

Primary and Secondary Metals and their Climate Relevance

Mario Schmidt, Philipp Schäfer and Nadine Rötzer

The global supply of abiotic raw materials is less subject to a quantity restriction in the sense of limited geological deposits than to a quality and concentration problem. The metal content in ores has fallen sharply in recent decades. However, this is due to technical innovations and economies of scale. The specific CO₂ emissions of copper, for example, have remained roughly constant since 1930. Nevertheless, the metal concentration has a significant influence on the energy demand and consequently on the CO₂ balance of the metals. This applies both to the extraction of metals from mines and to recycling. Recycling and Circular Economy is therefore not an end in itself, but must prove that it has economic, ecological and social advantages. In particular, it must be proven in individual cases that the recycling of metals leads to lower CO₂ emissions than extraction from mines. This cannot be assumed in general terms.

Primär- und Sekundärmetalle und ihre Klimarelevanz

Mario Schmidt, Philipp Schäfer und Nadine Rötzer

1.	Primärgewinnung am Beispiel von Kupfer.....
1.1.	Verfügbarkeit
1.2.	Metallkonzentration der Primärvorkommen.....
2.	Sekundärgewinnung von Metallen
2.1.	Metallkonzentrationen der Sekundärvorkommen.....
2.2.	Klimarucksäcke und Gesamtoptimum
3.	Fazit.....
4.	Literatur

In der Nachhaltigkeits- und Umweltdiskussion erfreut sich der neue Begriff der Circular Economy großer Popularität. Er wurde von der Europäischen Kommission bereits 2014 aufgegriffen [8], die Akademie für Technikwissenschaften (acatech) hat dazu jüngst einen Bericht veröffentlicht und Aktivitäten gestartet [28] und der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) hat ein Positionspapier verfasst [27]. Organisationen wie die Ellen MacArthur-Stiftung treiben das Thema international voran. Normierungsgremien wie DIN bzw. ISO haben entsprechende Standardisierungsprozesse angestoßen und Consultants haben lukrative Beratungskonzepte wie etwa den Cradle-to-Cradle-Ansatz entwickelt.

Der schonende Umgang mit Rohstoffen ist kein neues Thema. Er spielte in der Menschheitsgeschichte schon immer eine Rolle, meistens aus einer Mangelsituation heraus [23], wozu auch der Mangel an Deponieraum und Entsorgungsmöglichkeiten in den 1980er Jahren gezählt werden kann. Aber auch die militärischen Interessen spielten eine Rolle [16, 22] und schließlich gab es 1972 die grundsätzlichen Erwägungen des Club of Rome [14] zur Endlichkeit der Ressourcen auf der Erde. Ein großer Fundus an wichtigen Erkenntnissen, gerade auch zum Recyclingpotenzial von Metallen, wurde vor knapp zehn Jahren vom International Resource Panel (IRP) des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) erarbeitet [10].

Die Idee, Materialien im Kreislauf zu führen, wie die Natur uns das vormacht, ist bestehend. Viele Probleme, von den Emissionen und Umweltproblemen über die ökonomische Verfügbarkeit bis hin zur Erschöpfbarkeit der Ressourcen, wären damit gelöst. Eine Sache, die dabei oft untergeht, ist von fundamentaler und naturgesetzlicher Bedeutung: Kreisläufe funktionieren nicht von allein, auch nicht in der Natur, sondern brauchen arbeitsfähige Energie (Exergie). Je nachdem, woher die Energie stammt – heute und in absehbarer Zeit leider noch zu großen Anteilen aus fossilen Energieträgern –, sind mit ihrer Nutzung Belastungen für Klima und Umwelt verbunden.

Erzgehalt seit dem 19. Jahrhundert deutlich gesunken ist. Eine berühmte Kurve ist in Bild 1 dargestellt. Wurden vor 150 Jahren in Australien noch Kupfervorkommen mit über 20 % Kupfergehalt abgebaut, so liegen die Werte heute meistens deutlich unter 1 %. Damit geht die Befürchtung einher, dass die qualitativ hochwertigen Vorkommen bereits erschöpft sind und nun mit viel größerem Aufwand die minderwertigen Vorkommen ausgebeutet werden müssen. Das muss zwar nicht bedeuten, dass die Rohstoffmenge selbst begrenzt ist, aber der Aufwand würde dramatisch ansteigen und möglicherweise an praktische Grenzen stoßen. Damit verbunden wäre ein großer ökonomischer, energetischer und ökologischer Aufwand.

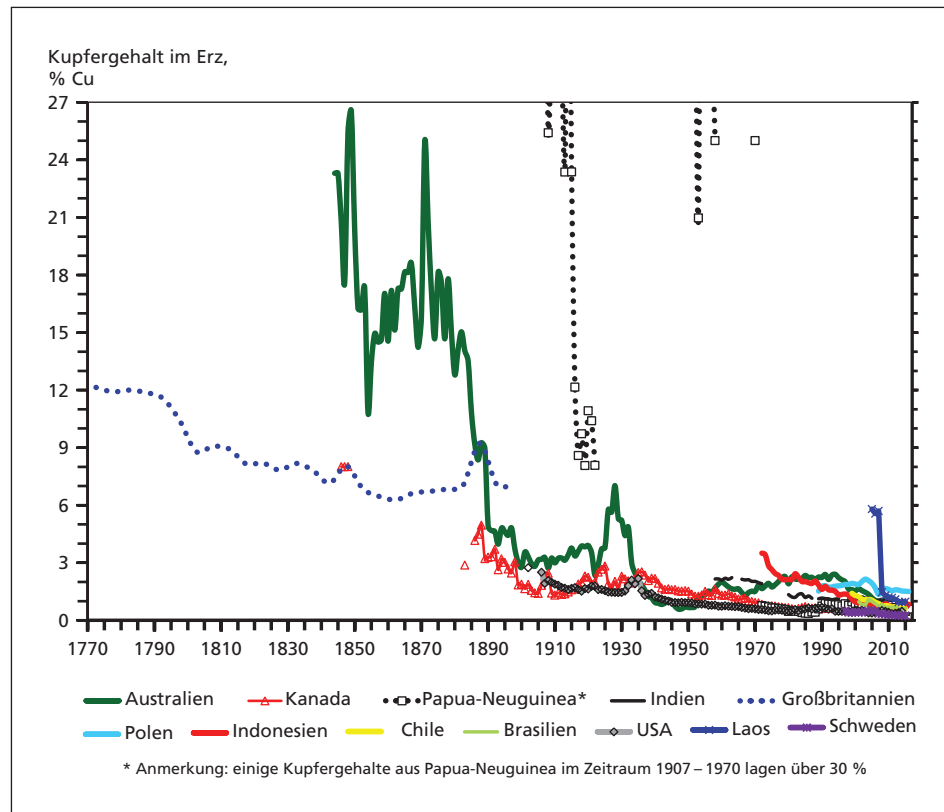


Bild 1: Zeitlicher Verlauf des Kupfergehalts im abgebauten Erz in Bergwerken aus verschiedenen Ländern [15]

Doch diese Statistiken der sinkenden Erzgehalte müssen mit Bedacht interpretiert werden. Zum einen sind die Abbaumengen in den vergangenen 150 Jahren dramatisch angestiegen, was heißt, dass es sich im 19. Jahrhundert bei den Werten in Bild 1 um sehr kleine Fördermengen gehandelt hat. Heute besteht aber ein Bedarf an großen Fördermengen, die mit diesen qualitativ hochwertigen Minen nicht mehr zu decken sind. Es sind aber nach wie vor Kupferlagerstätten vorhanden, die hohe Kupfergehalte haben. Das sind z.B. Massiv-Sulfid oder sedimentgebundene Vorkommen, während

porphyrische Vorkommen geringere Konzentrationen haben, dafür aber deutlich mehr Kupfer enthalten. Dies ist in Bild 2 sehr gut zu erkennen. Die roten Markierungen sind bekannte porphyrische Kupfervorkommen mit geringen Konzentrationen und hohen Kupfermengen, umgekehrt verhält es sich bei den blauen und grünen Markierungen.

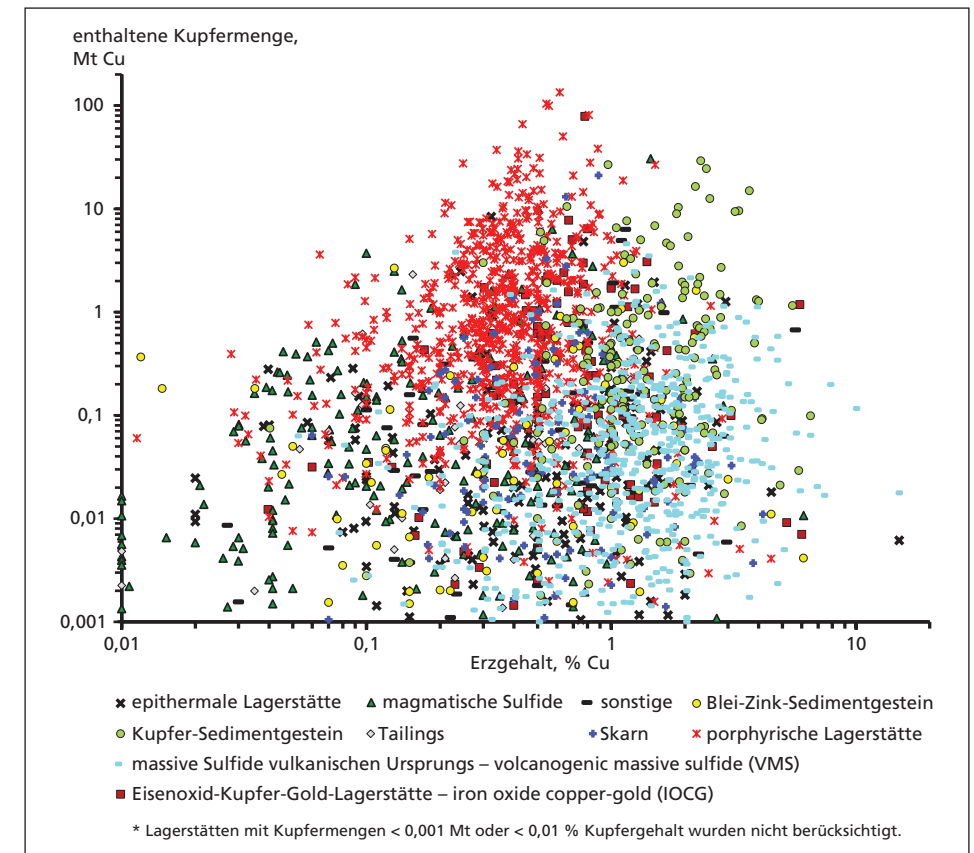


Bild 2: Erzgehalt und Kupfermenge bekannter Kupfervorkommen in der Welt, unterschieden nach verschiedenen Lagerstättentypen [15]

Zum anderen hat sich mit der Mechanisierung des Bergbaus und der Aufbereitung der Erze sowie mit der modernen Energieversorgung ein technologischer Wandel vollzogen, der die Aufbereitung von Minen mit geringem Erzgehalt unter ökonomischen Gesichtspunkten rentabel macht [18]. Das erklärt auch, warum heute der Großteil des Kupfers weltweit aus großen porphyrischen Lagerstätten abgebaut wird.

Das Bild 1 ist deshalb kein geeignetes Indiz dafür, dass der Menschheit die Rohstoffe ausgehen. Allerdings könnte nun angenommen werden, dass mit den geringeren Konzentrationen größere Energiemengen erforderlich werden und damit auch die CO₂-Emissionen pro kg geförderten Kupfers ansteigen. Doch auch diese Schlussfolgerung ist nicht richtig, wenn die technische Entwicklung der vergangenen Jahrzehnte berücksichtigt wird und realistische Prognosen für die Zukunft angestellt werden.

Um die Auswirkungen von strukturellen und technischen Veränderungen bei der Primärkupfergewinnung auf den Energiebedarf und die korrespondierenden CO₂-Emissionen abschätzen zu können, haben wir ein generisches Modell des Kupferabbaus entwickelt und mit den jeweiligen Parametern aus verschiedenen Zeitepochen (1930, 1970, 2010) berechnet. Dabei wurde von typischen Bedingungen des Kupferabbaus für die jeweilige Epoche ausgegangen. Entsprechende, teils historische Daten wurden recherchiert und als beste Schätzung für eine Art Weltdurchschnitt angenommen. Für die Zukunft wurde eine Prognose vorgenommen, wie sich die Technologie weiterentwickeln könnte und insbesondere welche Energieträger dann zum Einsatz kommen werden. Berechnet wurde der Kumulierte Energieaufwand (KEA) sowie die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen als CO_{2e}) unter Einbeziehung aller relevanten Hilfsprozesse und Hilfs- und Betriebsstoffe. Dabei kamen ökobilanzielle Methoden zum Einsatz.

Bei den Ergebnissen sind einerseits die Mechanisierung in den Minen sowie Skaleneffekte entscheidend, andererseits Innovationen bei der Aufbereitung der Erze, insbesondere bei den pyrometallurgischen Verfahren. Wichtig ist auch die Bereitstellung der erforderlichen Energie, die aus unterschiedlichen Quellen und mit unterschiedlichem Wirkungsgrad stammen kann. Hier kann es mit veränderten Länderanteilen am Weltmarkt auch zu deutlichen Verschiebungen kommen, etwa wenn eine Anbindung von Minen oder Anlagen an ein Stromnetz möglich oder nicht möglich ist.

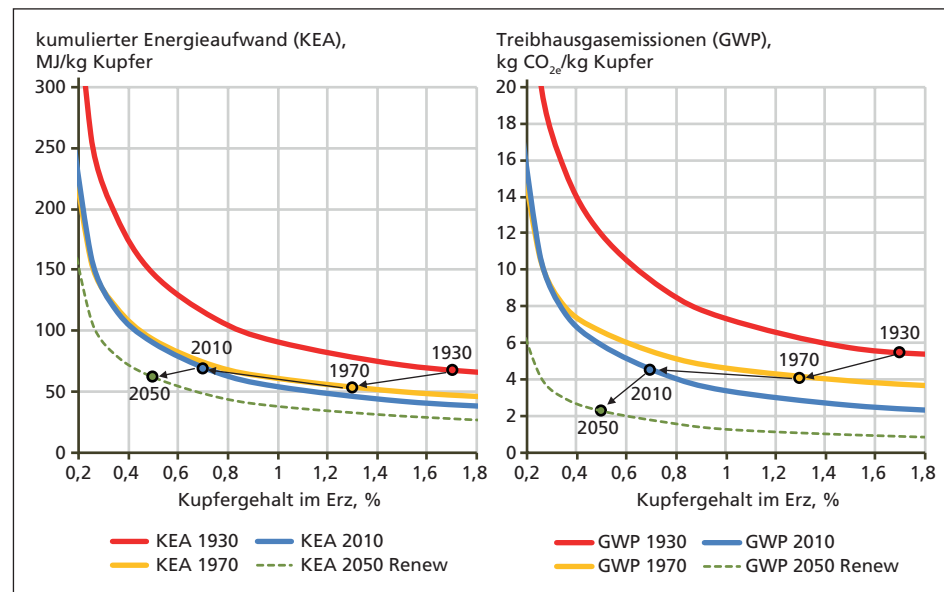


Bild 3: Modellrechnungen für den Kumulierten Energieaufwand (KEA) (links) und die Treibhausgasemissionen (GWP) (rechts) bei der Kupfergewinnung für verschiedene Zeitepochen in Abhängigkeit vom Erzgehalt der Mine; die Punkte geben die durchschnittlichen Erzgehalte der Epochen an [19]

Aus Bild 3 ist ersichtlich, dass der Energiebedarf und infolgedessen auch der Carbon Footprint von Kupfer mit sinkendem Erzgehalt stark zunehmen und dabei etwa einer

1/x-Kurve folgen. Für jede Zeitepoche wurde eine solche Kurve nach dem jeweiligen Stand der Technik und der weltweiten Struktur des Kupferabbaus berechnet. Dabei wird deutlich, dass die Kurven sich von Epoche zu Epoche verschieben, und zwar aufgrund des technischen Fortschritts nach unten. Diese Entwicklung kompensiert auch weitgehend die Verschiebung der durchschnittlichen Kupfergewinnung hin zu niedrigeren Kupfergehalten im Erz (Punktmarkierungen). So kann mit diesen Analysen festgehalten werden, dass der spezifische Energiebedarf und die damit verbundenen THG-Emissionen in den vergangenen 90 Jahren trotz gesunkener Erzgehalte weitgehend gleichgeblieben und gegenüber 1930 sogar leicht gesunken sind.

Für die Zukunft kann davon ausgegangen werden, dass Effizienzgewinne in der Minen- und Aufbereitungstechnik erfolgen werden, vor allem aber das Energiesystem einen entscheidenden Faktor spielen wird. Schon heute sind viele große Kupferminen an die überregionalen Stromnetze angeschlossen. Das wird bis 2050 weiter zunehmen und der Anteil an erneuerbaren Energie an der weltweiten Stromerzeugung wird deutlich steigen. Bereits heute wird an Konzepten zum Einsatz regenerativer Energien im Bergbau gearbeitet [6]. Unter der Annahme des Ausbaus der erneuerbaren Energien, kann bis 2050 mit einer Halbierung des spezifischen THG-Wertes auf knapp über 2 kg CO_{2e}/kg Cu für den Abbau und die Aufbereitung gerechnet werden. Dabei wurde bereits pessimistisch angenommen, dass der Erzgehalt auf 0,5 % sinkt.

Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass seit 1930 die absoluten Mengen an gefördertem Kupfer deutlich angestiegen sind, von weltweit 1,6 Millionen t/a auf heute 21 Millionen t/a. Dementsprechend sind auch der absolute Energiebedarf und die Emissionen angestiegen. Wird von einem fünf- bis achtfachen Anstieg des weltweiten Kupferbedarfs EFT & OFSHJFWFSTPSHVOHTT zuzurechnen, wie ihn das Umweltbundesamt angenommen hat, so werden auch die absoluten CO₂-Emissionen durch den Kupferabbau ansteigen. Außerdem sind mit dem Bergbau auch stets Eingriffe in die lokale Umwelt sowie soziale Probleme verbunden. Diese dürfen bei der Bewertung der Primärrohstoffgewinnung nicht außer Acht gelassen werden. Auch die Bergbaubranche muss hier verstärkt Formen finden, Rohstoffe umwelt- und sozialverträglich abzubauen.

Als Zwischenfazit kann festgehalten werden, dass sowohl die befürchtete Verknappung von Kupfer als auch der steigende spezifische Aufwand an Energie und Emissionen in den nächsten Jahrzehnten kein größeres Problem darstellen werden. Dies gilt für Kupfer, es kann aber auch auf viele andere Metalle übertragen werden, da die entscheidenden Verhältnisse oft sehr ähnlich sind.

2. Sekundärgewinnung von Metallen

Wie verhält es sich nun beim Recycling, das oft als Lösung der Verknappungs- aber auch der Umweltprobleme angesehen wird? Ist Recycling der Primärgewinnung überlegen und kann es sie ersetzen? Die Antworten hängen vom Einzelfall ab und sollte nicht pauschal gegeben werden. In vielen Fällen ist Recycling sinnvoll und notwendig und aus verschiedenen Gründen die bessere Wahl. Aber selbst beim Recycling gibt es auf der Welt zahlreiche Orte, die in ihren Umweltbelastungen und sozialen Bedingungen den Bergbauminen kaum nachstehen, wie Agbogbloshie in Accra (Ghana). Ein grundsätzliches

Problem besteht, wenn die Nachfrage nach Rohstoffen noch stark am Wachsen ist. Dann ist zwangsläufig die Förderung von Primärrohstoffen noch notwendig, auch, um das anthropogene Rohstofflager, aus dem sich das Recycling dann speist, überhaupt erst *aufzubauen*. Recycling kann den Rohstoffbedarf erst dann zu einem großen Anteil decken, wenn die Nachfrage stagniert oder nur noch schwach wächst [26].

Ein Kriterium ist jedoch fundamental: Wie groß ist die Konzentration eines Stoffes im Produkt bzw. im Abfall und welchen Aufwand bereitet es, daraus wieder einen hochwertigen Werkstoff herzustellen? Der Aufwand kann dabei ökonomisch, aber ebenso energetisch und ökologisch verstanden werden. Da die gleiche Überlegung auch für Primärrohstoffe angestellt werden kann, lassen sich damit Bergbau und Recycling direkt vergleichen.

2.1. Metallkonzentrationen der Sekundärorkommen

Metalle treten in sehr unterschiedlichen Konzentrationen in Erzen auf, das reicht – für abbauwürdige Vorkommen – von einigen 10 % bis in den ppm-Bereich. Häufig wird verkannt, dass auch in Produkten und Reststoffen eine solche Streuung von Konzentrationen auftritt. Analysen über die Metallzusammensetzung in Smartphones zeigen ebenfalls eine Streubreite von einigen 10 % bis einige Zehntel ppm [5]. Oft ist aber die Zusammensetzung in Produkten komplexer als in Erzen und die Aufbereitung eine größere metallurgische Herausforderung [17]. Für Bild 4 wurden die Konzentrationen von insgesamt 48 Metallen in ihren primären Quellen (Erzen) und in sekundären Quellen (Produkten) zusammengestellt [20, 21]. Jeder Datenpunkt stellt ein Metall mit seinem typischen Konzentrationswert im Erz sowie in einem derzeitigen Hauptanwendungsgebiet dar. Die Diagonale in dem Diagramm gibt an, wo die Konzentrationen der primären und sekundären Quellen identisch sind. Alle Punkte über der Diagonale weisen geringere Konzentrationen in den sekundären als in den primären Quellen auf, unter der Diagonale verhält es sich vice versa. Mit anderen Worten, bei allen Punkten, die über der Diagonale liegen, wurden die Metalle in der Technosphäre unter ihr ursprüngliches Konzentrationsniveau der Ökosphäre verdünnt. Das betrifft insbesondere die Techno-logiemetalle. Extrembeispiel hierfür ist u.a. der Einsatz von Seltenen Erden in Elektronikprodukten. So ist z.B. die Konzentration von Cer in Flachbildschirmen um den Faktor 150.000 geringer als in Erzen. Die Faktoren der meisten Metalle in sekundären Quellen, deren Konzentrationen niedriger sind als die der primären Quellen, liegen allerdings in einem moderaten Bereich zwischen 1 und 100 [20].

Interessant ist, wenn diese Konzentrationen in Verhältnis zu den End-of-Life-Recyclingquoten (EoL-RQ) gesetzt werden. Sehr bekannt ist eine Abbildung des International Resource Panels, bei dem in einem Periodensystem der chemischen Elemente die weltweiten EoL-Recyclingquoten für Metalle eingezeichnet sind [10] und viele Metalle Quoten unter 1 % aufweisen. Mit Bild 4 werden diese Zahlen verständlich [21]: geringe Recyclingquoten (rote Markierungen) treten im Diagramm links (geringe Konzentrationen in den Sekundärquellen) und oberhalb der Diagonalen (Konzentration in Primärquellen höher als in Sekundärquellen) auf. Sind die Konzentrationen in den Sekundärquellen hingegen hoch (auf der rechten Seite des Diagramms), so sind die Recyclingquoten (grüne Markierungen) bereits heute hoch.

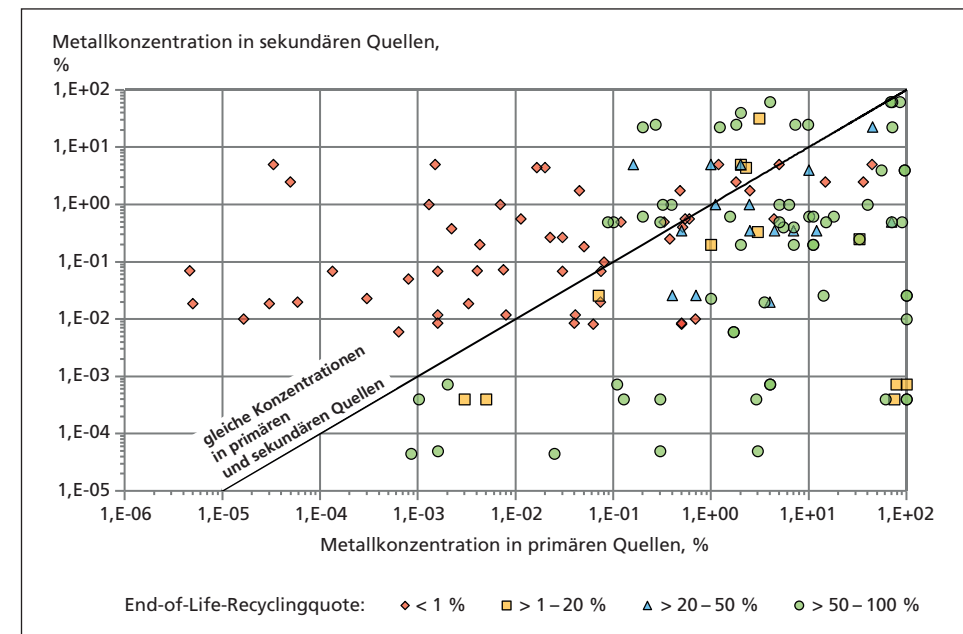


Bild 4: Konzentration von 48 Metallen in verschiedenen Sekundärrohstoff-Fractionen (Abzisse) im Vergleich zu den korrespondierenden Konzentrationen im Erz (Ordinate) [21]

Ob Metalle aus solchen Sekundärquellen recycelt werden oder nicht, folgt heutzutage weitgehend ökonomischen Kriterien. Deshalb kann auf dieser Basis auch ermittelt werden, welcher Anreiz für ein Recycling besteht. Eine entsprechende Darstellung findet sich in Bild 5 [20]. Hier zeigen sich zwei Einflussfaktoren: das Konzentrationsverhältnis zwischen sekundären und primären Quellen, was die Konkurrenz zwischen zwei Beschaffungsoptionen darstellt und das monetäre Volumen eines möglichen Recyclings. Wenn es sich um geringe Mengen bzw. einen geringen Wert handelt, ist das Recycling unattraktiv.

An Bild 5 kann kritisiert werden, dass hier nach ökonomischen und nicht nach ökologischen Kriterien unterschieden wird. In Bild 6 wurden deshalb die Datenpunkte zusätzlich um den Klimarucksack ergänzt. Die Blasen geben dabei an, wie groß der Klimarucksack der noch verbleibenden Einsparpotenziale aus der jeweiligen Primärgewinnung sind. Hier handelt sich um absolute Zahlen, also um den globalen Klimarucksack der jährlichen Primärproduktionsmenge. Damit ergibt sich ein Indikator, der darstellt wie groß das CO_2 -Einsparpotenzial durch Recycling ist bzw. wäre. Es wird deutlich, dass das CO_2 -Einsparpotenzial sehr stark mit dem monetären Wert korrespondiert. Die größten noch verbleibenden Einsparpotenziale liegen auf der rechten Seite des Diagramms und beziehen sich auf die sekundären Quellen, aus denen die Metalle bereits zu hohen Quoten recycelt werden. Das CO_2 -Einsparpotenzial bei Metallen mit geringem absoluten Marktwert ist dagegen sehr begrenzt, was ein Mengeneffekt ist. Häufig handelt es sich hierbei um Produktionsmengen im Bereich weniger hundert oder tausend Tonnen pro Jahr. Bei den Massenrohstoffen liegen die Werte im Bereich von Millionen Tonnen.

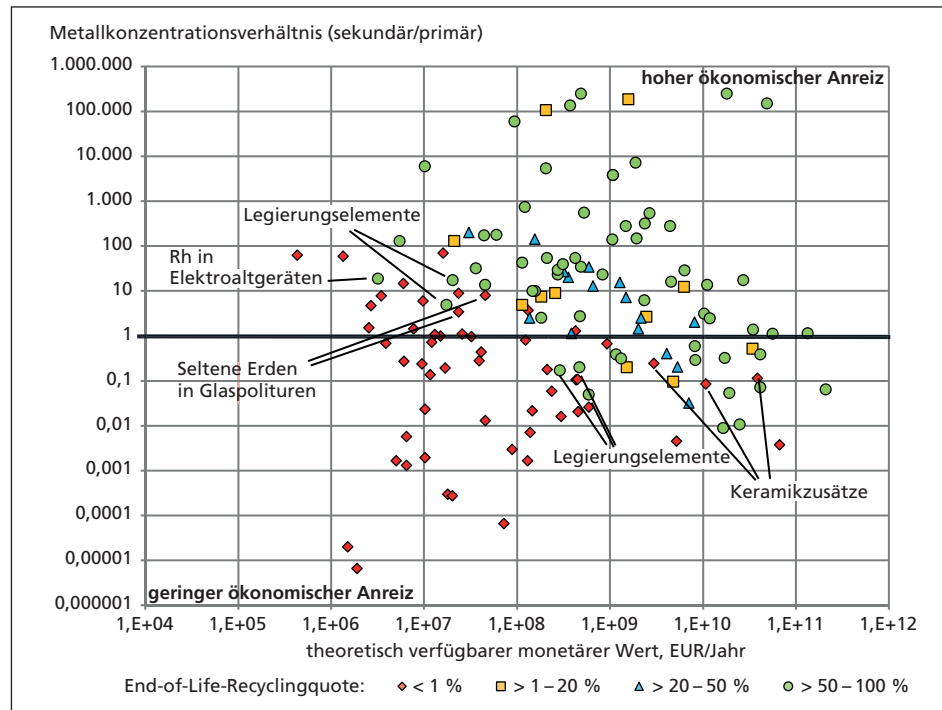


Bild 5: Konzentrationsverhältnis (sekundär/primär) von 48 Metallen in verschiedenen Sekundärrohstoff-Fractionen bezogen auf den gesamten monetären Wert des Recyclingmetalls

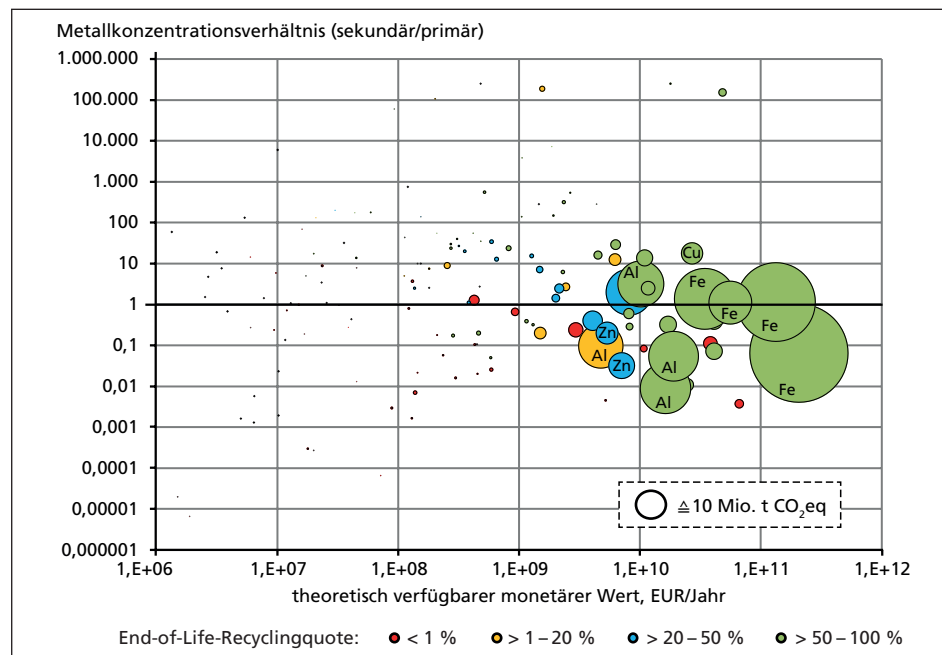


Bild 6: Theoretische CO_2 -Einsparpotenziale (als Blasen relativ dargestellt) für die 48 Metallen in verschiedenen Sekundärrohstoff-Fractionen (weitere Angaben vgl. Bild 5) [21]

Daraus lässt sich schlussfolgern: Soll Recycling forciert werden, um CO_2 -Emissionen einzusparen, so ist die weitere Erhöhung einer ohnehin schon hohen Recyclingquote eines Metalls auf der rechten Seite des Diagramms zielführender als das Recycling – sogar ein weitgehend vollständiges Recycling – von Metallen mit kleinem absoluten Klimarucksack. Das spricht nicht grundsätzlich gegen Recycling, wohl aber für eine klare Zielsetzung, warum Recycling durchgeführt werden soll und für eine Prioritäten-Setzung, welche Stoffströme weiter betrachtet und optimiert werden sollten. Bei den Zielen können neben dem Umwelt- und Klimaschutz auch wirtschaftsstrategische oder sicherheitsrelevante Aspekte hinzutreten. Nur sollten sie dann auch klar benannt werden und dafür geeignete Maßnahmen ergriffen werden.

2.2. Klimarucksäcke und Gesamtoptimum

Wird der Energieaufwand und der Klimarucksack der Primärgewinnung und der Sekundärgewinnung von Metallen verglichen, muss die Qualität der realen Sekundärquellen berücksichtigt werden. Denn Reststoffe können in hoher Qualität, z.B. Kupfer in Kabelschrott, oder in geringer Qualität, z.B. Kupfer im Bauschutt, vorliegen.

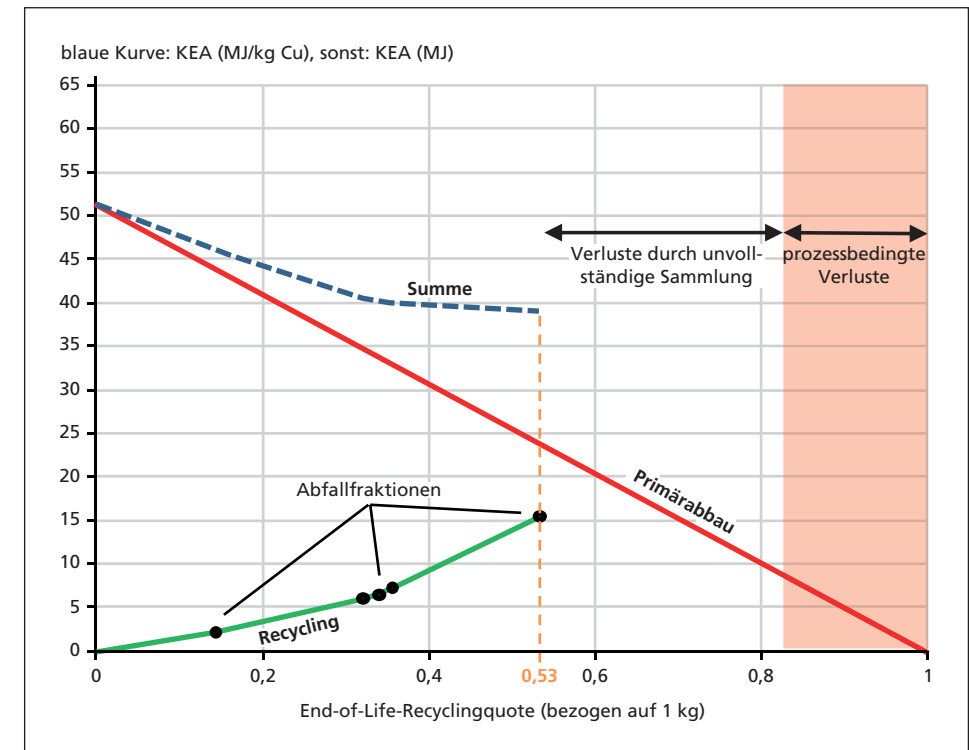


Bild 7: Kumulierter Energieaufwand (KEA) für Sekundär- und Primärgewinnung von Kupfer sowie deren Summe in Abhängigkeit von der End-of-Life-Recyclingquote; die aktuelle Quote liegt bei etwa 53 %; bei der grünen und roten Kurve gilt der Wert jeweils für die entsprechende Menge, z.B. bei $\text{RQ} = 0,4$ für 0,4 kg Cu beim Recycling und 0,6 kg Cu bei Primärgewinnung [21]

In einer Analyse mit diskreten Datenpunkten wurde der Energieaufwand des Kupferrecyclings in Deutschland in Abhängigkeit der gängigen Reststoff-Fractionen ermittelt [21]. Diesen Werten kann die derzeitige Gewinnung von Kupfer aus Erzen gegenübergestellt werden (Bild 7). Es zeigt sich, dass alle Reststoff-Fractionen derzeit energetisch günstiger liegen als die Primärgewinnung. Allerdings sind die Unterschiede bei qualitativ schlechten Fraktionen, z.B. Kupfer im Bauschutt, zur Primärgewinnung nicht mehr sehr groß. Aufgabe ist es, das Gesamtsystem zu optimieren, also für Sekundär- und Primärgewinnung in Summe die minimalen CO₂-Emissionen zu ermitteln. Dieses Minimum wird bei einer EoL-Recyclingquote deutlich unter 100 % auftreten. Bei anderen Metallen kann das anders aussehen.

Dies spricht für zwei Aspekte: Liegen erstens qualitativ schlechte Stofffraktionen vor, d.h. geringer Metallgehalt und ein großer erforderlicher Aufwand zur Sortierung und Aufbereitung, so kann die Primärgewinnung aus Erzen energetisch und ökologisch gleichwertig oder sogar sinnvoller sein. Zweitens spricht das für die Notwendigkeit einer besseren Sortierung von Abfall-Fractionen. So könnte beispielsweise bei Bauschutt schon frühzeitig das Kupfer abgetrennt und hochrein gesammelt werden. Problematisch wird es allerdings, wenn Stoffe in Verbundmaterialien oder komplexen Produkten gebunden sind und sich nur mit großem Aufwand herauslösen lassen. Was dann die bessere Lösung ist, muss im Einzelfall z.B. mit ökobilanziellen Methoden überprüft werden. Eine pauschale Antwort kann hier nicht gegeben werden.

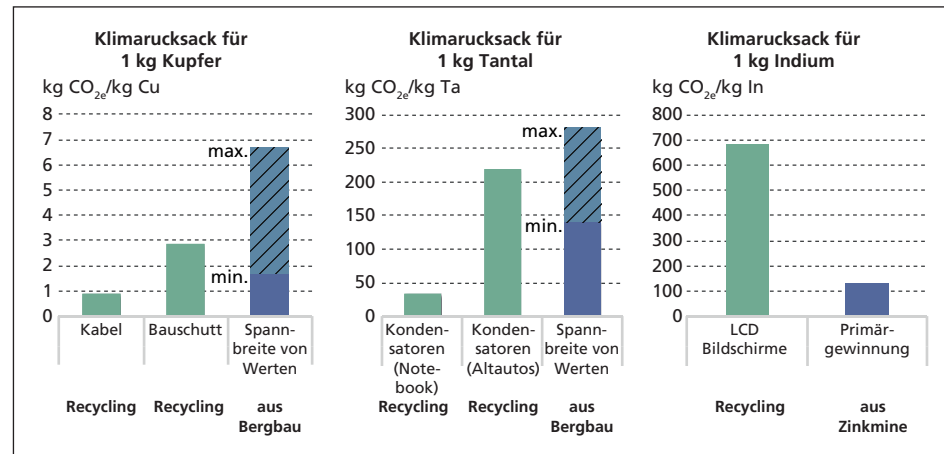


Bild 8: Treibhausgas-Bilanzen für drei Metalle (in kg CO_{2e} pro kg) jeweils im Vergleich von Recycling aus verschiedenen Fraktionen (grün) zur Primärgewinnung (blau)

Die THG-Bilanzen (stets in CO₂-Äquivalenten) für die Primär- und Sekundärgewinnung von Kupfer, Tantal und Indium sind in Bild 8 angegeben. Die Werte stammen teilweise aus eigenen Modellrechnungen, teilweise aus Literaturangaben wie der LCA-Datenbanken EcoInvent bzw. GaBi. Bei diesen Daten wird nochmal deutlich, welchen Einfluss die Qualität der Sekundärquellen hat. Schlechte Fraktionen sind teilweise mit schlechterem Klimarucksack zu recyceln als die Primärgewinnung. Bei Tantal ist zu erwähnen, dass das Tantal derzeit weder aus Notebooks noch aus Altautos recycelt wird, da die Mengen zu gering und die Kosten zu hoch sind. Bei Indium ist die

Konzentration in LCD-Bildschirmen zwar nur einen Faktor zwei bis drei geringer als in gängigen Erzen, dennoch ist der Energiebedarf des Recycling um ein Vielfaches höher als bei der Gewinnung aus Erzen [1].

3. Fazit

Das Umweltbundesamt hat mit seinen ambitionierten Szenarien gezeigt, dass Klimaschutz und Ressourcenschonung miteinander zusammenhängen und gemeinsam betrachtet werden müssen [25]. Insofern ist Circular Economy eine wichtige Strategie, die in den nächsten Jahren neben anderen Klimaschutz-Maßnahmen forciert werden muss. Aber die vorgestellten Ergebnisse zeigen auch, dass es Trade-offs gibt und nicht jedes Recycling oder *Closing the Loop* unter ökologischen Kriterien sinnvoll ist. Deshalb ist es wichtig, bei der Circular Economy-Strategie *Mittel* und *Zweck* nicht zu verwechseln. Sie ist kein Selbstzweck und muss im Einzelfall belegen, welches Ziel sie verfolgt und ob sie unter ökonomischen, ökologischen und sozialen Gesichtspunkten wirklich vorteilhaft ist. Dabei kann auf umfangreiche Erfahrungen und elaborierte Methoden, z.B. das Life Cycle Assessment, zurückgegriffen werden. Dieses Wissen sollte gezielt und explizit genutzt werden, wenn in der Politik Strategien und Maßnahmenpläne entwickelt und letztendlich in der Wirtschaft auch größere Investitionen vorgenommen werden.

4. Literatur

- [1] Amato, A.; Rocchetti, L.; Beolchini, F.: Environmental impact assessment of different end-of-life LCD management strategies. In: Waste Management 2017, Vol. 59, S. 432-441
- [2] Angerer, G. et al.: Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft. Ein Projekt der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften und der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. München: acatech, 2016, S. 42
- [3] Arndt, N.T. et al.: Future Global Mineral Resources. In: Geochemical Perspectives, 2017, Vol. 6, No. 1, S. 1-171
- [4] Bardi, U.: Der geplünderte Planet. Ein Bericht an den Club of Rome. München: oekom, 2013, S. 166
- [5] Bookhagen, B. et al.: Development of a versatile analytical protocol for the comprehensive determination of the elemental composition of smartphone compartments on the example of printed circuit boards. In: Analytical Methods, 2018, Vol. 10, S. 3864
- [6] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ): Erneuerbare Energien im Rohstoffsektor. Verstärkte Nutzung von erneuerbaren Energien. Bonn: GIZ, 2019
- [7] European Commission: Communication on the 2017 List of Critical Raw Materials for the EU. Brussels: COM(2017) 490 final
- [8] European Commission: Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe. Brussels: COM(2014) 398 final/2
- [9] Hagelüken, C.; Meskers, C.E.M.: Complex Life Cycles of Precious and Special Metals. In: Graedel, T.E.; van der Voet, E.: Linkages of Sustainability. Cambridge: MIT Press, 2010, S. 163-197
- [10] International Resource Panel (IRP): Environmental risks and challenges of anthropogenic metals flows and cycles. Paris: UNEP, 2013
- [11] Johnson, K.M. et al.: Estimate of undiscovered copper resources of the world. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2014-3004, 3 p., Reston: USGS, 2013, <http://dx.doi.org/10.3133/fs20143004>
- [12] Kesler, S.E.; Wilkinson, B.H.: Earth's copper resources estimated from tectonic diffusion of porphyry copper deposits. In: Geology, 2008, Vol. 36, 255-258

- [13] Laherrère, J.: Copper Peak. 2010, <http://europe.theoil Drum.com/node/6307>
- [14] Meadows, D. H.; Meadows, D.L.; Randers, J.; Behrens, W.W.: The Limits to Growth. New York: Universe, 1972
- [15] Mudd, G.M.; Jowitt, S.M.: Growing Global Copper Resources, Reserves and Production: Discovery Is Not the Only Control on Supply. In: Economic Geology, 2018, Vol. 113, No. 6, S. 1235-1267
- [16] National Research Council (NRC): Managing Materials for a Twenty-first Century Military. Washington D.C.: National Academies Press, 2008
- [17] Reuter, M. et al.: Challenges of the Circular Economy: A Material, Metallurgical, and Product Design Perspective. In: Annual Review of Materials Research, 2019, Vol. 49, 253-274
- [18] Rötzer, N.; Schmidt, M.: Decreasing Metal Ore Grades—Is the Fear of Resource Depletion Justified? In: Resources 2018, Vol. 7 No. 4, S. 88; <https://doi.org/10.3390/resources7040088>
- [19] Rötzer, N.; Schmidt, M.: Historical, current and future energy demand of global copper production and its impact to climate change. In: Nature Sustainability, 2020 (submitted).
- [20] Schäfer, P.: Recycling – ein Mittel zu welchem Zweck?. Modellbasierte Ermittlung der energetischen Aufwände des Metallrecyclings für einen empirischen Vergleich mit der Primärgewinnung. Dissertation. Karlsruhe: KIT, 2020 (in Druck)
- [21] Schäfer, P.; Schmidt, M.: Discrete-point analysis of the energy demand of primary versus secondary metal production. In: Environmental, Science & Technology, 2019, DOI: 10.1021/acs.est.9b05101
- [22] Schmidt, M.: Scarcity and environmental impact of mineral resources – an old and never-ending discussion. In: Resources, 2019, Vol. 8, No. 2, doi:10.3390/resources8010002
- [23] Schmidt, M.; Görlach, S.: Zurück in die Zukunft – Zum Umgang mit Material- und Energieressourcen in der Zwischenkriegszeit des 20. Jahrhunderts. In: Umweltwirtschaftsforum 2010, Vol. 3-4, S. 217-227
- [24] U.S. Geological Survey (USGS): Mineral Commodity Summaries 2019. Reston: USGS, 2019
- [25] Umweltbundesamt (UBA): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. Dessau: UBA, Climate Change 36/2019, S. 396
- [26] Van der Voet, E. et al.: Environmental Implications of Future Demand Scenarios for Metals. In: Journal of Industrial Ecology, 2018, Vol. 23, No. 1, S. 141-155
- [27] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Zirkuläre Wertschöpfung, VDI-Handlungsempfehlungen. Düsseldorf: VDI, 2019
- [28] Weber, T.; Stuchtey, M.: Deutschland auf dem Weg zur Circular Economy. München: acatech, 2019
- [29] Wellmer, F.-W.: Wie lange reichen unsere Rohstoffvorräte? – Was sind Reserven und Ressourcen? In: Umweltwirtschaftsforum, 2014, 22 Jg., Nr. 2-3, S. 125-132

Danksagung

Die Autoren danken dem Umweltministerium Baden-Württemberg für die Förderung der im Beitrag dargestellten Forschungsergebnisse im Rahmen des Projektes NEXUS (Förderkennzeichen L75 16001).

Ansprechpartner



Professor Dr. Mario Schmidt
Hochschule Pforzheim
Institutsleiter
Institute for Industrial Ecology (INEC)
Tiefenbronner Str. 65
75175 Pforzheim, Deutschland
+49 7231 28-6406
mario.schmidt@hs-pforzheim.de