

Gehen uns die Rohstoffe aus? Ressourceneffizienz und nachhaltige Industriegesellschaft

Mario Schmidt 

Einleitung

Von der Insel Elba ist eine Legende überliefert, die heute so gar nicht in das Bild begrenzter Ressourcen und endlichen Wachstums passt. Die Insel war seit den Etruskern ein wichtiges Eisenerzvorkommen, das über Jahrtausende ausgebeutet wurde. Der Gelehrte Vannoccio Biringuccio aus Siena beschrieb in seinem Werk *Pirotechnia*, das 1540 erschien:

Bei den Erzmengen, die man in so vielen Jahrhunderten gewonnen hat und noch andauernd gewinnt, müssten die Berge und beide Inseln dazu ganz eingeebnet sein. Trotzdem fördert man heute mehr und besseres Erz als je. Deshalb glauben viele, dass sich das Erz dort, wo es abgebaut wird, in einer bestimmten Zeit im Boden neu bildet. Falls es wahr ist, wäre es etwas Großartiges, und es zeigte die große Weisheit der Natur und die große Kraft des Himmels (Biringuccio 1540, 6. Kapitel, zit. nach Johannsen 1925).

Was damals als begrenzt empfunden wurde, waren eher die nachwachsenden Rohstoffe, genauer: das Holz der Wälder, das in großen Mengen für die Verhüttung der Erze benötigt wurde. Daraus ergab sich Anfang des 17. Jahrhunderts auch die Diskussion um die nachhaltige Waldwirtschaft durch den „Vater“ der Nachhaltigkeit Hans-Carl von Carlowitz.

Doch Biringuccio mahnte als einer der Ersten vor dem Versiegen der Erzvorkommen:

Ich glaube wirklich eher, dass die Menschen das Feuer [für die Schmelzöfen] einmal nicht mehr benutzen können, weil ihnen die Erze fehlen, da sie so viel davon verarbeiten (Biringuccio 1540, 10. Kapitel, zit. nach Johannsen 1925).

Im Jahr 1972 wurde diese Warnung spektakulär wiederholt, von dem Team um Dennis Meadows mit der Studie *Die Grenzen des Wachstums* im Auftrag des Club of Rome und finanziert von der Volkswagenstiftung. Sie war nicht nur der Startschuss für eine erdumspannende wachstumskritische Diskussion, sondern war auch für das Narrativ begrenzter natürlicher Ressourcen verantwortlich, das zwar in Fachkreisen schon seit Beginn des 20. Jahrhunderts erörtert wurde (vgl. Schmidt 2019), aber mit der Meadows-Studie weltweit an Aufmerksamkeit gewann. Sehr eindrücklich beschrieben die Autoren, wie begrenzt z. B. die Metallvorkommen sind und wie lang sie noch reichen, wenn die derzeitigen zivilisatorischen Nutzungsraten herangezogen werden. Für einige Metalle waren Reichweiten von wenigen Jahrzehnten im Gespräch. Dieses Bild ist inzwischen tief im Bewusstsein der Weltöffentlichkeit verankert, wird oft zitiert und selbst in Fachkreisen kaum kritisch hinterfragt.

Der Club of Rome gab 1972 beispielsweise für Zink bekannte Weltreserven von 123 Mio. Tonnen an und leitete daraus eine statische Reichweite von 23 Jahren ab, bei Einrechnung dynamischer Effekte sogar nur von 18 Jahren (Meadows et al. 1972). Diese Zahlen haben sich nicht bewahrheitet, Zink ist immer noch – man könnte sogar sagen: mehr denn je – verfügbar. Der US-amerikanische Geologische Dienst (USGS), eine international hochgeachtete Institution, gab jüngst weltweite Zinkreserven von 230 Mio. Tonnen an, also fast doppelt so viel wie vor knapp 50 Jahren, trotz des seitdem deutlich gestiegenen Abbaus (USGS 2019).¹ Ähnliches gilt für andere Metalle: 1974 gab die US-Regierung für die Kupferreserven einen Wert von 370 Mio. Tonnen an (US 1975), doch 2019 betrug der Wert 830 Mio. Tonnen. Im gleichen Zeitraum haben sich die globalen Kupferressourcen von 1,1 Mrd.

¹ „Reserven“ sind die bekannten und wirtschaftlich abbaubaren Rohstoffvorkommen. Unter „Ressourcen“ versteht man in der Fachsprache hingegen die bekannten oder vermuteten Rohstoffvorkommen, die noch nicht wirtschaftlich abbaubar sind.

Tonnen auf 2,1 Mrd. Tonnen erhöht, dazu kommen noch Schätzungen von 3,5 Mrd. Tonnen unentdeckter Kupferressourcen. Selbst Geologen, die die Weltressourcen von Kupfer bislang sehr konservativ geschätzt hatten (Mudd/Jowitt 2018), korrigierten ihre Werte innerhalb von 5 Jahren von 1,9 Mrd. Tonnen auf 3 Mrd. Tonnen. Einen ähnlichen Zuwachs erfuhren auch die Weltvorräte an Phosphor. Wurde vor 10 Jahren noch das baldige Erschöpfen dieses für die Welternährung unverzichtbaren Stoffes befürchtet (*Peak Phosphorus*), so machten die Schätzungen der Reserven 2010 plötzlich einen Sprung um die vierfache Menge nach oben (Scholz/Wellmer 2013). Zeigt sich hier also doch die „große Kraft des Himmels“, wie Biringuccio es vor 500 Jahren formulierte? Oder wie können sich endliche Mengen trotz erheblichen „Verbrauchs“ plötzlich vermehren, anstatt abzunehmen? Die Lösung für diese Frage liegt darin, dass die Zahlen nichts über die tatsächliche Endlichkeit der Ressourcen aussagen, sondern nur über die Beschränktheit des Wissens zum jeweiligen Zeitpunkt.

Welches Ziel verfolgen wir?

Das Narrative der versiegenden Rohstoffquellen, das maßgeblich vom Club of Rome geprägt wurde, ist in diesen Tagen, in denen sich der Klimawandel als die größte Herausforderung für die Menschheit abzeichnet, eine problematische Sichtweise, weil sie nicht präzise ist und zu falschen politischen Schlussfolgerungen führen kann. Die menschliche Gesellschaft ist mit ihrer hochentwickelten Technik und Infrastruktur heute in hohem Maße von Metallen abhängig. Es gibt kaum mehr ein (nichtradioaktives) Element des chemischen Periodensystems, das nicht essentiell für eine bestimmte Technologie wäre. Dies betrifft gleichermaßen Massenmetalle wie Eisen, Kupfer, Aluminium oder Zink, aber auch Metalle, die nur in geringsten Mengen erforderlich sind, wie Indium, Tantal, Germanium, Gallium oder die Seltenen Erden. Während die jährliche Produktion von Stahl in Milliarden Tonnen und von Kupfer in mehreren zehn Millionen Tonnen bemessen wird, liegt die Weltjahresproduktion von Tantal gerade einmal bei 1800 Tonnen, die von Indium bei 750 Tonnen und die von Germanium gar bei 120 Tonnen (USGS 2019). Der Augsburger Physiker Armin Reller hat hierfür den Begriff der Gewürzmetalle geprägt. Die Metalle sind nur in Spuren in den Produkten enthalten, entscheiden aber oft über deren Funktionalität.

Gerade auch viele moderne und klimafreundliche Technologien der Energiebereitstellung und -nutzung, die Photovoltaik, die Windkraft, die LED-Lampen u. v. m. benötigen diese exotischen Stoffe.

Wenn die Vorräte an diesen Rohstoffen in zivilisatorisch relevanten Zeit- und Mengendimensionen begrenzt wären, dann wäre in absehbarer Zeit die Nutzung und Fortentwicklung ganzer Technologiebereiche gefährdet. Sogar die große Transformation zu regenerativen Energiequellen müsste in Frage gestellt werden. Die Konsequenz daraus wäre, dass man höchst sparsam mit den Rohstoffvorräten umgeht, jegliche Verluste vermeidet und versucht, ein nahezu 100-prozentiges Recycling zu etablieren. Dieses Thema erfreut sich seit einigen Jahren einer großen Popularität. Es wird von *Circular Economy* gesprochen und von *closing the loop* als wichtigem Leitsatz, um die dauerhafte Verfügbarkeit dieser begrenzten Rohstoffe zu gewährleisten (EU 2014). Dies passt auch in das Bild der starken Nachhaltigkeit, die einen Verzicht des Verbrauchs nichterneuerbarer Ressourcen fordert, da man von absoluten Knappheiten ausgeht (Faber / Frick / Zahrnt 2019). Dementsprechend alarmierend war 2012 ein Bericht des Internationalen Ressourcen Panels der Vereinten Nationen, in dem es hieß, dass für viele Metalle die weltweiten Recyclingraten unter einem Prozent liegen (IRP 2012).

Doch aus elementaren naturgesetzlichen Gründen ergeben sich hier Zielkonflikte, oder wie es neuerdings heißt: Trade-offs. Während die Wiedergewinnung von Sekundärrohstoffen bei niedrigen und mittleren Recyclingraten unter dem Gesichtspunkt des Energiebedarfs und der Umweltauswirkungen wesentlich besser abschneidet als der Abbau von Primärrohstoffen im Bergbau, verhält es sich bei hohen Recyclingraten oft umgekehrt: Der energetische und ökologische Aufwand für Recycling wird dann immer größer und übersteigt oft den Aufwand bei der Primärgewinnung (Schäfer / Schmidt 2019). Recycling, das auf die Spitze getrieben wird, kann dann sogar zu negativen Effekten bei den CO₂-Emissionen² führen, weil immer mehr Energie benötigt wird, die derzeit noch weitgehend auf der Basis fossiler Energieträger bereitgestellt wird. Der absolute Schutz der Ressourcen stünde dann in einem Konflikt mit dem Schutz des Klimas.

² Wenn im Folgenden von CO₂-Emissionen gesprochen wird, dann sind damit CO₂-Äquivalente gemeint, und das umfasst auch stets andere Treibhausgase.

Mengen oder Konzentrationen als Bewertungsmaßstab?

Die Mengen an metallischen Rohstoffen, die in der Erdkruste verborgen sind, stellen zwar grundsätzlich eine endliche Größe dar. Schließlich ist die Erde ein begrenztes System, woran es seit dem berühmten Blue-Marble-Bild der Apollo-Missionen keine Zweifel mehr gibt. Trotzdem handelt es sich um unvorstellbar große Mengen, und das betrifft quasi alle Metalle, auch die eher seltenen. Betrachtet man nur den Bereich der festen Erdkruste bis in eine Tiefe von 3.000 Meter, der also für den Menschen im Prinzip zugänglich ist, so finden sich dort 17 Bio. Tonnen Kupfer, 31 Bio. Tonnen Neodym, knapp 2 Bio. Tonnen Tantal, über 800 Bio. Tonnen Phosphor und 74 Mrd. Tonnen Indium (Werte nach Wedepohl 1995). Ginge es um diese Mengen, bräuchte sich die Menschheit auch in vielen 10.000 Jahren keine Gedanken zu machen. Das Problem ist aber vielmehr die Konzentration, in der die Metalle im Boden vorhanden sind. Nur Lagerstätten, in denen die Natur über Jahrmillionen hinweg eine Anreicherung der Metalle um viele Zehnerpotenzen erreicht hat, sind für uns heute abbauwürdig, d. h. solche, in denen mit vertretbarem finanziellem, energetischem und ökologischem Aufwand die Rohstoffe gewonnen werden können.

Es kommt also auf die Konzentration an. Hohe Konzentration bedeutet geringer Aufwand, niedrige Konzentration hoher Aufwand. Mathematisch verhält sich der Energieeinsatz umgekehrt proportional zur Konzentration, also wie eine $1/x$ -Kurve. Daran hängen dann z. B. auch die CO_2 -Emissionen, aber auch viele andere Umweltauswirkungen des Abbaus. Würde man genügend Energie einsetzen wollen (und auch CO_2 -Emissionen in Kauf nehmen), so stünden für menschliche Verhältnisse nahezu unbegrenzte Mengen an Metallen zur Verfügung. Hier besteht aber gerade der Engpass – in Zeiten, in denen man CO_2 -frei werden will, erst recht. Auch das Argument, dass man eines Tages vielleicht nur noch regenerative Energien zur Verfügung hat, hilft kaum, denn um diese energetische Infrastruktur aufzubauen, bedarf es auch genau dieser Ressourcen. Beides bedingt sich also gegenseitig. Dazu kommt, dass man viele Regionen der Erde aus Umwelt- und Naturschutzgründen vor der Rohstoffgewinnung verschonen möchte, z. B. Regenwaldgebiete, den Meeresboden oder die arktischen Regionen.

Die Rückführung des Knappheitsproblems auf die Konzentration, und nicht auf die Menge an sich, hat den entscheidenden Vorteil, nun mit energetischen Größen arbeiten zu können. Dies kann mit dem

Bedarf an erforderlicher Energie oder Exergie (arbeitsfähige Energie) oder der Erzeugung und Überwindung von Entropie ausgedrückt werden. Die Primärgewinnung aus dem Bergbau kann dann auch mit der Sekundärgewinnung aus dem Recycling verglichen werden, und es kann entschieden werden, was im jeweiligen Fall besser ist. Ebenso kann der Netto-Output neuer Energietechnologien unter Einbeziehung des Rohstoffbedarfs bewertet werden. Dazu gibt es inzwischen zahlreiche methodische Ansätze (z. B. Finnveden / Arushanyan / Brandao 2016; Übersicht in Sonderegger et al. 2020).

Werden die reichhaltigen Lagerstätten knapp?

Ein Indiz dafür, dass die reichhaltigen Lagerstätten auf der Erde immer seltener werden, ist die sinkende Metallkonzentration in den abgebauten Erzen, der sogenannte Erzgehalt. Er kann für einige Metalle seit Mitte des 19. Jahrhunderts verfolgt werden, z. B. in Australien (Mudd 2009). Während damals noch Kupfererze mit einem Gehalt von bis zu 30 % abgebaut wurden, liegt der Kupfergehalt heute bei deutlich unter 1 %. Wenn man annimmt, dass zuerst die reichen Lagerstätten gefunden und ausgebeutet werden, bevor man an die ärmeren Lagerstätten rangeht, so könnte dies dafür sprechen, dass die Vorkommen knapp werden. Aber das ist eine Fehlinterpretation der Daten. Heute rentiert es sich eher, Lagerstätten abzubauen, die auch einen geringen Metallgehalt haben, dafür aber groß sind und viel Metall enthalten (Rötzer / Schmidt 2018). Verantwortlich dafür sind einerseits der technische Fortschritt und andererseits die Economies of Scale, die dafür sorgen, dass große Fördermengen effizienter abgebaut werden können als kleine Vorkommen. Lagerstätten mit hohem Kupfergehalt sind nach wie vor vorhanden und werden weiterhin gefunden (Mudd / Jowitt 2018), sind aber meistens von geringerem ökonomischen Interesse.

Die größte Fehleinschätzung ist allerdings, man kenne bereits alle relevanten Rohstofflagerstätten auf der Erde oder könne abschätzen, welche noch gefunden werden. Die Erkundung von Rohstoffen erfolgt weltweit hauptsächlich durch wirtschaftlich agierende Unternehmen. Sie denken in ökonomisch überschaubaren Zeiträumen und dementsprechend planen sie ihre Aktivitäten und Investitionen. Die Exploration neuer Vorkommen zählt dazu und hängt entscheidend von Angebot und Nachfrage auf den Weltmärkten ab. In einem

gemeinsamen Bericht der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften, der Akademie der Wissenschaften Leopoldina und der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften wird auf die Untauglichkeit der Reichweitenprognosen hingewiesen (Angerer et al. 2016, S. 42):

Dies ergibt sich als Konsequenz aus der Tatsache, dass es keine Institution auf der Welt gibt, die die Mittel hat, die gesamte Rohstoffvorkommen der Erde zu erkunden. Die publizierten Reserven sind immer nur die Summe aller einzelner Lagerstätten, die von den Bergwerksgesellschaften und manchmal staatlichen Behörden festgestellt wurden.

Dies widerspricht der Position vieler Warner, wie dem Chemiker Ugo Bardi, Autor der Club-of-Rome-Studie *Der geplünderte Planet*, der ein pessimistisches Ressourcenszenario zeichnet (Bardi 2013, S. 166):

Zunächst gilt es zu prüfen, ob wir wirklich wissen, welche Mengen an konventionellen Erzen in der Erdkruste lagern. Bei den Schätzungen hierzu gibt es naturgemäß große Unsicherheiten, es ist aber wenig wahrscheinlich, dass wir auf neue Ressourcen in substanziellen Größenordnungen stoßen. Die Erdoberfläche ist gründlich erforscht. Die Prospektoren haben kein Fleckchen Erde unberührt gelassen.

Im Gegensatz dazu weist der Acatech-Bericht darauf hin, dass vieles noch unentdeckt ist (Angerer et al. 2016, S. 86):

Die größten Potenziale, neue Lagerstätten zu entdecken, liegen in der Tiefe: Die bisherigen Entdeckungen waren oberflächennah.

So beginnen die meisten großen Kupfervorkommen, die heute bekannt sind und abgebaut werden, in Tiefen von wenigen hundert Metern. Neueste Explorationsmethoden streben Tiefen bis zu 1.000 Metern an, sind allerdings auch aufwendiger und teurer. Wellmer (2014) weist deshalb auf den ökonomischen Regelkreis der Rohstoffversorgung hin: Wenn Rohstoffe sich verknappen und teurer werden, dann werden diese Explorationsmethoden rentabel, ebenso wie auch neue Recyclingverfahren. Knappheiten würden sich über diesen Marktmechanismus mittelfristig selbst wieder auflösen.

Dieser Regulationsmechanismus funktioniert nicht in allen Fällen. Insbesondere die angesprochenen Gewürzmetalle werden beim Abbau von Massenmetallen wie Eisen, Kupfer, Zink oder Blei als Beiprodukte gewonnen. Hier gibt es keine direkte Anbindung des Angebots an die Nachfrage, die Elastizität ist gering, weil die Minentätigkeit von den Hauptprodukten und kaum von den Nebenprodukten bestimmt wird (Hagelüken / Meskers 2010). Sinkt z.B. die Nachfrage nach Blei, würden Bleiminen geschlossen werden, und damit würde z.B. auch das Angebot an dem Beiprodukt Indium sinken. Indium ist ein wichtiger Stoff für die Displays von Computern oder Smartphones. Eine Bleimine wegen des enthaltenden Indiums zu betreiben, wäre ökonomisch wenig sinnvoll, es sei denn, es käme zu extremen Preissteigerungen aufgrund der Verknappung. Wahrscheinlicher ist allerdings, dass es dann zu Materialsubstitutionen oder Technologieinnovationen kommt.

Unterschätzt: der technische Fortschritt

Der Zusammenhang zwischen Erzkonzentration und Energieaufwand sowie die Verschiebung hin zu geringeren Konzentrationen legt nahe, dass heute wesentlich mehr Energie für die Gewinnung der Rohstoffe aufgewendet werden muss. Wir haben diese Annahme durch eine umfangreiche Analyse historischer Daten und eine Bewertung der eingesetzten Technologien für die Kupferproduktion überprüft. Kupfer kann hier als ein wichtiger Vertreter der Metalle angesehen werden, weil es einerseits selbst von großer Bedeutung für die technische Entwicklung der Menschheit, z.B. für die Elektrifizierung und damit auch für die Transformation hin zu regenerativen Energien, ist. Andererseits werden mit dem Kupfererz auch viele andere wichtige Gewürzmetalle mitgewonnen. Es eignet sich deshalb gut als Leitmetall für die globale Metallversorgung.

Für die Analyse der historischen Entwicklung haben wir ein Modell der globalen durchschnittlichen Kupfergewinnung mit allen relevanten Förder- und Aufbereitungsprozessen gebildet und die Verhältnisse von 1930, 1970 und 2010 verglichen (Schmidt / Schäfer / Rötzer 2020). Für 2050 haben wir Prognosen erstellt. Das erstaunliche Ergebnis ist, dass der spezifische Primärenergieverbrauch, also der Energieverbrauch pro Tonne Kupfer, trotz deutlich sinkender Erzgehalte (von 1,7 % im Jahr 1930 auf 0,7 % im Jahr 2010) nicht wesentlich angestiegen ist. 1970 war

er sogar deutlich geringer als 1930, und 2010 ist er etwa gleich hoch wie 1930. Die CO₂-Emissionen pro Tonne Kupfer sind von 1930 bis 2010 von 5,7 auf 4,5 Tonnen gesunken. Dies lag im Wesentlichen an neuen metallurgischen Verfahren sowie an dem Wechsel vom Untertagebau zum Tagebau, der wesentlich einfacher ist.

Auch für die Zukunft bis 2050 wird der Tagebau noch eine große Rolle spielen, möglicherweise mit größeren Abbautiefen. Es kann aber von einer zunehmenden Elektrifizierung der mechanischen Abbauprozesse ausgegangen werden. Für die Frage der damit verbundenen CO₂-Emissionen ist entscheidend, woher die Elektrizität stammt. Obwohl der Bergbau eine sehr konservative Branche ist, laufen derzeit viele Überlegungen, auch im Bergbau regenerative Energien einzusetzen (Maennling / Toledano 2019). Unsere Schätzung, was Abbaubedingungen und Elektrifizierung betreffen, liegen für 2050 bei einem Wert von ca. 2,0 bis 2,6 Tonnen CO₂ pro Tonne Kupfer. Dass überhaupt noch CO₂-Emissionen auftreten, liegt dabei an der Bereitstellung weiterer Hilfs- und Betriebsstoffe, für die eine konventionelle Herstellung angenommen wurde.

An dieser Stelle muss natürlich betont werden, dass die spezifischen Emissionen, also pro Tonne Kupfer, nichts über die absolute Emissionsmenge an CO₂ aussagen. Diese hängt nämlich auch von der Produktionsmenge ab. Es gibt neuere Abschätzungen, welcher weltweite Bedarf an Kupfer durch die Energiewende entsteht. Das Umweltbundesamt gibt beispielsweise an, dass die erneuerbaren Energien in den nächsten Jahrzehnten 5- bis 8-mal soviel Primärkupfer benötigen werden (UBA 2019, S. 396). An dieser Stelle wird wieder deutlich, wie eng die Systeme der Energieerzeugung (und damit auch der CO₂-Emissionen) und der Metallrohstoffgewinnung miteinander verbunden sind. Die Werte für den spezifischen Energiebedarf bzw. die spezifischen CO₂-Emissionen, also pro Tonne Kupfer, sind trotzdem wichtig bei der Frage, wann und ob Recycling die bessere Option ist.

Gesucht: die optimalen Recyclingquoten

Recycling ist zweifelsohne ein wichtiger Beitrag zu einer sicheren und nachhaltigeren Rohstoffversorgung. Aber es ist auch kein Wundermittel, wie es oft in der Öffentlichkeit dargestellt wird. Dafür gibt es mehrere Argumente. Ein wichtiger Grund liegt darin, dass nur das

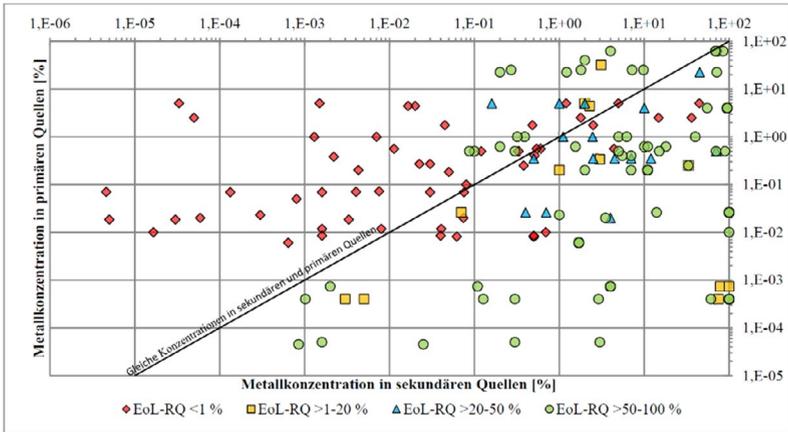


Abb. 1: Konzentration von Metallen in Abfallfraktionen und entsprechend in Erzen. EoL-RQ ist die End-of-Life-Recycling-Quote (Schäfer/Schmidt 2019).

recycelt werden kann, was bereits abgebaut wurde, in der Technosphäre eingesetzt wird und nach einer gewissen Produktnutzungszeit dann auch wieder verfügbar ist. Da die Nachfrage in den nächsten Jahrzehnten stark steigen wird, muss durch den Bergbau erst ein entsprechender Materialbestand in der Technosphäre aufgebaut werden. Die Primärgewinnung im Bergbau wird deshalb noch über viele Jahrzehnte unverzichtbar sein. Prognosen gehen davon aus, dass beispielsweise bei Eisen und Kupfer erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts die Sekundärgewinnung durch Recycling die Primärgewinnung aus dem Bergbau überwiegen wird (van der Voet et al. 2018).

Weiterhin ist auch das Recycling eine Aufwandsfrage. Bei hohen Metallkonzentrationen ist Recycling besser als Bergbau, deshalb spielt zum Beispiel das Sammeln von Eisen- und Kupferschrott und ihr Wiedereinsatz seit Jahrhunderten eine zentrale Rolle in der Wirtschaft. Viele „Gewürzmetalle“ sind in Produkten jedoch in so geringen Konzentrationen enthalten, dass es eines enormen Aufwands und auch großer Energiemengen bedarf, um die Metalle zurückzugewinnen. Das zeigt Abbildung 1. Hier wurden die Metallgehalte in verschiedenen Abfallfraktionen in einer logarithmischen Skala dargestellt (horizontale Achse). Jedem Datenpunkt wurde der korrespondierende Wert des Metallgehalts im heute typischen Erzabbau gegenübergestellt

(senkrechte Achse). Es wird deutlich, wann Recycling sinnvoll ist: wenn große Konzentrationen in den Produkten oder Abfallfraktionen vorliegen oder wenn die Konzentration größer ist als bei der Primärgewinnung. Sinkt die Konzentration von Metallen in den Produkten unter jene in den entsprechenden Erzen, wird Recycling unattraktiv. Genau das spiegelt sich in den tatsächlichen Recyclingraten wider (Farbe der Markierungen).

Die reale Situation ist noch komplexer. Moderne Hightech-Produkte bestehen aus einem Mix von Metallen in diversen chemischen Verbindungen, und beim Recycling muss man sich entscheiden, was man vorrangig recyceln will. Aus metallurgischen Gründen gehen dabei meistens irgendwelche Metallfraktionen verloren, d. h., sie landen in Reststoffen oder in der Schlacke. Ein weiterer Aspekt ist, dass gerade die Würzmetalle nur in geringen Mengen verwendet werden. Geht es beim Eisen-, Aluminium- oder Kupferschrott weltweit um Milliarden oder Millionen Jahrestonnen, so bewegt sich der Umsatz vieler „Würzmetalle“ nur im Bereich von wenigen hundert Jahrestonnen. Hier stellt sich schnell die Frage nach dem Aufwand, der für eine entsprechende Sammel- und Recyclinginfrastruktur erforderlich wäre. Unter Klimagesichtspunkten wäre die Effizienzsteigerung der Stahlproduktion um ein Prozent erheblich sinnvoller, als z. B. das Tantal aus den Kondensatoren von Elektronikgeräten zurückzugewinnen.

Es sind also die dissipativen Kräfte, die ein unbegrenztes Recycling unmöglich machen. Die Dissipation ist die treibende Kraft beim Energiebedarf, was thermodynamisch, also naturgesetzlich, unvermeidlich ist. So haben Bergbau und Recycling eine wesentliche Gemeinsamkeit: Sie hängen beide vom Energieeinsatz ab und bedingen beide Umweltbelastungen, die man mit ihrer (Wieder-)Gewinnung in Kauf nehmen muss.

Schlussfolgerungen

Dieser Diskurs soll nicht grundsätzlich gegen Metallrecycling sprechen, auch nicht gegen den sparsamen Einsatz dieser Materialien. Aber es muss klar sein, dass die große globale Herausforderung heute in der Eindämmung des anthropogen verursachten Klimawandels liegt und damit die umweltfreundliche und ausreichende Bereitstellung von Energie die Schlüsselfrage ist. Neue Technologien, die hierfür erforderlich

sind, benötigen Metalle in großer Vielfalt und in großen Mengen. Der effiziente Einsatz der Metalle ist hier unerlässlich.

Aber der sparsame Einsatz dieser Rohstoffe soll nicht deshalb erfolgen, weil sie selbst knapp sind, sondern weil mit ihrer Gewinnung und Wiedergewinnung großer Aufwand verbunden ist. Dieser Aufwand kann in finanziellen, in energetischen oder in ökologischen Größen – wie z.B. den CO₂-Emissionen – gleichermaßen ausgedrückt werden. Dieser Aufwand muss möglichst niedrig gehalten werden. Ressourceneffizienz und Klimaschutz hängen somit unmittelbar zusammen. Ob in diesem Kontext der Primärabbau im Bergwerk oder die Sekundärgewinnung durch Recycling besser ist, muss im Einzelfall entschieden werden. Das Ergebnis wird wesentlich von den Metallkonzentrationen in den Erzen und in den Produkten abhängen. Ein 100-prozentiges Recycling ist aufgrund der dissipativen Effekte praktisch nicht erreichbar. Deshalb ist die Metapher des *closing the loop* unpassend. Sinnvoller wäre es, auf eine globale Zielgröße zu achten, z.B. darauf, ob mit Maßnahmen und Anstrengungen im Ressourcenbereich die CO₂-Emissionen tatsächlich insgesamt reduziert wurden.

Dies könnte natürlich durch viele Rahmenbedingungen erleichtert werden. So scheitert ein effizientes und CO₂-armes Recycling heute oft an fehlenden Erfassungs- und Getrenntsammlensystemen. Oder es ist teilweise gar nicht bekannt, welche Materialien sich in Produkten befinden und wo ein Recycling sinnvoll wäre. Hier setzt die Forderung nach einer besseren Information über die Inhaltsstoffe von Produkten an, die entlang der Lieferkette, also von den Herstellern bis zum Entsorger, weitervermittelt werden muss.

Schließlich muss auch darauf hingewiesen werden, dass Recycling und Primärgewinnung metallurgisch gesehen nur zwei Seiten einer Medaille sind. Sie erfordern Prozesse, die sehr ähnlich sind und z.B. in Metallhütten erfolgen. Will man die große Palette der verschiedenen Metalle aus dem Erz oder aus den Produkten gewinnen, sind komplexe Prozesse und Prozessrouten erforderlich. Geht das Wissen und die industrielle Infrastruktur zur Primärgewinnung verloren, so fehlt beides auch für das Recycling. Konkret heißt das, dass die Schließung oder Verlagerung der metallproduzierenden Industrie aus Deutschland dazu führt, dass Metallrecycling dann im Ausland, z.B. in China, erfolgen muss. Unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes könnte das kontraproduktiv sein. Entschieden werden können solche Handlungsoptionen nur durch umfassende ökobilanzielle Analysen, aber nicht durch

Dogmen oder Narrative, wie sie aus der alten Club-of-Rome-Diskussion öffentliche Verbreitung gefunden haben. Ein kritisches Hinterfragen der Annahmen und der Schlussfolgerungen ist hier immer wieder geboten.

Literatur

- Angerer, G., Buchholz, P., Gutzmer, J. et al. (2016): *Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft. Geologie – Märkte – Umwelteinflüsse*. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften: München.
- Bardi, U. (2013): *Der geplünderte Planet. Die Zukunft des Menschen im Zeitalter schwindender Ressourcen*. Oekom: München.
- Europäische Kommission (EU) (2014): *Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe*. COM (2014) 398 final/2. EU: Brüssel.
- Faber, M., Frick und M., Zahrnt, D. (2019): MINE Website, Absolute and Relative Scarcity, accessed on 20 January 2019, www.nature-economy.com
- Finnveden, G., Arushanyan, Y. und Brandao, M. (2016): Exergy as a Measure of Resource Use in Life Cycle Assessment and Other Sustainability Assessment Tools. *Resources*, 5 (3), 23 ff.
- Hagelüken, C. und Meskers, C. E. M. (2010): Complex Life Cycles of Precious and Special Metals. In: Graedel, T. E., Van der Voet, E. (Hrsg.): *Linkages to Sustainability*. MIT Press: Cambridge / London, S. 163–197.
- International Resource Panel (IRP) (2012): *Recycling Rates of Metals. A Status Report*. UNEP: Paris.
- Johannsen, O. (1925): *Biringuccios Pirotechnia*. Vieweg: Braunschweig.
- Maennling, N. und Toledano, P. (2019): *Erneuerbare Energien im Rohstoffsektor. Verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ): Eschborn.
- Meadows, D., Meadows, D., Zahn, E. et al. (1972): *Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*. Deutsche Verlags-Anstalt: Stuttgart.
- Mudd, G. M. (2009): *The Sustainability of Mining in Australia: Key Production Trends and Their Environmental Implications for the Future. Research Report No. RR5*. Revised Version. Department of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute: Melbourne.

- Mudd, G. M. und Jowitt, S. M. (2018): Growing Global Copper Resources, Reserves and Production: Discovery Is Not the Only Control on Supply. *Economic Geology*, 113 (6), 1235–1267.
- Rötzer, N. und Schmidt, M. (2018): Decreasing Metal Ore Grades – Is the Fear of Resource Depletion Justified? *Resources*, 7 (4), 88 ff.
- Schäfer, P. und Schmidt, M. (2020): Discrete-Point Analysis of the Energy Demand of Primary versus Secondary Metal Production. *Environ. Sci. Technol.* 54 (1), 507–516, DOI: 10.1021/acs.est.9b05101.
- Schmidt, M. (2019): Scarcity and Environmental Impact of Mineral Resources – An Old and Never-Ending Discussion. *Resources*, 8 (2); DOI:10.3390/resources8010002.
- Schmidt, M., Schäfer, P. und Rötzer, N. (2020): Primär- und Sekundärmetalle und ihre Klimarelevanz. In: Holm et al. (Hrsg.): *Berliner Recycling- und Sekundärrohstoffkonferenz*. Vivis-Verlag: Berlin.
- Scholz, R. W. und Wellmer, F.-W. (2013): Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: What we may learn from the case of phosphorus? *Global Environmental Change*, 23, 11–27.
- Sonderegger, T., Berger, M., Alvarenga, R. et al. (2020): Mineral resources in life cycle impact assessment – part I: a critical review of existing methods. *Int J Life Cycle Assess* (2020). <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01736-6>
- U. S. Geological Survey (USGS) (2019): *Mineral Commodities Summary 2019*. Reston, Virginia.
- Umweltbundesamt (UBA) (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE – Studie. *ClimateChange* 36/2019. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau.
- US Secretary of the Interior (1974): *Commodity data summaries 1974. Appendix 1 to Mining and Minerals Policy Third Annual Report under the Mining and Minerals Policy Act of 1970*. Bureau of Mines, Pittsburgh (PA).
- van der Voet, E., Van Oers, L., Verboom, M. und Kuipers, K. (2018): Environmental Implications of Future Demand Scenarios for Metals. *Journal of Industrial Ecology*, 23, 141–155.
- Wedepohl, K. H. (1995): The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (7), 1217–1232.
- Wellmer, F.-W. (2014): Wie lange reichen unseren Rohstoffvorräte? Was sind Reserven und Ressourcen? *Umweltwirtschaftsforum*, 22, 125–132.