben (RPA 2012: A-4), andere Quellen nennen für die letzten 10 Jahre Auslandsinvestitionen für Bergbau und Metallurgie von 126 Mrd. USD (AEI 2020). Der direkte Zugang der EU-27 zum globalen Bergbau ist begrenzt, nur eines der 40 weltweit führenden Bergbauunternehmen hat seinen Sitz in Europa (KGHM Polska Miedz, Kupfer, auf Platz 38, PwC 2019). Die staatlich kontrollierte KGHM ist international tätig und produziert bspw. seit 2014 zusammen mit der japanischen Sumitomo Metal Mining aus der Sierra-Gorda-Mine in Chile (Jamasmie 2019). Deutschlands große Wirtschaftsunternehmen haben sich aus dem internationalen Metallbergbau und -handel zurückgezogen, sind aber noch als international agierende Global Player im Bereich Baurohstoffe und Salz tätig. Die international anerkannten Metallbergbau- und Handelsunternehmen wie die Metallgesellschaft AG (Ende 2000) und die Preussag AG (Ende 1997) oder die nur für kurze Zeit international tätige RAG AG änderten jedoch ihre Kerngeschäfte. Andere traditionelle Gesellschaften sind in Großbritannien (Anglo American, BHP, Glencore, Rio Tinto u. a.) oder andernorts gelistet. Neue Rohstoffunternehmen werden außerhalb Deutschlands gegründet (z. B. AMG Critical Materials im Jahr 2006 in den Niederlanden). Ob die Bedingungen für international tätige Unternehmen im Bereich Bergbau in Deutschland günstig sind, ist zu prüfen.



Eine zweite Strategie der Diversifizierung besteht darin, Hütten und Raffination auf- und auszubauen oder zu kaufen, um Zugang zu vorverarbeiteten Rohstoffen und Know-how (Reverse Integration) zu erhalten bzw. zu entwickeln. Der Erwerb von Know-how könnte beispielsweise ein Grund für den Kauf der deutschen H.C. Starck Tantalum und Niobium GmbH durch die japanische JX Nippon Mining & Metals Corporation, einer Tochtergesellschaft des japanischen Energie- und Rohstoffkonzerns JX Holdings, gewesen sein. Die PPM Pure Metals GmbH, Deutschland, eine Tochtergesellschaft der französischen Recylex S.A., die unter anderem rund 200 t/a ultrareine Metalle wie Gallium, Germanium, Indium für Elektronik, Optoelektronik und PV (PPM 2019, BGR 2016b) produziert, ist vielleicht ein weiterer Übernahmekandidat. Neben anderen Metallverarbeitern in Deutschland ist auch PPM inzwischen aufgrund der Coronakrise insolvent. Sowohl Hütten und Raffination als auch metallurgische Innovationen sind für die Gewinnung von Metallen aus Erzen und Recycling unerlässlich. Ob Deutschland für den Betrieb und die Ansiedlung von Hütten einen Standortvorteil hat, ist zu prüfen.



Die Lagerhaltung (Stockpiling) von kritischen Rohstoffen wird als dritte Strategie zur Überwindung von Versorgungsengpässen durch Diversifizierung benannt [z. B. Acatech 2017: 48 ff.]. Dabei kann es sich um staatliche Agenturen und/oder Industriebestände handeln (IEA 2019). Die Lagerhaltungen in den jeweiligen Ländern werden vom chinesischen State Reserve Bureau, dem japanischen JOGMEC, dem südkoreanischen öffentlichen Beschaffungsdienst PPS und der Korea Resources Corporation KORES sowie dem National Defense Stockpile Program der USA betrieben und verwaltet. Außer in den USA werden gelagerte Metalle und Mineralien vertraulich behandelt (RPA 2012). Japan lagert den Verbrauch von 42 Tagen über die staatliche JOGMEC (DEFRA 2012: 42). Darüber hinaus bevorratet Japans Privatsektor freiwillig den Verbrauch von 18 Tagen einschließlich Vorräten des normalen Betriebs (Kramer 2015, RPA 2012: 11). Das Ziel des koreanischen nationalen KORES ist es, strategische (seltene) Metalle von 60 Tagen Importmenge vorzuhalten (Kramer 2015), der koreanische nationale PPS hält Lagerbestände an Basismetallen für die Wirtschaft und ausgewählte strategische Metalle vor (RPA 2012: A-15). Nur die USA geben einen Überblick über die national gelagerten Metalle und halten beispielsweise 20,9 Tonnen Europiumoxid zum 30. September 2019 auf Lager (Import 2019 35 t, USGS 2020: 132 ff.). In Europa liegt die Lagerhaltung von Metallen beim privaten Sektor und ist in den Staaten unterschiedlich geregelt (RPA 2012: B-9). Die Bundesregierung lagert die Energierohstoffe Erdöl und Erdölprodukte, aber keine strategischen Metalle. Im Gegensatz zu einigen anderen europäischen Ländern hat Deutschland der Industrie keine Verpflichtung zur Lagerhaltung auferlegt. Die Lagerbestände der deutschen Industrie könnten der IEA-Empfehlung von 90 Tagen Nettoimport (RPA 2012: B-9, Stand 2012) entsprechen.



Als vierte Strategie werden Investitionen in technologische Innovationen wie Substitutionen, Produktentwicklung, Wiederverwendung, Wiederaufarbeitung und Recycling, vorangetrieben durch Richtlinien und Forschungsfonds, von allen Industrieländern gefördert und innerhalb Europas und von Deutschland finanziert. Ausgezeichnete Projekte wie das Europäische Innovations- und Technologieinstitut EIT Raw Materials fördern Innovationen in den Bereichen Exploration, Bergbau, Verhüttung und Raffination, Substitution und Kreislaufwirtschaft. Darüber hinaus ist die EU-28 der weltweit führende Exporteur von Bergbauausrüstung [21 % weltweiter Anteil entspricht fast 20 Mrd. USD im Jahr 2015, EU 2018a: 31] mit 135 deutschen Unternehmen [VDMA 2020]. Ebenso entwickeln neu gegründete Forschungszentren wie das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie HIF [seit 2011] innovative Technologien für Rohstoffe. Das für die Weltwirtschaft erforderliche Metallvolumen kann jedoch nicht durch solche Strategien bereitgestellt werden [z. B. ERECON 2015].

Als weitere Strategie können nationale bilaterale Abkommen, Fördermöglichkeiten und Kredite Engagements im Bergbau- und Raffineriesektor fördern. So haben die Vereinigten Staaten ihre Zusammenarbeit mit Australien bei kritischen Mineralien formalisiert [Dol 2019]. Deutschland hat bilaterale Abkommen mit der Mongolei [2011], Kasachstan [2012], Chile [2013] und Peru [2014] geschlossen. Weitere Dokumente wurden mit Australien, Kanada und Ghana unterzeichnet.

Des Weiteren können Rohstoffhändler/Rohstoffbörsen in Deutschland den Zugang zu Rohstoffen erleichtern (z. B. die Peter Cremer Holding GmbH & Co. KG). Aber weder Deutschland als einer der weltweit führenden Rohstoffimporteure noch die EU-27 beherbergen einen international anerkannten Rohstoffspotmarkt. Stattdessen befinden sich mit dem Austritt Großbritanniens aus der EU alle wichtigen Spotmärkte außerhalb der EU-27 an der London Metal Exchange LME, New York COMEX, Singapore SIMEX oder Shanghai Futures Exchange SHFE.

Diskussion

Wie ist die derzeitige Situation? Was ist zu tun und was ist machbar?
Was kostet uns das und wie nachhaltig wirkt das? Was ist zielführend und strategisch sinnvoll?

Die Rohstoffnachfrage wird steigen und eine Erhöhung des Angebots notwendig: (i) Die Weltbevölkerung und der Wohlstand wachsen weiter, (ii) neue Technologien erfordern neue Rohstoffe in kürzeren Innovations- und Marktdurchdringungszyklen und (iii) erneuerbare Energien werden ausgebaut und sind materialintensiver als herkömmliche Energien bei gleichzeitig kürzerer Lebensdauer [Vidal et al. 2013, Hertwich et al. 2015, Worldbank 2017].



Bergbau – Verhüttung – Raffination – Recycling

Es gibt wenige Bergbauaktivitäten im Metallsektor in Europa und wenige große, weltweit tätige Unternehmen mit Sitz in Europa. Wichtige, international tätige Explorations-, Bergbau- und Handelsunternehmen wurden geschlossen oder neu ausgerichtet. Der weltweite Anteil Europas an den Bergbauaktivitäten ist in den letzten hundert Jahren von 40 % auf 3 % gesunken [Harder 2018], während der Verbrauch zunahm. Deutsche Großkonzerne veränderten das Kerngeschäft. Die 1881 gegründete Metallgesellschaft veräußerte aufgrund einer Liquiditätskrise 1993 bis 1999 ihre Bergbauaktivitäten, darunter auch ihren Metallhandel, an die Londoner Börse und übernahm u. a. mehrheitlich den Anlagenbauer GEA Group, von dem sie nach einer erneuten finanziellen Krise 2003 im Jahr 2005 übernommen wurde. Auch die 1923 gegründete Preussag wurde 2002 in das internationale Tourismusunternehmen TUI umgebaut und die großen Bergbauaktivitäten, der Rohstoffhandel und das assoziierte Know-how wanderten ab. Der weltweite Rohstoffzugang wird durch langfristige Lieferverträge mit Bergwerken und Raffinerien (z. B. Aurubis Kupfer, BMW, Volkswagen und andere) gesichert. Die wenigen im internationalen Erzbergbau engagierten deutschen Unternehmen, wie die CRONIMET Mining GmbH (bislang Bergbau von Kupfer, Molybdän und Chrom in Armenien und Südafrika, Minen 2019 verkauft, Wolframminen in Südkorea und Australien noch im Besitz), LANXESS (bislang Bergbau von Chrom in Südafrika, 2020 verkauft) und die ACI Systems Alemania GmbH (Lithium in Bolivien), veräußern ihre Lagerstätten oder treffen oft auf ein schwieriges Umfeld.

Die unterschiedlichen nationalen Strategien und die Geschäftsstrategien im Bergbausektor sind gut dokumentiert. Während bilaterale Abkommen zwischen Deutschland und anderen Ländern unterzeichnet werden, kaufte Chinas Zijin Mining Anteile in Serbien von 63 % des Kupferbergbaus und der Verhüttung von RTB Bor für 1,4 Mrd. USD im Dezember 2018 und 100 % der Timok-Untertage mine für 0,97 USD im März 2019 [Karanovic & Partners 2018, Ralev 2020]. Die Sicherung der Lieferketten innerhalb Europas und die Unterstützung der europäischen Nachbarländer bei der technologischen Entwicklung von Rohstoffabbau und -aufbereitung scheinen für Deutschland und die anderen EU-27-Länder nicht notwendig zu sein. Eine unabhängige Rohstoffversorgung

außerhalb Chinas wäre jedoch durch langfristige Verträge und Verpflichtungen wirtschaftlich machbar (Jaroni et al. 2019). Europa könnte seine SEE-Nachfrage durch eine einzige Mine decken, was Investitionen von 700 Mio. bis 1 Mrd. USD erfordern würde (dies entspricht etwa dem Listenpreis von drei Flugzeugen vom Typ Airbus A350-1000) (Airbus 2018, ERECON 2015: 102, Jaroni et al. 2019). Die SEE-Hütte würde etwa so viel kosten wie die Sanierung des Autobahnkreuzes Aachen (aktuell 91 Mio. €). Solche Kapitalinvestitionen wurden jedoch nicht getätigt und die Verfügbarkeit von Rohstoffen bleibt volatil.

Während China den Weltmarkt bei Bergbau und Raffination von Seltenen Erden dominiert und die technischen Prozesse der Anlagen weiterentwickelt, hinkt das Know-how zu Bergbau und Metallurgie der Seltenerdelemente (SEE) in Europa hinterher (Jaroni et al. 2019). Fehlende Hütten und Raffinerien in Europa schränken nicht nur die Recyclingkapazitäten für Schrott ein, sondern führen auch zum Verlust von Know-how und Innovation. Dabei führt die Auslagerung der Industrie in Schwellenländer zu geringerer Materialeffizienz und erhöhter Umweltbelastung (UNEP 2016: 16, Krausmann et al. 2018), dem durch Effizienzsteigerungen (z. B. Boulamanti & Moya 2016) und durch internationale Standards begegnet werden kann.

Hüttenlöhne und Raffinierlöhne werden von den Bergbauunternehmen mit den Kupferhütten und -raffinerien ausgehandelt. Die Hüttenlöhne lagen 2012 bei 60 USD/t (MBI Metals 2012) und sind nach einem Anstieg auf etwa 100 USD/t im Jahr 2015 kontinuierlich auf 62 USD/t im Jahr 2020 gefallen (DERA 2020). Neben dem Ausbau der Hüttenkapazitäten mit entsprechendem Preisdruck und den Währungsrisiken der oft in USD gehandelten Hütten- und Raffinierlöhnen müssen die Hütten weitere Randbedingungen wie die Energiekosten einkalkulieren.

Der heutige Energiebedarf für den Abbau von Mineralen und Metallen und die Primärproduktion von Basismetallen und Stahl beträgt etwa 6,2 % des weltweiten Energiebedarfs (nach Rankin 2012) und etwa 0,2 % für das Recycling von Basismetallen und Stahl nach der Sammlung und Sortierung (nach Rankin 2012 und ISRI 2019, Holmberg et al. 2017, Rabago et al. 2002: 17, 22). Rechnet man den Energiebedarf zur Gewinnung von Edelmetallen hinzu, so scheint ein gegenwärtiger globaler Anteil des Energiebedarfs von mindestens 10 % für Abbau, Aufbereitung, Verhüttung und Raffination von Mineralen und Metallen wahrscheinlich (Vidal et al. 2013). Der Energieverbrauch für die Gewinnung und Verarbeitung zusätzlicher Rohstoffmengen wird bis 2035 voraussichtlich um 35 % steigen (WFW 2020).



© seventyfourimages & © chuyi2014, elements.envato.com

Wiederverwendung, Wiederaufbereitung und Recycling tragen zu den benötigten Rohstoffmengen bei. Recyclate können aber die Primärressourcen in Bezug auf Menge und Qualität nicht ersetzen, weil die Weltbevölkerung wächst (Abb. 1a), der Wohlstand und der Rohstoffverbrauch per capita steigt (Abb. 1a, 3), neue Produkte einen oft höheren Anspruch an die Rohstoffqualität haben und weil zum Erhalt der Rohstoffqualität beim Recycling von unreinem Schrott reine Metalle beigemischt werden. Es wird davon ausgegangen, dass das Recycling nur 3 % zum Metallbedarf für die Energiewende und 5 % zum weltweiten Metallbedarf in den nächsten 15 Jahren beiträgt (Rietveld et al. 2018: 42). Andersson et al. [2019] weisen darauf hin, dass das Recycling von Basis- und Edelmetallen aus WEEE und End-of-Life-Fahrzeugen (ELVs) auf kritische Metalle ausgeweitet werden könnte, aber politische und metallspezifische Maßnahmen erfordert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ab einer material- und situationsabhängigen Recyclingquote das Recycling, insbesondere von unreinen oder stark abgereicherten Metallen in der Technosphäre, einen teilweise höheren Energieverbrauch und größere Klimaauswirkungen zur Folge haben kann als die Gewinnung eines Primärrohstoffs (Schmidt et al. 2020) und eine Kreislaufwirtschaft entsprechend die anthropogene Klimaänderung verstärken würde (Schäfer & Schmidt 2020). Der eingeschränkte Zugang zu Bergbau- und Raffineriebetrieben verringert die Resilienz von Lieferketten der Primär- und Sekundärrohstoffe.

Deutschland fordert höchste Umweltstandards sowie politische und soziale Richtlinien für nationale Bergbauunternehmen, die national und international tätig sind. Die Zahl der in Deutschland beheimateten Unternehmen für Verhüttung und Raffination nimmt jedoch ab, der Metallbergbau ist praktisch nicht mehr vorhanden, während das Recycling weder die Gesamtnachfrage noch die oft geforderte Qualität der Metalle liefert. Es sollte kritisch hinterfragt werden, ob Lieferketten bei weiterem Verlust von Metallbergbau und Verarbeitungsindustrie widerstandsfähig bleiben.

Diversifizierungsstrategien

Zahlreiche Diversifizierungsstrategien mit der Förderung technologischer Innovation werden durch europäische und deutsche Förderprogramme finanziert. Dennoch haben sich in Europa und Deutschland keine neuen oder stark wachsenden international tätigen großen Unternehmen im Bereich Exploration, Bergbau und Verarbeitung im Primärmetallsektor entwickelt. Auch im Bereich Kapital werden bedeutende Fonds für den Bergbausektor nicht in der EU-27 dargestellt. Nach dem Verlust von europäischer Metallproduktionskapazität während der globalen Finanzkrise 2009 setzt diese sich in der aktuellen Coronakrise weiter fort (Home 2020). Der Zink-Recycler Metallwerke Dinslaken (MWD) sowie die Weser-Metall GmbH, die Harz-Metall GmbH, die Norzinco GmbH und die PPM Pure Metals GmbH haben gerade Insolvenz angemeldet und weitere Unternehmen werden wahrscheinlich folgen.

Die langfristige chinesische Strategie „Made in China 2025“ von 2015, die zum Teil auf der deutschen Industrie-4.0-Strategie basiert, stärkt die vertikale Integration Chinas und seine Lieferketten vom Rohstoff bis zur Raffination zur Herstellung von Hightech-Produkten. Dazu gehört auch der Zugang zu Rohstoffen und Energieressourcen. Während die Europäische Investitionsbank die Finanzierung von Öl-, Gas- und Kohleprojekten im Jahr 2021 aufgrund von Klimaschutzziele einstellen wird, werden Kohlekraftwerke in Serbien und andernorts mit chinesischen Finanzmitteln und chinesischer Technologie (z. B. Rose 2020) gebaut. In ähnlicher Weise investierte China in serbische Kupferminen und Hütten (siehe oben), nachdem die EU in Beitrittsverhandlungen hohe serbische Investitionen zur Behebung der verschmutzten Umwelt gefordert habe (Vasovic 2016) und die Verhandlungen schließlich gescheitert seien. Die chinesische Soft-Power-Politik des „gegenseitigen Nutzens und der



Nichteinmischung“ koppelt Kreditkonditionen nicht an den OECD-Konsus (OECD 2016) mit Auflagen an Sozial- und Umweltstandards sowie Menschenrechte, was einen einfacheren Marktzutritt ermöglicht (Dawar 2020, Huotari et al. 2019). Chinas Auslandsinvestitionen im Metallsektor werden mit etwa 12,6 Mrd. USD/Jahr in den letzten zehn Jahren beziffert (Stand 2020, AEI 2020). Eine solche chinesische Diversifikationsstrategie in Bergwerke, Hütten und Raffination schränkt die Möglichkeiten von Ländern ein, die langsamer und mit weniger Kapitalinvestitionen agieren.

Hervorragende Institutionen wie die Deutsche Rohstoffagentur DERA für Markttransparenz und das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologien HIF wurden 2010 bzw. 2011 dank der deutschen Rohstoffstrategie (BMWi 2010) gegründet. Bilaterale Rohstoffabkommen wurden mit mehreren Ländern unterzeichnet und die nationale Rohstoffstrategie implementiert, was aber bisher weder zu sichtbaren privaten Engagements in Bergbau und Verhüttung noch zur Sicherung der Lieferketten (siehe auch Deutscher Bundestag 2020) führte. Die 2012 ins Leben gerufene Rohstoffallianz der deutschen Industrie (DW 2012) scheiterte 2016. Die Bundesregierung ist sich bewusst, dass kaum ein deutsches Unternehmen in den internationalen Bergbau investiert (Deutscher Bundestag 2020: 4). Die Notwendigkeit oder der Grund des Scheiterns bei der Entwicklung internationaler Bergbauunternehmen in Deutschland wurde scheinbar weder kritisch diskutiert noch wurden die Bedingungen angepasst. Die Verhüttung und Raffination wird durch europäische Vorschriften infrage gestellt, ein Verbot der Bleiverhüttung würde Wertschöpfungsketten und Recyclingkapazitäten des Trägermetalls beenden (Blanpain et al. 2019). Deutschlands Mangel an großen international tätigen Metallbergbauunternehmen, im Gegensatz zu international tätigen Bergbauunternehmen für Massenrohstoffe wie Gips, Salz, Karbonate und seine wenigen aktiven Buy-ins unterscheiden sich von diversifizierenden Strategien Chinas, Japans, Südkoreas oder der Vereinigten Staaten. Die Widerstandsfähigkeit von Lieferketten sollte bewertet und die Ursachen ermittelt werden, die die Einrichtung von Geschäftsmöglichkeiten verhindern. Des Weiteren sollte analysiert werden, ob in der gegenwärtigen COVID-19 Wirtschaftskrise strategische Maßnahmen ergriffen werden müssen, um die Rohstoff- und Recyclingkompetenz insolventer Wirtschaftsunternehmen zu erhalten.

Lagerhaltung

Im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern ist das verarbeitende Gewerbe für das deutsche BIP ebenso wichtig wie für das japanische. In China und Südkorea trägt das verarbeitende Gewerbe noch mehr zum BIP bei (Abb. 8). Die asiatischen Länder (China, Südkorea und Japan) sowie die USA diversifizieren die kritische Rohstoffversorgung durch die Lagerhaltung. Im Gegensatz zu den konkurrierenden, führenden Fertigungsländern (China, Südkorea, Japan, USA) lagert Deutschland weder Metalle, noch fördert oder fordert es von Unternehmen eine Lagerhaltung. Es wird berichtet, dass die Metalllagerung 1979 in Deutschland diskutiert (RPA 2012: 34 ff.) und aufgrund von Sparplänen aufgegeben wurde (Acatech 2017: 48). Der private Sektor (z. B. BlackRock New York, Deutsche Bank/Xtrackers, VanEck New York) bietet physisch gestützte börsengehandelte Rohstofffonds (ETCs) für Edelmetalle an, die sich seit den 2010er Jahren entwickelt haben. In ähnlicher Weise werden kupferbörsengehandelte Fonds (ETFs) als terminbasierte Rohstoffe und Aktien von Kupferunternehmen gelistet (Johnston 2020). Basis- und Edelmetalle werden an Aktienbörsen wie der LME bzw. dem London Bullion Market LBM, aber in der Regel direkt über Business-to-Business-Verträge gehandelt (z. B. Andersson et al. 2019). Nur wenige Metalle sind an der Börse notiert. Ob eine Ausweitung der börsennotierten Rohstoffe und Markttransparenz von den Produzenten und Erzeugerländern gewünscht würde, kann hinterfragt werden.



Die Lagerhaltung basiert auf Vorhersagen von Versorgungsengpässen (z. B. Elshkaki et al. 2016 über einen zukünftigen Kupfermangel, Grandell et al. 2016 über einen zukünftigen Mangel an Silber und SEEs und viele weitere Bewertungen). Das Angebot und die Nachfrage nach Rohstoffen sind jedoch dynamisch (Wellmer 2008). Manche Rohstoffe zeigen kurzzeitige Preisspitzen durch Marktmechanismen (Renner & Wellmer 2019), über die letzten Jahrzehnte wurden jedoch zahlreiche Rohstoffe preiswerter (Renner & Wellmer 2019, USGS 2000). Habib und Wenzel [2016] entwickeln beispielsweise eine dynamische Bewertung der kritischen SEEs Neodym und Dysprosium für Direktantriebswindkraftanlagen. Sie gehen von einem Anstieg der Rohstoffreserven und Möglichkeiten der Substitutionen bis 2050 aus und zeigen, dass eine Erschöpfung dieser SEE unwahrscheinlich ist. Einige Aspekte sind jedoch schwer vorherzusagen:

- i) Die unbekanntes Vorkommen (das sogenannte Geopotenzial, Wellmer 2008), die als Reserven auf den Markt gebracht werden, stiegen zwischen 1950 und 2013 um das 2,5-Fache schneller als der Verbrauch (Wellmer et al. 2019: xix). Dazu gehören entdeckte, wiederentdeckte und „nur wenige, aber dem Markt unbekannt“ Lagerstätten (z. B. Mt. Weld, Australien, siehe oben) (Abb. 4).**
- ii) Geopolitische Strategien wie der weltweite Kauf von Erzlagerstätten und Hütten oder bei der WTO vorgebrachte Streitschlichtungen (z. B. chinesisches SEE-Ausfuhrverbot 2009, wogegen die USA 2009 bei der WTO Klage einreichte, die 2013 beigelegt wurde (WTO 2013)).**
- iii) Erhöhte Transparenz der Bergwerksförderung und Raffinadeprodukte (z. B. WTO, Transparenzinitiative für die mineralgewinnende Industrie, z. B. D-EITE 2018, privatwirtschaftliche Transparenz, z. B. Apple 2020, Metallbörsen und andere). Dies kann durch einen international anerkannten Börsen- oder Risikokapitalmarkt unterstützt werden, der in der EU-27 fehlt.**
- iv) Diversifizierung der Investoren, um Spekulationen und künstliche Knappheit zu vermeiden.**
- v) Kürzere Zyklen technologischer Innovation und Produktion (neue Technologien, weniger Material oder Substitution), die neue und andere Elemente erfordern (z. B. Rückgang von Europium, siehe oben, Binnemans et al. 2018).**

Der Wettbewerb auf den globalen Rohstoffmärkten dürfte zunehmen, wenn sich die Märkte von einer Käufer-Dominanz zu einer Verkäufer-Dominanz wandeln. Bei den niedrigen Transportkosten eines globalen Marktes, kurzfristigeren Technologieinnovationen sowie der schnelleren Marktdurchdringung können sich die erforderlichen Metalle für technologische Innovationen jedoch schnell ändern. Das Risiko wird bei einem freien globalen, dynamischen und volatilen Markt minimiert, der bisher ein ausgewogenes Angebot und eine ausgewogene Nachfrage aufweist [Renner & Wellmer 2019]. Volatilität und Preise können durch Lagerhaltung beeinflusst werden und es bleibt fraglich, ob staatliche Politik oder behördliche Agenturen kurzfristige Engpässe des Marktes abmildern können [Tilton et al. 2018]. Auch sind geologische Engpässe vorerst nicht abzusehen [Acatech 2017]. Es kann kritisch diskutiert werden, ob die Lagerhaltung (entweder durch eine Agentur, die Industrie oder die Produktion im Land) für Deutschland in Betracht gezogen werden soll und wie ein freier globaler Markt aufrechterhalten werden kann.

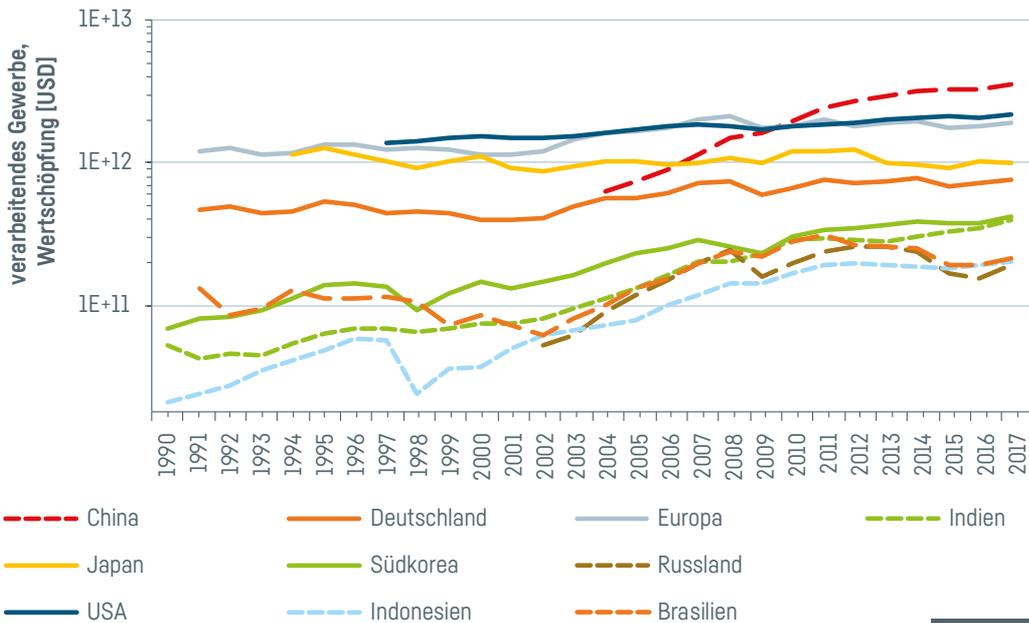


Abbildung 8 a)

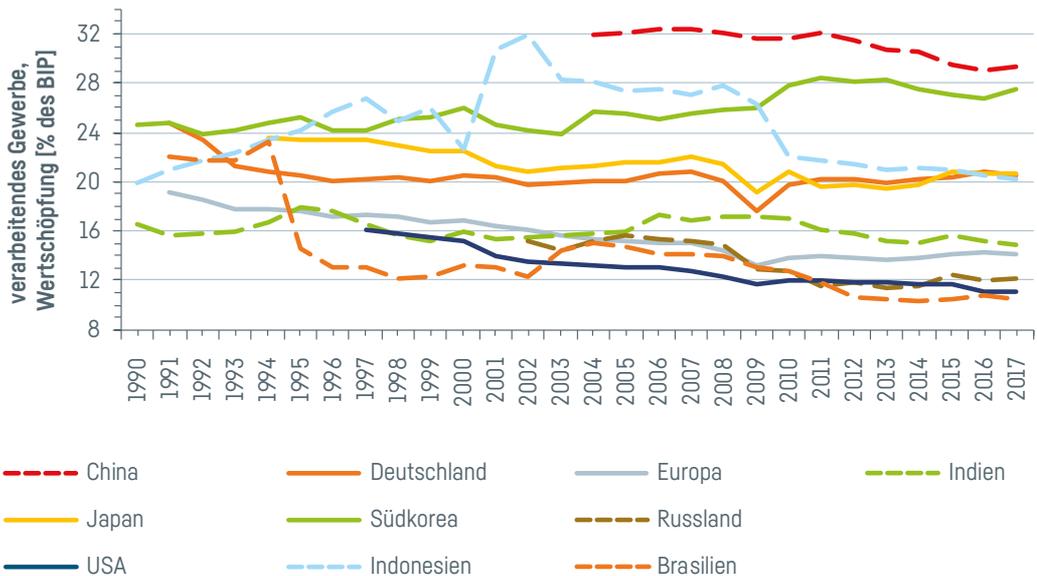


Abbildung 8 b)

Abb. 8 a): Die Wertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes ist in den USA und der EU ähnlich (in USD). Deutschland hat die höchste absolute Wertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes in der EU, sein Anteil in der EU hat in den letzten 16 Jahren zugenommen. Das jährliche Wachstum in den BRIIC-Ländern ist größer (gestrichelte Linien), aber die Wachstumsrate reduzierte sich seit 2011 (beachten Sie die logarithmische Skala). Abb. 8 b): Die Wertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes in %-BIP beträgt etwa 20 % für Japan und Deutschland, 15 % für Indien (ähnlich Italien) und etwa 10 % für Brasilien (ähnlich zu Frankreich, dem Vereinigten Königreich und den USA). Die meisten Länder mit hoher absoluter und proportionaler Wertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes (China, Südkorea, Japan und die USA) betreiben eine Lagerhaltung kritischer Rohstoffe (World Bank 2020a, b).

Wissensdreieck und Innovation

Das Wissensdreieck Bildung, Forschung und Wirtschaft fördert Innovation im gegebenen Rahmen des politischen Entscheidungsträgers (Abb. 9). Ein solches Innovationstetraeder muss sich mit STEEPLE-Aspekten (soziale, technologische, ökologische, wirtschaftliche, politische, rechtliche, ethische) befassen, um die Öffentlichkeit als immaterielle Genehmigungsbehörde einzubeziehen. Dazu müssen im Dialog Lösungen zur NIMBY-Haltung („not in my backyard!“, deutsch: „nicht in meinem Hinterhof/vor meiner Haustür!“), für die Explorations-, Bergbau-, Verhüttungs- und Raffinationsprojekte anfällig sind, gefunden werden. Nur wenige Regionen in Europa stehen dem Bergbau noch offen gegenüber oder führen ein nationales Bergbauprogramm durch (z. B. Swedish Mining Innovation 2020), auch wenn höchste soziale, technologische, ökologische und ethische Standards angewendet werden. Wellmer et al. (2019: 62) erklären den Widerstand gegen eine heimische Förderung von Rohstoffen in Deutschland mit der „German Angst“. Betrachtet man Heideggers (1927: 182 ff.) Differenzierung der Angst (ängstlich vor dem Unbestimmten) von Furcht (vor einem bestimmten Aspekt), kann Angst konstruktiv in neuem Wissen münden (Kukkola 2014). Angstgetriebene Öffentlichkeit, deren Wissen zu Exploration, Bergbau, Verhüttung/Raffination und Recycling begrenzt ist, wird von Emotionen getrieben und sollte durch eine unabhängige Wissensplattform informiert werden, wie sie z. B. von RohstoffWissen! (RohstoffWissen 2020) angestrebt wird.

Der steigenden globalen, europäischen und deutschen Nachfrage nach Rohstoffen kann mit Bildung und Innovation durch angewandte Forschung begegnet werden. Die Zusammenarbeit zwischen Universitäten und Industrie sollte Wissen und Innovation in den Bereichen Exploration, Bergbau, Metallurgie/Raffination und Recycling fördern. Einige Universitäten erschweren heute jedoch eine Zusammenarbeit mit der Industrie und geben enge Regeln und Vorschriften vor. Die rekursiven Interaktionen von Firmen mit Talentscouting und „lernenden Universitäten“ werden dabei häufig vernachlässigt und so wird der wechselseitige Austausch zunehmend eingeschränkt (Penkmann & Walsh 2009). Insgesamt wird ein Abwandern der Explorations-, Bergbau- und Metallurgie-/Raffinerieindustrie zu einer „Vergreisung“ von praktischem Know-how führen. Dies wirkt sich auf Innovation und Kapazitätsaufbau an akademischen Einrichtungen und bei Genehmigungsbehörden, auf den Rohstoffeinkauf bei Unternehmen und die Gewinnung von Arbeitskräften im Bereich Exploration, Bergbau und Metallurgie aus. Wie in der Vergangenheit werden jedoch die Ressourcen und Reserven auch in Zukunft weiter ansteigen, wenn durch wechselseitige Synergie Innovation vorangetrieben wird. Wenn der Bergbau vom obersten Kilometer der Erdkruste auf die obersten 3 km erweitert wird, würden beispielsweise die derzeitigen Kupferressourcen um den Faktor 10 erhöht und mindestens 5500 Jahre reichen (Kesler & Wilkinson 2008, Arndt et al. 2017: 15).

Politischer Entscheidungs- träger & Öffentlichkeit

Abbildung 9

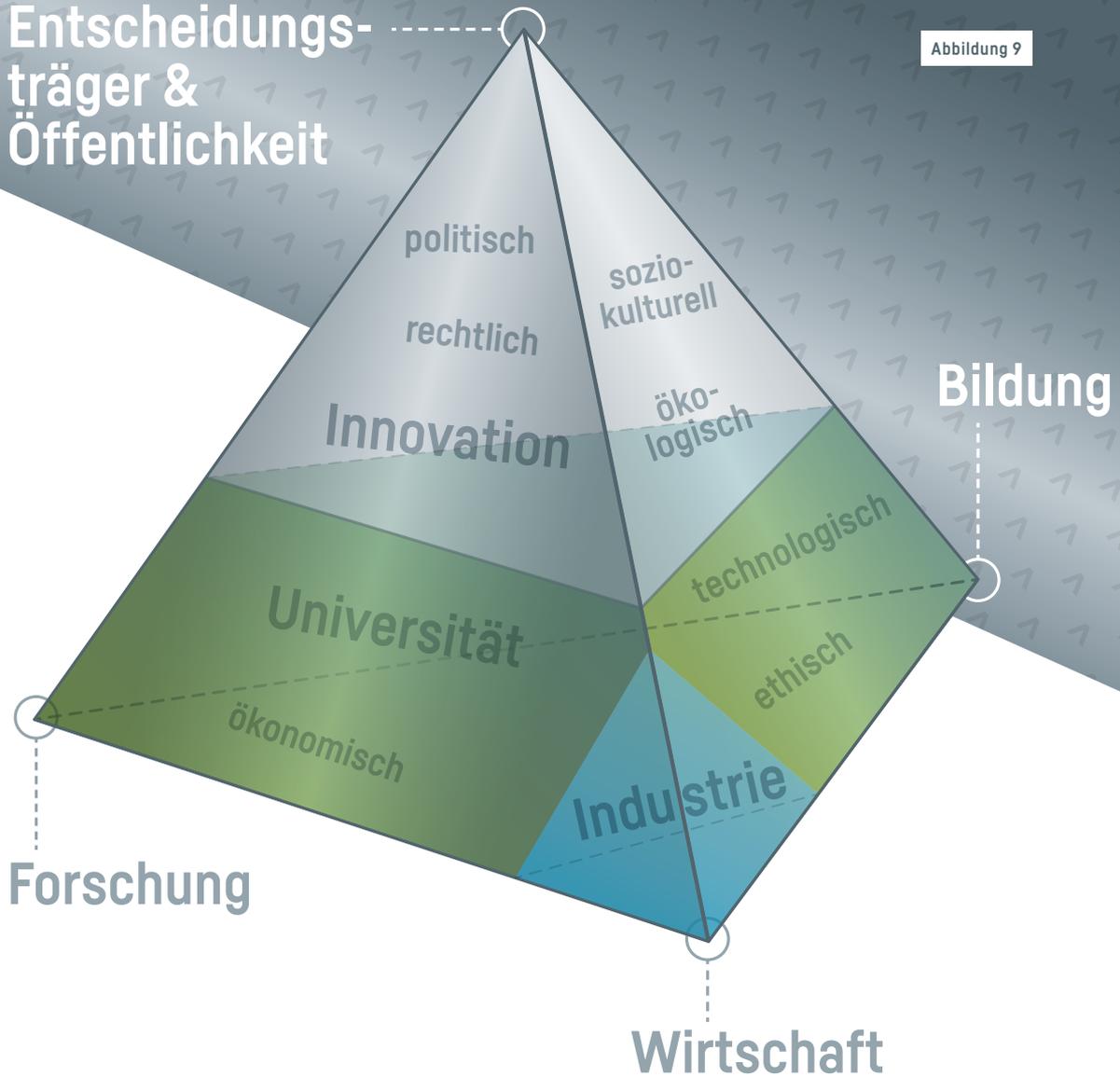
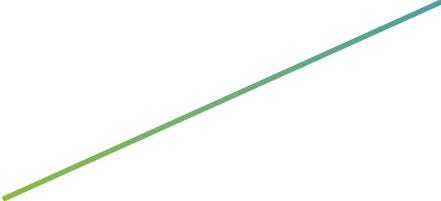


Abb. 9: Das Wissensdreieck Bildung, Forschung und Wirtschaft wird im rechtlichen Umfeld von politischen Entscheidungsträgern und Öffentlichkeit als Tetraeder aufgespannt, der Raum für Innovation bietet. Deutsche Technologieuniversitäten interagieren stark mit der Industrie mit angewandter Forschung und Innovation. Verlorene Industrien in den Explorations-, Bergbau-, Verhüttungs- und Raffinationssektoren reduzieren Innovation, was auch kaskadierende Auswirkungen auf andere Branchen in der Wertschöpfungskette haben kann, wie z. B. Materialeinkauf und Recyclingtechnologie.



Die deutschen und europäischen technologischen Innovationen im Recyclingbereich streben eine globale Marktführerschaft an, die sich in neuen Produkten, neuen Geschäftsmöglichkeiten und neuen Unternehmen widerspiegelt. In der Zwischenzeit fehlt es in den meisten EU-Ländern an Innovation im Primärrohstoffsektor für Exploration, Bergbau und Verhüttung/Raffination, obwohl Primärrohstoffe auch in Zukunft den Bedarf der Industrieländer dominieren werden und Verhüttung/Raffination für das Recycling essenziell ist.

Die Innovationskraft Chinas spiegelt sich in mehr als 1,2 Mio. nationalen Patenten pro Jahr wider. Im Jahr 2018 wurden in China national mehr Patente eingereicht als nationale und internationale Patente in Japan, der EU und den USA zusammen (Abb. 10). Dies geht mit Chinas Strategie „Made in China 2025“ einher, wonach nationale Unternehmen ausländisches geistiges Eigentum ersetzen (ISP 2018), internationale Standards und Lieferketten gestalten (CBBC 2018), um bis 2049 weltweit führend in der Highend-Produktion und Innovationstreiber zu sein (CBBC 2018).

Ein freier Markt sollte den langfristigen Zugang zu Rohstoffen gewährleisten, Marktversagen verhindern und Innovation entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Primärproduktion, effizienten Produktion und Substitution bis zum Recycling fördern (Tilton et al. 2018). Der Annahme begrenzter Rohstoffe steht ein Opportunitätskostenmodell gegenüber, das durch Innovation bei der Exploration, Bergbau (mariner Bergbau, Tiefbergbau u. a.), Aufbereitung, Metallurgie und Produktion neue Rohstoffe fördert oder substituiert (Castillo & Eggert 2020). Solange Bildung, Forschung und Wirtschaft interagieren, können Innovation und neue Technologien die Rohstoffnachfrage auch längerfristig sichern.

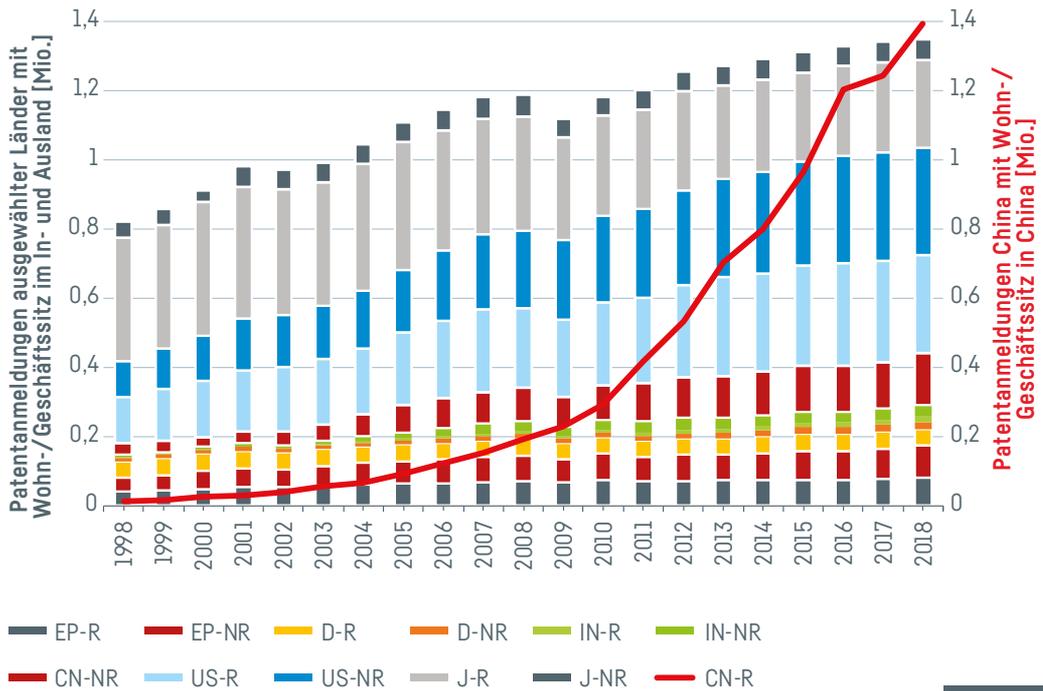


Abbildung 10

Abb. 10: Patentanmeldungen von Gebietsansässigen [-R] und Nichtansässigen [-NR] [CN – China, D – Deutschland, EP – Europäisches Patentamt, IN – Indien, US – USA, J – Japan]. Die Einwohneranträge in China (rote Linie) sind höher als die Anzahl der gebietsansässigen und gebietsfremden Anträge in Europa, Indien, Japan, den Vereinigten Staaten und der Anträge in China durch Nichtansässige zusammen [World Bank 2020c].

Schlussfolgerung

Ein Fazit, das zu denken gibt – und konsequent entschlossenes Handeln fordert

1. Der Rohstoffbedarf steigt.

Der globale Rohstoffbedarf an Metallen wird aufgrund einer steigenden Bevölkerung, wachsendem Wohlstand und neuer Technologien absolut und per capita weiterwachsen. Der Ausbau der rohstoffintensiven Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien sowie von Batterien und Brennstoffzellen für die Mobilitätswende führt zu einem stark wachsenden Bedarf an Rohstoffen.

Wie zahlreiche Studien zeigen, kann der weltweite Rohstoffbedarf auch in den nächsten Jahrzehnten nicht allein durch Recycling gedeckt werden. Dies betrifft die notwendigen Mengen, Raten und Kosten wie auch die für viele technische Prozesse und die Produktqualität erforderliche Reinheit.

2. Die Rahmenbedingungen ändern sich.

China, Japan, Südkorea und die USA bieten nationale Strategien zur Unterstützung der nationalen Industrien an, die das gesamte Spektrum der internationalen Exploration, des Bergbaus, der Verhüttung und Raffination, der Lagerhaltung, des Recyclings und der Förderung neuer Technologien abdecken.

Deutschland konzentriert sich stattdessen auf neue Technologien und Recycling mit der Gefahr, dass Explorations-, Bergbau- und Metallurgie-/Verhüttungs-/Raffinerie-Know-how und der Zugang zu Primärrohstoffen verloren gehen. Obwohl bilaterale Rohstoffabkommen zwischen Deutschland und mehreren Ländern geschlossen wurden, scheint dies bisher weder zu neuen Lieferketten noch zu neuen Unternehmen oder einer gesicherten Rohstoffversorgung geführt zu haben.

Chinesische und indische Firmen kaufen weltweit und auf dem europäischen Kontinent Minen und Hütten. Europa und Deutschland sind beim weltweiten Abbau von Primärmetallen nicht wettbewerbsfähig und beherbergen auch nicht das gesamte Spektrum der Verhüttung und Raffination. Weder in der EU noch in Deutschland gibt es ein großes, weltweit tätiges Top-30-Bergbauunternehmen mit einem Schwerpunkt im Metallsektor, das einen signifikanten Beitrag zur Deckung des Rohstoffbedarfs liefert. Auch eine international sichtbare Rohstoffbörse gibt es in der EU-27 nicht. Ob die deutsche Rohstoffstrategie im Vergleich zu der anderer Industrie- und Schwellenländer und bei zunehmendem globalem Wettbewerb resilient ist, sollte kritisch diskutiert werden.

3. Ohne Verhüttung und Raffination kein Recycling.

Neue, innovative Produkte werden auch in Zukunft neue Primärrohstoffe erfordern, bis nach ausreichender Marktdurchdringung eine Kreislaufwirtschaft aufgebaut werden kann. Für das Recycling von Schrott und Primärrohstoffen sind moderne Verhüttungs- und Raffinationstechnologien essenziell.

Um die Gewinnung kritischer Rohstoffe und deren Kreislaufführung auszubauen, ist der Erhalt und Aufbau des gesamten Spektrums von Hütten und Raffinerien, die kritische Nebenelemente aus der Schmelze gewinnen, erforderlich. Bisher können nicht alle Trägerelemente wie SEEs in der EU verarbeitet werden.

Eine nachhaltige Rohstoffgewinnung und -aufbereitung muss hinsichtlich des Energieaufwandes, der Klimabelastungen und Umweltwirkungen präzise analysiert werden – unabhängig davon, ob Rohstoffe aus Minen oder durch Kreislaufführung gewonnen werden.

4. Innovation und freien Markt fördern.

Die Zusammenarbeit zwischen Hochschulen und Rohstoffindustrie fördert Innovation in einem gegenseitigen Austausch, der durch politische Rahmenbedingungen unterstützt werden kann. Obwohl mehrere Programme von europäischen und deutschen Entscheidungsträgern ins Leben gerufen wurden, fehlen lokal günstige Bedingungen wie der Zugang zu Risikokapital für neue oder wachsende Unternehmen, die im Bereich Metallexploration, Bergbau, Verhüttung und Raffination mit führendem Marktanteil tätig sind.

Nur mit global wettbewerbsfähigen Technologien von der Exploration über die Verhüttung bis zum Recycling kann der Gefahr des Rohstoffmangels begegnet werden. Neue Technologien ermöglichen, in einem freien Markt die notwendigen Rohstoffmengen und -qualitäten für die Digitalisierung, Energie- und Mobilitätswende verfügbar zu machen, den Rohstoffeinsatz im Produkt weiter zu verringern und das Recycling zu erhöhen. Mit neuer Sensortechnik und weiterer Digitalisierung wird die Effizienz der Rohstoffgewinnung und Kreislaufführung weiter verbessert und neue Märkte erschlossen.

Eine klimaneutrale Verhüttung und Raffination von Schrott und Primärrohstoffen oder die Zementherstellung mit einer Nutzbarmachung von CO₂ als organischem Rohstoff können durch [Energie]-Rohstoffe wie Wasserstoff realisiert werden, wenn notwendige Volumina zu wettbewerbsfähigen Kosten verfügbar sind. Attraktive Prozesse und Produkte führen zu neuen Märkten und sichern den Zugang zu Rohstoffen.

Dass aktuelle geopolitische Strategien einen offenen Rohstoffmarkt fördern, darf bezweifelt werden. Da mehrere deutsche Metallunternehmen derzeit wegen der Coronakrise Konkurs anmelden, werden die nationalen und europäischen Kompetenzen von Exploration, Bergbau und Metallurgie wahrscheinlich weiter schwinden, die strategische Autonomie verloren gehen und die Abhängigkeit weiter zunehmen.

Literaturverzeichnis

Acatech 2017. Rohstoffe für die Energiewende. 104 S., <https://www.acatech.de/publikation/rohstoffefuer-die-energiewende-wege-zu-einer-sicheren-und-nachhaltigen-versorgung/>

AEI 2020. China global investment tracker. American Enterprise Institute, <https://www.aei.org/china-global-investment-tracker/>, accessed 4/2020

Airbus 2018. Price List Press Release. <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/01/airbus-2018-price-list-press-release.html>

Alvarado S, Maldonado P, Jaques I 1999. Energy and environmental implications of copper production. *Energy* 24, 307-316

Andersen TB, Jensen S, Skosvgaard CV 2016. The heavy plow and the agricultural revolution in Medieval Europe. *Journal of Development Economics* 118, 133-149, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jdeveco.2015.08.006>

Andersson M, Söderman ML, Sanden BA 2019. Challenges of recycling multiple scarce metals: The case of Swedish ELV and WEEE recycling. *Resources Policy* 63, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101403>

Apple 2020. Smelter and refinery list. 10 pp.

Arndt NT, Fontboté L, Hedenquist JW, Kesler SE, Thompson JFH, Wood DG 2017. Future global mineral resources. *Geochemical Perspectives* 6, 171 pp.

Aurubis 2020. Zahlen & Fakten. <https://www.aurubis.com/de/uber-aurubis/ubersicht>

Baker & McKenzie International 2017. Cross-border listings – A guide for mining companies. 22 pp.

Baldé CP, Forti V, Gray V, Kuehr R, Stegmann P 2017. The global e-waste monitor. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna

Bartekova E, Kemp R 2016. Critical raw material strategies in different world regions. Working Paper Series, Maastricht University, 52 pp.

BGR 2016a. Mineralische Rohstoffe für die Energiewende. *Commodity Top News* 50, 8 pp.

BGR 2016b. Supply and demand of lithium and gallium. 50 pp.

BGR 2018. Chinas Rohstoffpolitik für Seltene Erden. *Commodity Top News* 57, 8 S.

BGR 2019. Deutschland – Rohstoffsituation 2018. 144 S., Hannover

BGS 2020a. World-mineral production 2014-2018. 92 pp. <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsUK/statistics/world-Statistics.html>

BGS 2020b. Production of copper mine. MineralsUK, British Geological Survey, <https://www.bgs.ac.uk/mineralsUK/statistics/wms.cfc?method=listResults&dataType=Production&commodity=40&dateFrom=2007&dateTo=2017&country=&agreeToTsAndCs=agreed>

Bhamra R, Dani S, Burnard K 2011. Resilience: The concept, a literature review and future directions. *International Journal of Production Research*, 49(18), 5375-5393. DOI: 10.1080/00207543.2011.563826

Binnemans K, Jones PT 2015. Rare earths and the balance problem. *J. Sustain. Metall.* 1, 29-38, DOI: 10.1007/s40831-014-0005-1

Binnemans K, Jones PT, Müller T, Yurramendi L 2018. Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? *Journal of Sustainable Metallurgy* 4, 126-146, <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0162-8>

Blanpain B, Reuter M, Malfliet A 2019. Lead metal is fundamental to the circular economy. *Policy Brief February*, 1-7

BMWi 2010. Rohstoffstrategie der Bundesregierung. 26 S.

BMWi 2020. Rohstoffstrategie der Bundesregierung – Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen. 41 S.

Bonnet C, Seck GS, Hache E, Simoen M, Carcanague S 2019. Copper at the crossroads: Assessing the interactions of the low carbon energy transition with a non-ferrous and structural metal. Working Paper 2019-5, 52 pp.

Boulamanti A, Moya JA 2016. Production costs of the non-ferrous metals in the EU and other countries: Copper and zinc. *Resources Policy* 49, 112-118

Boykoff P, Sebastian C 2019. This company is America's best chance to loosen China's grip on rare earths. CNN News, <https://edition.cnn.com/2019/07/03/tech/rare-earth-mountain-pass-california-china/index.html>

BRGM 2015. Panorama 2014 du marché des Terres Rares. Report BRGM/RP-65330-FR, 193 pp., http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Panoramas_Metaux_Strateg/rp-65330-fr-terresrarespublic.pdf

- Bundgaard AM, Remmen A 2018.** Designing out waste. Ministry of Environment and Food Denmark, 158 pp.
- Calvo G, Mudd G, Valero A, Valero A 2016.** Decreasing ore grades in global metallic mining: A theoretical issue or a global reality? *Resources* 5, DOI: 10.3390/resources5040036
- Castillo E, Eggert R 2020.** Reconciling diverging views on mineral depletion: A modified cumulative availability curve applied to copper resources. *Resources, Conservation and Recycling* 161, 104896, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104896>
- CBBC 2018.** Made in China 2025 – China manufacturing in the 21st century. China-Britain Business Council, 23 pp.
- CDU/CSU Securing Germany's and Europe's supply of raw materials.** Strategy Paper of the CDU/CSU Parliamentary Group, July 6th 2010, 11 pp.
- Chan RW 1980.** Alloy design: A historical perspective. *Proc. Indian Acad. Sci. [Engg. Sci.]*, 3, 255-260
- Ciacci L, Vassura I, Passarini F 2018.** Shedding light on the anthropogenic europium cycle in the EU-28. Marking product turnover and energy progress in the lighting sector. *Resources* 7, DOI: 10.3390/resources7030059
- Copper Alliance 2019.** Copper in sustainable energy. Report A6168, 6 pp.
- Credit Suisse 2017.** Aust gold and copper – sector review. *Equity Research Metals & Mining*, 33 pp.
- Daehn KE, Cabrera Serrenho A, Allwood JM 2017.** How will copper contamination constrain future global steel recycling? *Environmental Science and Technology* 51, 6599-6606
- Dawar K 2020.** Official export credit support: competition and compliance Issues. *Journal of World Trade*, 54[3], 373 – 395.
- DEFRA 2012.** A Review of National Resource Strategies and Research. 104 pp.
- D-EITE 2018. Bericht für 2016.** 133 S.
- De la Torre E, Vargas E, Ron C, Gámez S 2018.** Europium, Yttrium, and Indium Recovery from Electronic Wastes. *Metals* 2018, 8, 777; DOI: 10.3390/met8100777
- DERA 2013.** Rohstoffrisikobewertung – Kupfer. 31 pp.
- DERA 2019.** DERA-Rohstoffliste 2019 – DERA Rohstoffinformationen 40, 116 S.
- DERA 2020.** Rohstoff-Trends Q1/2020. 10 S.
- Deutscher Bundestag 2020.** Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Marcel Klinge, Olaf in der Beek, Michael Theurer, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP-Drucksache 19/16562 – Rohstoffpartnerschaften. Drucksache 19/17224
- DoE 2011.** Critical materials strategy. December 2011
- DoI 2019.** The United States and Australia Formalize Partnership on Critical Minerals. Press Release, <https://www.doi.gov/pressreleases/united-states-and-australia-formalize-partnership-critical-minerals>
- DNV 2019.** Energy transition outlook 2019 – a global and regional forecast to 2050. 287 pp.
- Drexhage JR, La Porta D, Hund KL, McCormick MS, Ningthoujam J 2017.** The growing role of minerals and metals for a low carbon future. World Bank Group, EGPS (Extractives Global Programmatic)
- DW 2012.** German industry sets up alliance to secure raw materials. Online news, <https://p.dw.com/p/13tHt>, accessed 2/2020
- Elshkaki A, Graedel TE, Ciacci L, Reck BK 2016.** Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. *Global Environmental Change* 39 [2016], 305–315
- ERECON 2015.** European Rare Earths Competency Network (ERECON). https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon_en
- EU 2017.** Study on the review of the list of Critical Raw Materials – Critical Raw Materials Factsheets, 517 pp.
- EU 2018a.** Raw Materials Scoreboard. <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=scoreboard2018#/>
- EU 2018b.** WEEE compliance promotion exercise – Final report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/09c7215a-49c5-11e8-beld-01aa75ed71a1/language-en>, accessed 10/2019
- EU 2018c.** Report on critical raw materials in the circular economy. 76 pp.
- Eurostat 2020a.** Population change – Demographic balance and crude rates at national level. https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=demo_gind&lang=en
- Eurostat 2020b.** Population projections. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tps00002/default/table?lang=en>

- Fedorinova Y 2019.** Russia Holds Rare Earths But Mines Little – that's changing. Bloomberg, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-05-31/russia-owns-lots-of-rare-earth-but-mines-little-that-s-changing>, accessed 2/2020
- Fraunhofer ISE 2020.** Recent Facts about Photovoltaics in Germany. 98 pp.
- Frenzel M, Kullik J, Reuter MA, Gutzmer J 2017.** Raw material 'criticality' – sense or nonsense? *Journal of Physics D: Applied Physics* 50, DOI:10.1088/1361-6463/aa5b64
- Gardner L, Colwill J 2018.** A framework and decision support tool for improving value chain resilience to critical materials in manufacturing, *Production & Manufacturing Research*, 6:1, 126-148, DOI: 10.1080/21693277.2018.1432428
- Golding B, Golding SD 2017.** Metals, Energy and Sustainability – The Story of Doctor Copper and King Coal. Springer, 196 pp.
- Grandell L, Lehtilä A, Kivinen M, Koljonen T, Kihlman S, Lauri LS 2016.** Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies. *Renewable Energy* 95, 53-62
- Green MA, Hishikawa Y, Dunlop ED, Levi DH, Hohl-Ebinger J, Yoshita M, Ho-Baillie AWY, 2019.** Solar cell efficiency tables (Version 53). *Prog Photovolt Res Appl.*, 27, 3-12, DOI: 10.1002/pip.3102
- Habib K, Wenzel H 2016.** Reviewing resource criticality assessment from a dynamic and technology specific perspective – using the case of direct-drive wind turbines. *Journal of Cleaner Production* 112, 3852-3863
- Hagelüken C 2006.** Recycling of electronic scrap at Umicore's integrated metals smelter and refinery. *World of Metallurgy – Erzmetall* 59, 152-161
- Hagelüken C 2014.** Recycling of [critical] raw materials. In Gunn G (ed.): *Critical metals handbook*, 41-69
- Harder J 2018.** Metal ore mining in Europe. *AT Mineral Processing*, https://www.at-minerals.com/en/artikel/at_Metal_ore_mining_in_Europe_3257608.html
- Heidegger M 1927.** *Sein und Zeit*. Verlag Niemeyer, Aug. 2001
- Herat S 2008.** Recycling of cathode ray tubes (CRTs) in electronic waste. *Clean* 36(1), 19-24
- Hertwich EG, Gibon T, Bouman EA, Arvesen A, Suh S, Heath GA, Bergesen JD, Ramirez A, Vega MI, Shi L 2015.** Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *PNAS*, 112, 6277-6282
- Hilgers C, Becker I 2020.** Lokale Verfügbarkeit von Rohstoffen bei steigender globaler Nachfrage – Aspekte zu resilienten Ressourcenstrategien. *World of Mining* 72(5), 254-263
- Hilgers C, Becker I, Dehn F 2020.** Geologische und STEEPLE-Aspekte zur überregionalen Verfügbarkeit von Rohstoffen zur Herstellung von Beton. *beton* 70(9), 326-335
- Holmberg K, Kivikytö-Reponen P, Härkissaari P, Valtonen K, Erdemir A 2017.** Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International* 115, 116-139
- Home A 2020.** EU's industrial strategy is being wrecked by Covid-19. Reuters press release. <https://de.reuters.com/article/eu-metals-ahome/column-eus-industrial-strategy-is-being-wrecked-by-coronavirus-andy-home-idINL8N2D15E9>
- Huotari M, Kratz A 2019.** Beyond investment screening - Expanding Europe's toolbox to address economic risks from Chinese state capitalism. Bertelsmann Stiftung, 46 S.
- Hübner T, Guminski A, Rouyre E, von Roon S 2020.** Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief der NE-Metallindustrie. BMBF Report, 21 S., https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-metall.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- IEA 2019.** Oil security: The global oil market remains vulnerable to a wide range of risk factors. <https://www.iea.org/areas-of-work/ensuring-energy-security/oil-security>, accessed 11/2019
- IAEA 2019.** Thorium resources as co- and by-products of rare earth deposits. Report IAEA-TECDOC-1892, 69 pp.
- ICA 2017a.** Annual Report. International Copper Association. <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2018/03/ica-annual-report-2017-FINAL-LOW-RES.pdf>
- ICA 2017b.** Copper recycling. 3 pp., <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2017/03/ica-copper-recycling-201712-A4-HR2.pdf>
- IES 2019.** Metals for a climate neutral Europe – a 2050 blueprint. <https://www.eurometaux.eu/media/1997/exec-summary-metals-2050.pdf>
- ISP 2018.** Made in China 2025. ISP Institute of Security Development Policy, <https://isd.eu/publication/made-china-2025/>
- ISRI 2019.** 2017 World scrap trade export flow. <https://www.isri.org/docs/default-source/commodities/international-scrap-trade-database/world-flow-comtrade-2019-28mar2019.pdf?sfvrsn=8>

- Jamasmie C 2018.** China's Zijin wins race for Serbia's largest copper mine. Mining.com, August 31, <https://www.mining.com/chinas-zijin-wins-race-serbias-largest-copper-mine/>, accessed 2/2020
- Jamasmie C 2019** Poland's KGHM hits production record, expects Sierra Gorda to exceed target. <https://www.mining.com/polands-kgm-hits-production-record-thanks-sierragorda-copper-mine/>, accessed 6/2020
- Jaroni MS, Friedrich B, Letmathe P 2019.** Economical feasibility of rare earth mining outside China. *Minerals*, 9, 576; doi:10.3390/min9100576
- Johnston M 2020.** Top copper ETFs. Investopedia, <https://www.investopedia.com/articles/etfs/top-copper-etfs/>, accessed 3/2020
- Karanovic & Partners 2018.** Zijin Mining Officially Takes Over RTB Bor. <https://www.karanovicpartners.com/news/zijin-mining-takes-over-rtb-bor/>
- Kaufmann D, Kraay A, Mastruzzi M 2010.** The Worldwide Governance Indicators: Methodology and Analytical Issues. World Bank Policy Research Working Paper No. 5430
- Kesler SE, Wilkinson BH 2008.** Earth's copper resources estimated from tectonic diffusion of porphyry copper deposits. *Geology* 36, 255-258
- Kramer DA 2015.** Status as strategic metals. In Hanusa TP [ed.]: *The Lightest Metals: Science and Technology from Lithium to Calcium*. 57-66
- Krausmann F, Lauk C, Haas W, Wiedenhofer D 2018.** From resource extraction to outflow of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900-2015. *Global Environmental Change* 52, 131-140
- Kreuzer OE, Etheridge MA, Guj P, McMahon ME, Holden DJ 2008.** Linking mineral deposit models to quantitative risk analysis and decision-making in exploration. *Economic Geology* 103, 829-850
- Kukkola J 2014.** Fear as 'disclosure of truths': The educational significance of an existential-phenomenological insight. *Meta: Research in Hermeneutics, Phenomenology, and Practical Philosophy*, 6, 378-396
- Long KR, Van Gosen BS, Foley NK, Cordier D 2010.** The principal rare earth elements deposits of the United States – A summary of domestic deposits and a global perspective: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5220, 96 pp. Available at <http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5220/>
- Luft J, Ingham H 1955.** The Johari window, a graphic model of interpersonal awareness. Proceedings of the western training laboratory in group development. University of California, Los Angeles.
- Lynas 2020.** Projects. <https://www.lynascorp.com/projects/>
- Makkonen HV, Halkoaho T, Konnunaho J, Rasilainen K, Kontinen A, Eilu P 2017.** Ni-[Cu-PGE] deposits in Finland – Geology and exploration potential. *Ore Geology Reviews* 90, 667-696
- Månberger A, Stenqvist B 2018.** Global metals flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development. *Energy Policy* 119, 226-241
- Mancheri NA, Sprecher B, Bailey G, Ge J, Tucker A 2019.** Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience. *Resources, Conservation & Recycling* 142, 101-112
- Maurell-Lopez SM, Ayhan M, Eschen M, Friedrich B 2012.** Autotherme Metallrückgewinnung aus WEEE-Schrott. Kongress- oder Tagungsbeitrag, *Recycling und Rohstoffe*, Band 5, 413-427, http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/new/images/pages/publikationen/maurell_lopez_id_4587.pdf
- MBI Metals 2012.** Chinesische Kupferhütten erhalten geringere Hüttenlöhne von BHP Billiton. <http://metals.mbi-infosource.de/news/page/125/>
- McKinsey 2019.** Clean energy increase renewable. 30 pp.
- More E, Probert D, Phaal R 2015.** Improving Long-Term Strategic Planning: An Analysis of STEEPLE Factors Identified in Environmental Scanning Brainstorms. Proceedings of PIC MET '15: Management of the Technology Age, 381-394
- Mudd GM 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, revised April 2009
- Nakajima K, Daigo I, Nansai K, Matsubae K, Takayanagi W, Tomita M, Matsuno Y 2018.** Global distribution of material consumption: Nickel, copper, and iron. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 369-374
- Nassar NT, Graedel TE, Harper EM 2015.** By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science Advances*, DOI: 10.1126/sciadv.1400180
- Northey S, Mohr S, Mudd GM, Weng Z, Guirco D 2014.** Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 190-201
- NREL 2015.** The availability of indium: The present, medium term, and long term. 79 pp.

OECD 2016. Recommendation of the council on common approaches for officially supported export credits and environmental and social due diligence (the „common approaches“). TAD/ECG(2016)

OECD 2019. Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>

OECD 2020. GDP long-term forecast. <https://data.oecd.org/gdp/gdp-long-term-forecast.htm>

Paben J 2020. Favorable market conditions drive smelter profits. E-Scrap News, February, <https://resource-recycling.com/e-scrap/2020/02/13/favorable-market-conditions-drive-smelter-profits/>

Passarini F, Ciacci L, Nuss P, Manfredi S 2018. Material flow analysis of Aluminium, Copper, and Iron in the EU-28. Report EUR 29220 EN, Publications Office of the European Union, DOI: 10.2760/1079, JRC111643

Penkmann M, Walsh K 2009. The two faces of collaboration: impacts of university-industry relations on public research. *Industrial and Corporate Change*, 18, 1033-1065, DOI: 10.1093/icc/dtp015

PPM 2018. Gallium – Quellen und Rohstoffsicherheit. DERA Industrieworkshop zur Verfügbarkeit von Gallium. Vortrag F Riecken, PPM Pure Metals GmbH

PPM 2019. PPM Pure Metals – Informationen für die Öffentlichkeit (08.2019 Standort Langelsheim), <https://recylex.eu/de/ppm-pure-metals/>, accessed 12/2019

PwC 2019. Mine 2019 – resourcing the future. <https://www.pwc.com/gx/en/energy-utilities-mining/publications/pdf/mine-report-2019.pdf>

Rabago KR, Lovins AB, Feiler TE 2002. Energy and sustainable development in the mining and minerals industries. World Business Council, Mining Minerals and Sustainable Development, report No. 41, 96. pp.

Ralev R 2020. Timok copper-gold mine in Serbia to reach production target in 2023. <https://seenews.com/news/timok-copper-gold-mine-in-serbia-to-reach-production-target-in-2023-zijin-682943>

Rankin J 2012. Energy use in metal production. In: High temperature processing symposium. Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, February 3-4, 7-9

RCS 2017. Blockchain for traceability in minerals and metals supply chains: Opportunities and challenges. Resource Consulting Services Limited (RCS Global) report, 20. Dec. 2017, 20 pp.

RCS 2019. Volvo cars joins responsible sourcing blockchain network launched by RCS Global IBM, Ford, and Volkswagen Group. <https://www.rcsglobal.com/volvo-cars-joins-responsible-sourcing-blockchain-network-launched-rcs-global-ibm-ford-volkswagen-group/>, accessed 12/2019

Reardon AC 2011. Discovering Metals – A Historical Overview. Metallurgy for the Non-Metallurgist, Second Edition, ASM International

Rees T, Mkandawire V, Rudgard O 2019. Rivals dig deeper in race for rare earth minerals. *The Daily Telegraph*, 29 Oct.

Renner S, Wellmer FW 2019. Volatility drivers on the metal market and exposure of producing countries. *Mineral Economics*, <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00200-8>

Reuter MA, Kojo IV 2012. Challenges of metals recycling. *Materia* 2, 50-57

Reuter MA, van Schaik A, Gutzmer J, Bartie N, Abadías-Llamas A 2019. Challenges of the Circular Economy: A Material, Metallurgical, and Product Design Perspective. *Annual Review of Materials Research* 49, 253-274

Reuter MA, Verhoef EV 2004. A dynamic model for the assessment of the replacement of lead on solders. *Journal of Electronic Materials* 33, 1567-1580

Rietveld E, Boonman H, van Harmelen T, Mauck M, Bastein T 2018. Global energy transition and metal demand – in introduction and circular economy perspective. TNO report, 51 pp.

RohstoffWissen 2020. RohstoffWissen! – Initiative zur Förderung der Rohstoffkultur in Deutschland. <http://www.rohstoffwissen.org/>, accessed 4/2020

Rötzer N, Schmidt M 2018. Decreasing Metal Ore Grades – Is the Fear of Resource Depletion Justified? *Resources* 7, DOI:10.3390/resources7040088

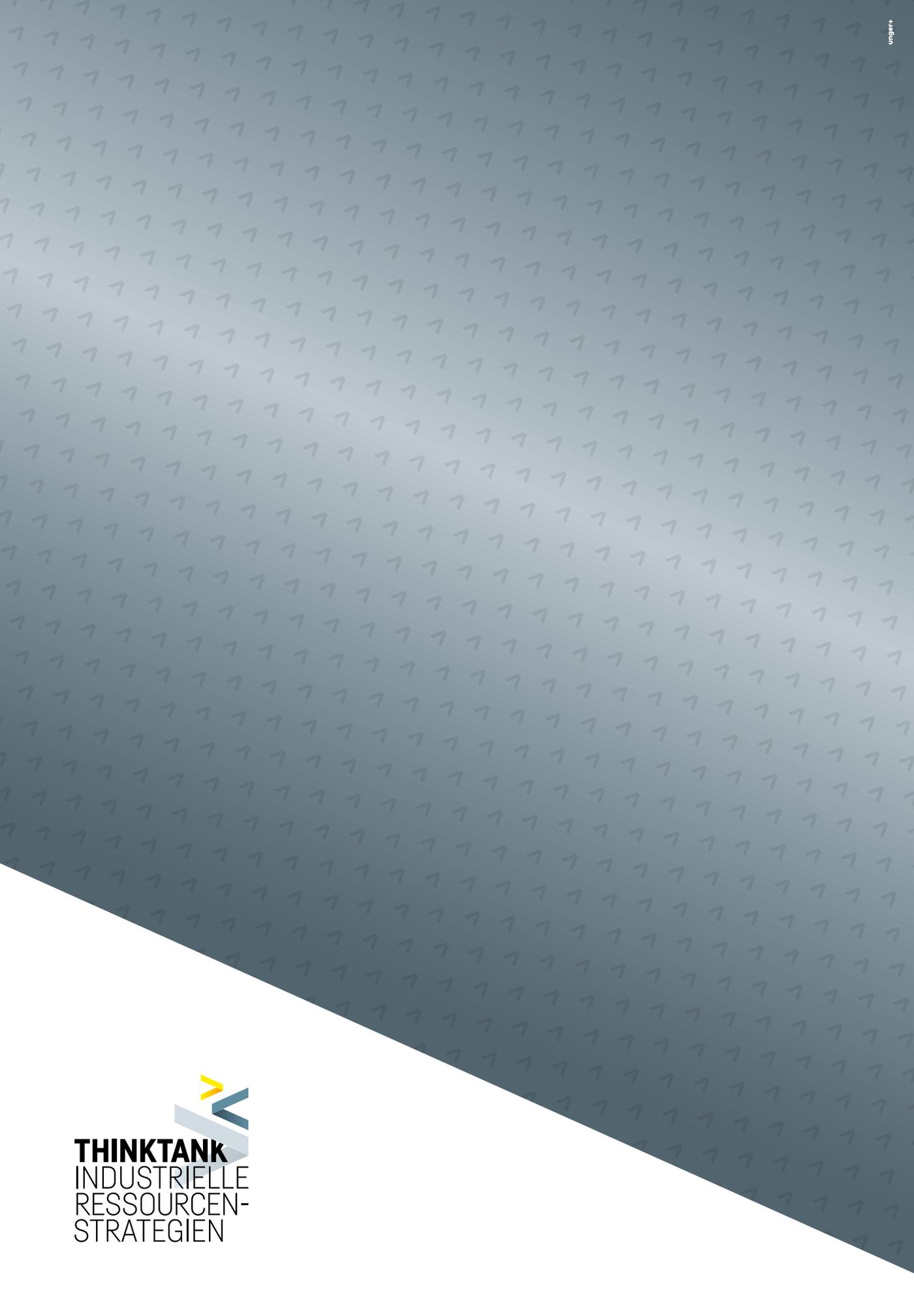
Rötzer N, Schmidt M 2020. Historical, current and future energy demand from global copper production and its impact on climate change. *Resources*, 9, <https://doi.org/10.3390/resources9040044>

Rose E 2020. China-backed coal plants on EU's doorstep hide huge carbon costs. *Climate Home News*, Published on 14/01/2020, <https://www.climatechange.news.com/2020/01/14/china-backed-coal-plants-eu-doorstep-hide-huge-carbon-costs/>

Roser M, Ritchie H, Ortiz-Ospina E 2020. World Population Growth. Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/world-population-growth>

- RPA 2012.** Stockpiling of non-energy Raw Materials. Final Report, Risk & Policy Analysts Limited, UK, 218 pp.
- Schäfer P, Schmidt M 2020.** Discrete-point analysis of the energy demand of primary versus secondary metal production. *Environmental Science & Technology*, 54, 507-516
- Schmidt M, Schäfer P, Rötzer N 2020.** Primär- und Sekundärmetalle und ihre Klimarelevanz. In: Holm [ed.]: Berliner Recycling- und Sekundärrohstoffkonferenz. Berlin, 3-16
- Schrijvers D and 26 co-authors 2020.** A review of methods and data to determine raw material criticality. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104617
- Seifert G, Schwelder I, Schneider J, Wehrspohn RB 2015.** Light management in solar modules. In Wehrspohn RB, Rau U, Gombert A. eds]: Photon management on solar cells. Wiley VCH, 323-346
- Servant J-C 2019.** China steps in as Zambia runs out of loan options. *The Guardian / Le Monde diplomatique*, <https://www.theguardian.com/global-development/2019/dec/11/china-steps-in-as-zambia-runs-out-of-loan-options>
- Simoes AJG, Hidalgo CA 2011.** The Economic Complexity Observatory: An analytical tool for understanding the dynamics of economic development. Workshops at the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence. <https://oec.world/en/profile/hs92/8105/>, accessed 8/2019
- Sprecher B, Daigo I, Spekkink W, Vos M, Kleijn R Murakami S, Kramer GJ 2017.** Novel Indicators for the Quantification of Resilience in Critical Material Supply Chains, with a 2010 Rare Earth Crisis Case Study. *Environ. Sci. Technol.* 2017, 51, 3860-387, DOI 10.1021/acs.est.6b05751
- STATISTICA 2020.** Production of copper concentrate in Poland 2014-2019. <https://www.statista.com/statistics/1086636/poland-production-of-copper-in-concentrate/>, accessed 6/2020
- Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, Gaffney O, Ludwig C 2015.** The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 1-18
- STRADE 2017.** European Union and raw material engagement with developing countries – a review. 44 S
- Swedish Mining Innovation 2020.** Mining innovation for a sustainable future – Strategic innovation program for the Swedish Mining and Metal producing industry. <https://www.sipstrim.se/>, accessed 6/2020
- Tilton JE, Crowson PCF, DeYoung JH, Eggert RG, Ericsson M, Guzman JI, Humphreys D, Lagos G, Maxwell P, Radetzki M, Singer DA, Wellmer FM 2018.** Public policy and future mineral supplies. *Resources Policy* 57, 55-60
- UBA 2016.** Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“. Von Prakash S, Dehoust G, Gsell M, Schleicher T, Stamminger R, Report UBA-FB 002290, 314 S.
- Uberman R 2014.** Valuation of mineral resources in selected financial and accounting systems. *Natural Resources*, 2014, 5, 496-506
- UN 2019.** Ziele für eine nachhaltige Entwicklung – Bericht 2019. 60 S. <https://www.un.org/Depts/german/pdf/SDG%20Bericht%20aktuell.pdf>
- UNEP 2013.** Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure – a Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter MA, Hudson C, van Schaik A, Heiskanen K, Meskers C, Hagelüken C, 316 S.
- UN DESA 2017.** World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP/248
- UN DESA 2019.** 2019 Revision of world population prospects. http://esa.un.org/wpp/unpp/panel_population.htm
- UN DESA 2020.** World population prospects 2019. <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>
- UNEP 2016.** Global material flows and resource productivity. UN Environmental Program, 198 pp.
- UNEP 2017.** Assessing global resource use: A systems approach to resource efficiency and pollution reduction. United Nation Environment Programme Report, 99 S.
- USGS 2000.** 20th century US mineral prices decline in constant dollar. Open-file report 00-389, 8 pp.
- USGS 2020.** Mineral commodity summary 2020. 200 pp.
- Vasovic A 2016.** Serbia's EU bid comes with heavy environmental bill. Reuters Press, <https://www.reuters.com/article/serbia-eu-environment/serbias-eu-bid-comes-with-heavy-environmental-bill-idUSL5N18N1RS>, accessed 4/2020
- VDMA 2020.** Mining equipment. <https://india.vdma.org/viewer/-/v2article/render/38078405> Website assessed 2/2020

- Vella H 2020.** Australia and the US: a rare, rare-earth partnership. Mining Technology, <https://www.mining-technology.com/features/australia-and-the-us-a-rare-rare-earth-partnership/>, accessed 1/2020
- Verhoef EV, Reuter MA, Scholte A 2003.** A dynamic LCA model for assessing the impact of lead free solder. Yazawa International Symposium, 605-621
- Verhoef EV, Dijkema PJ, Reuter MA 2004.** Process knowledge, system dynamics, and metal ecology. Journal of Industrial Ecology 8, 23-43
- Verisk Maplecroft 2020.** Africa's rising resource nationalism ups stakes for miners. <https://www.maplecroft.com/insights/analysis/africas-rising-resource-nationalism-ups-stakes-for-miners/#embedform>
- Vidal O, Goffe B, Arndt N 2013.** Metals for a low-carbon society. Nature Geoscience 6, 894-896
- Wellmer FM 2008.** Reserves and resources of the geosphere, terms so often misunderstood. Is the life index of reserves of natural resources a guide to the future? Zeitschrift der deutschen Geologischen Gesellschaft 159, 575-590
- Wellmer FM, Becker-Platen JD 2002.** Sustainable development and the exploitation of mineral and energy resources: a review. International Journal of Earth Sciences 91, 723-745
- Wellmer FM, Buchholz P, Gutzmer J, Hagelüken C, Herzig P, Littke R, Thauer R 2019.** Raw materials for future energy supply. Springer, 225 pp.
- Wellmer FM, Dalheimer M 2012.** The feedback control cycle as regulator of past and future mineral supply. Mineralium Deposita 47, 712-729
- Wellmer FM, Dalheimer M, Wagner M 2008.** Economic evaluations in exploration. Springer, 250 pp.
- West J 2011.** Decreasing metal ore grades – are they really being driven by the depletion of high-grade deposits? Journal of Industrial Ecology 15, DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00334.x
- WFW 2020.** The mining industry – an essential part of a renewable future. <https://www.wfw.com/articles/the-mining-industry-an-essential-part-of-a-renewable-future/EU>
- World Bank 2017.** Growing role of minerals and metals for low carbon future. 92 pp.
- World Bank 2019a.** Worldwide governance indicators. Produced by Kaufmann D, Kraay A, <https://info.worldbank.org/governance/wgi/>, accessed 3/2020
- World Bank 2019b.** Climate-smart mining: Minerals for climate action. Infographic, <https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2019/02/26/climate-smart-mining> assessed 1/2020
- World Bank 2020a.** World development indicators. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>, accessed 27.2.2020
- World Bank 2020b.** Worldbank data base – manufacturing value added. <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.CD?locations=DE>, accessed 3/2020
- World Bank 2020c.** World bank data base – patent applications. <https://data.worldbank.org/indicator/IP.PAT.RESD?locations=cn-lw>, last updated: October 2019
- WTO 2013.** Dispute settlement DS394: China – measures related to the exportation of various raw materials. https://www.wto.org/english/tratop_e/dispu_e/cases_e/ds394_e.htm, accessed 3/2020
- Zimbabwe Lithium 2020.** Producing the metal of the future. <https://www.zimlithium.com/>, accessed 9/2019



THINKTANK
INDUSTRIELLE
RESSOURCEN-
STRATEGIEN