

**Zeitschrift:** Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

**Herausgeber:** Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftlern;  
Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

**Band:** 22 (2017)

**Heft:** 1

**Artikel:** Metalle werden niemals knapp : und das ist ein Problem!

**Autor:** Bunge, Rainer

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-738115>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 22.01.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Metalle werden niemals knapp. Und das ist ein Problem!

Rainer Bunge<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Metalle sind – geologisch und eingedenk ihres Recyclingpotenzials – als Ressource praktisch unlimitiert. Allerdings steigen, mit fortschreitender Ausbeutung von reichhaltigen Erzen, die Gewinnungskosten pro Tonne Metall, und damit die Marktpreise, markant an. Da aber die Rohstoff-Preissensitivität der meisten Produkte gering ist, schlägt der Rohstoffpreis kaum in die Konsumentenpreise durch. Folglich können die Metalle sehr teuer werden, ohne dass eine signifikante Dämpfung des Verbrauchs durch die ansteigenden Produktpreise stattfindet. Allerdings steigen mit dem Abbau immer ärmerer Erze, bzw. dem Recycling von metallarmen Abfällen, nicht nur die Kosten, sondern auch die Umweltbelastung. Wir kommen zu dem Schluss, dass das Kernproblem der globalen Rohstoffversorgung nicht darin liegt, dass an sich zu wenige Rohstoffe vorhanden sind, sondern darin, dass die Umwelt mit deren Gewinnung exzessiv belastet wird. Die Lösung dieses Problems ist nicht «weniger produzieren», sondern «sauberer produzieren». Hierzu ist die Einführung von Labels für umweltgerecht gewonnene Metalle erforderlich.

## 1 Ausgangslage

Angesichts des massiv ansteigenden globalen Rohstoffbedarfs ist die Annahme nahelegend, dass Metalle – als «limitierte Ressourcen» – einmal knapp werden müssten. Allerdings sind Metalle chemische Elemente und folglich unzerstörbar. Könnte also ein Metall vollständig aus Abfall zurückgewonnen werden, so könnte es beliebig oft regeneriert werden und wäre damit nicht «limitiert», sondern grundsätzlich «erneuerbar» [1], [2].

Der Transfer von Rohstoffen aus der Geosphäre in die Anthroposphäre und wieder zurück in die Geosphäre ist dynamisch. In der nahen Zukunft erwarten wir eine explosive Steigerung des globalen Rohstoffbedarfs dadurch, dass die Schwellenländer mit ansteigendem Wohlstand nicht nur immer mehr Produkte konsumieren, sondern vor allem auch eine langlebige Infrastruktur aufbauen, die gewaltige Rohstoffmengen auf Jahrzehnte bindet. Dies gilt insbesondere für viele Metalle, z.B. Kupfer in Überlandleitungen, Stahlschienen für Eisenbahnen, Aluminium in Flugzeugen, Neodym in Windkraftanlagen. Diese Lagerbildung ist in Bezug auf die Massenbilanz eine Senke: es geht in den nächsten Jahrzehnten viel mehr hinein, als wieder herauskommt. Andererseits wird der Rohstoffbedarf in den hochentwickelten Ländern stagnieren, denn die langlebige Infrastruktur ist dort bereits aufgebaut und der laufende Rohstoffbedarf kann weitgehend durch das Recycling der bestehenden anthropogenen Lager gedeckt werden.

Wenn wir davon ausgehen, dass sich die Weltbevölkerung in den nächsten 100 Jahren etwa verdoppeln wird und sich der Bedarf

<sup>1</sup> Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik, Hochschule Rapperswil, Schweiz

an Metallen pro Kopf global etwa auf das Niveau ansteigt, auf dem er sich heute in den hochentwickelten Ländern befindet, stellt sich die Frage, ob die Metallreserven ausreichen, um dieses Niveau überhaupt zu erreichen.

Zielsetzung dieser Veröffentlichung ist eine analytische Durchdringung der Zusammenhänge zwischen Ressourcen, Reserven, Preisentwicklung und Umweltrelevanz der Metallgewinnung. Der Fokus unserer Betrachtungen liegt auf Kupfer als Vertreter der Gruppe von Metallen, deren Preis weitgehend durch die «geologische Knappheit» in der Erdkruste gesteuert wird. Dies im Gegensatz zu Aluminium, Magnesium, Titan und Eisen, bei denen die Gesteinskosten, und damit die Marktpreise, weitgehend von den Energiekosten abhängen. Bei den folgenden Ausführungen geht es nicht primär um präzise Aussagen und einen hohen Detaillierungsgrad, sondern vielmehr darum die grundsätzlichen Zusammenhänge darzulegen.

## 2 Der Cut-Off Grade, COG

Um die Reichweite von Rohstoffen abzuschätzen, werden die Begriffe «Ressource» und «Reserve» verwendet. Die Ressource ist

das Potenzial, also die theoretisch maximal verfügbare Menge. Die Reserve hingegen ist die Teilmenge der Ressource, welche relativ präzise erfasst und mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten etwa kostendeckend gewinnbar ist [3], [4], [5].

Der Umfang an Reserven wird vor allem durch den Rohstoffpreis getrieben. Je knapper ein Rohstoff wird, umso höher wird sein Preis und umso mehr Ressourcen werden zu Reserven umgewandelt [6]. Illustriert wird dieser Mechanismus durch den Blick zurück. Durch den Erzabbau ist im Laufe der Jahrzehnte der Wertstoffgehalt, bis zu dem der Abbau wirtschaftlich ist, der so genannte «cut-off-grade» (COG), bei den meisten Metallen stetig gesunken [7], [8]. Mit abnehmendem COG werden immer grössere Mengen Erze mit immer geringeren Metallkonzentrationen abgebaut (Fig. 1).

Der Transfer der Metalle aus der Geosphäre in die Anthroposphäre, und mittels Deponierung bzw. Dissipation wieder zurück in die Geosphäre, ist in den Figuren 2a und 2b beispielhaft für Kupfer skizziert. Die Verteilung der globalen Reserven an Kupfer in Erz ist – stark vereinfacht dargestellt – umgekehrt proportional zur Kupferkonzentration in diesen Erzen. Sehr wenig Kupfer liegt in gedie-

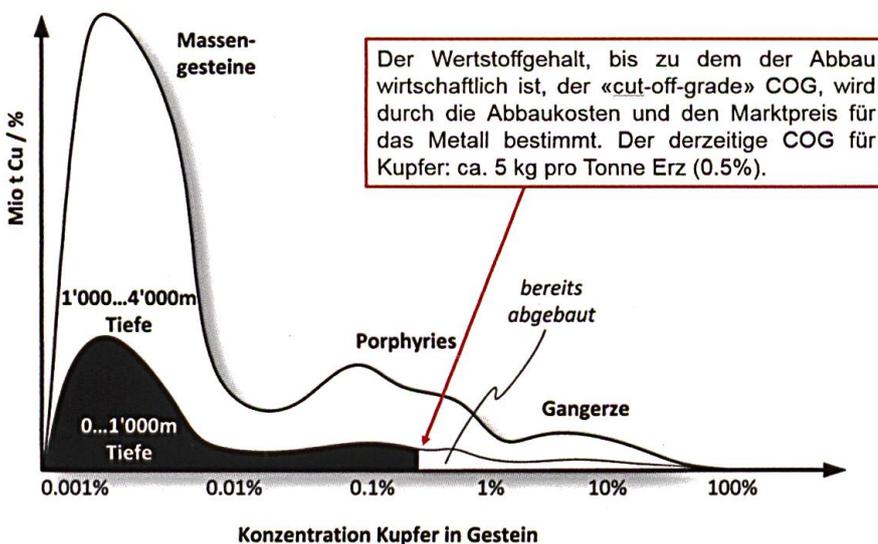


Fig. 1: Stark vereinfachte Darstellung des COG von Kupfer im geologischen Zusammenhang.

gener Form vor (100% Kupfergehalt), hingegen liegt eine praktisch unerschöpfliche Menge in der durchschnittlichen Konzentration von Kupfer in der Erdkruste vor. Lager-

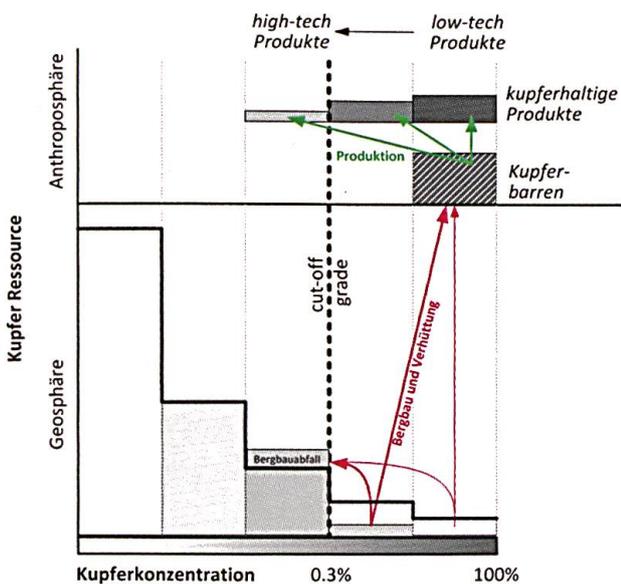


Fig. 2a: Transfer von Kupfer aus der Geosphäre in die Anthroposphäre. In dieser Grafik wird angenommen, dass der cut-off-grade für Kupfererze bei 0.3% liegt. Erze mit hohen Gehalten sind bereits abgebaut, Erze mit niedrigeren Gehalten sind noch nicht wirtschaftlich abbaubar.

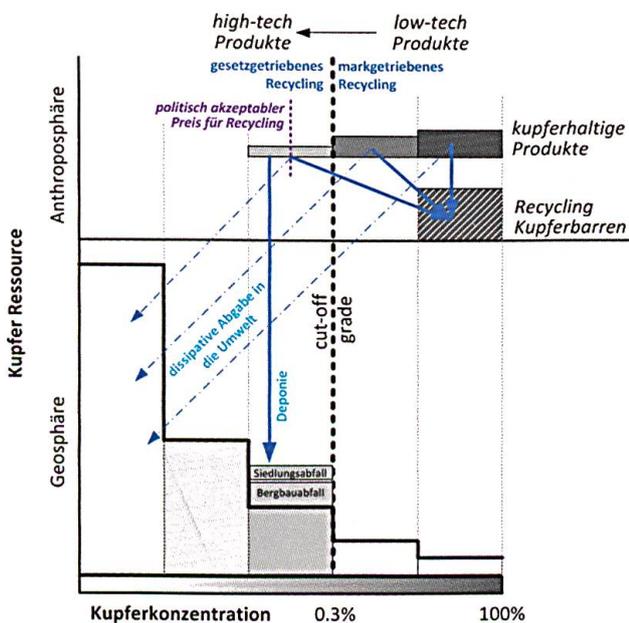


Fig. 2b: Transfer von Kupfer von der Anthroposphäre in die Geosphäre. Falls die Metallgehalte oberhalb des COG liegen, wie dies bei vielen Low-Tech Produkten der Fall ist, wird das Kupfer «marktgetrieben» rezykliert (Beispiele: Kupfer-Starkstromleitung; Dachrinne aus Kupfer). Bei niedrigeren Kupfergehalten im Abfall werden die Abfälle entweder «gesetzesgetrieben» rezykliert, oder sie werden deponiert.

stätten mit einem hohen Kupfergehalt erschöpfen sich durch den fortlaufenden Abbau. Daher muss im Laufe der Zeit auf Lagerstätten mit immer niedrigerer Kupferkonzentration zurückgegriffen werden – der COG sinkt. Die Bergbauabfälle enthalten Metallkonzentrationen unterhalb des COG, werden daher zunächst in das nächstniedrigere Konzentrationskompartiment verschoben, und nach Absinken des COG zu einem späteren Zeitpunkt aufbereitet. Auf dem Weg von der Mine zum Kupferbarren wird das Erz in verschiedenen Verhüttungsschritten auf 100% aufkonzentriert [9]. Aus den Kupferbarren werden dann Produkte hergestellt, die 100% Kupfer oder weniger enthalten.

Der Recyclingprozess, dargestellt in Figur 2b, hat zum Ziel, das Kupfer, welches in ausgemusterten Produkten und Infrastrukturen verbaut ist, wieder als Rohstoff für die Produktion bereitzustellen. Vereinfachend wird angenommen, dass der COG für Abfälle gleich dem COG für Erze sei. Low-Tech Produkte, z.B. Dachrinnen, werden - sofern ihr Kupfergehalt grösser als der COG ist - nach Ablauf ihrer Lebensdauer «marktgetrieben» rezykliert. Der Kupfererlös für diese «Abfälle» kompensiert also die Kosten der Aufbereitung.

Falls die Metallkonzentration im Abfall hingegen kleiner als der COG ist, muss eine Rückgewinnung des Kupfers daraus entweder «subventioniert» werden, oder der Abfall wird deponiert und fällt damit wieder zurück in die Geosphäre. Gesetzliche Vorgaben unterstützen das Metallrecycling unterhalb des COG z.B. durch Erhebung von Recyclinggebühren, deren Höhe sich interessanterweise nicht an Kosten/Nutzen Überlegungen, sondern nach der politischen Akzeptanz bemisst [10], [11]. Die meisten High-Tech Produkte, z.B. Smartphones, enthalten zu wenig Metall für ein marktgetriebenes Recycling und werden daher entweder «gesetzesgetrieben» rezykliert, oder sie werden deponiert.

Ein Teil des Kupfers geht in der Gebrauchsphase dissipativ in die Geosphäre verloren, z.B. als Abtrag von Regenrinnen oder als Bestandteil von Pflanzenschutzmitteln. Dieser Teil des Rohstoffs ist praktisch nicht mehr rückgewinnbar und scheidet daher aus dem Kreislauf des nutzbaren Kupfers aus.

Stark vereinfachend gehen wir davon aus, dass die Reserve an Metallen in Erzen mit sinkendem COG etwa umgekehrt proportional anwächst. Der Grund ist, dass mit sinkendem COG zwar der Wertstoffinhalt je Tonne abgebautes Erz kleiner wird, aber die Menge an Armerzen sehr viel grösser ist als die an Reicherzen. Um diesen Zusammenhang quantitativ zu beschreiben, machen wir folgende Annahme für die verfügbare Menge an Metall, also die Reserve  $M_{Metall}$ , die durch den absinkenden COG freigesetzt wird:

$$M_{Metall} \sim \frac{1}{COG \left[ \frac{kg_{Metall}}{kg_{Erz}} \right]}$$

### 3 Die Rohstoff-Preissensitivität, RPS

Wie oben angemerkt, hängt der Umfang der Reserve vom Rohstoffpreis ab – je höher der Preis an den Metallbörsen, umso grösser die Reserve. Für eine detaillierte Analyse ist es erforderlich festzustellen, wie eine Rohstoffpreiserhöhung auf die Preise von Produkten durchschlägt. Dieser Zusammenhang wird durch die Rohstoffpreis-Sensitivität RPS beschrieben, welche den Anteil der Rohstoffkosten an den Produktkosten beschreibt:

$M_{MetP}$  steht für die Masse an Metall im Produkt in kg,  $L$  für den Marktpreis in US\$/kg

$$RPS = \frac{M_{MetP} L}{K_P}$$

und  $K_P$  für die Kosten des Produkts in US\$. Steigt der Rohstoffpreis von  $L$  auf  $L^*$  ergibt sich der daraus resultierende höhere Produktpreis gemäss folgender Formel:

$$K^*_P = (K_P - L M_{MetP}) + L^* M_{MetP}$$

Wie die dargestellten Zusammenhänge zeigen, ist die RPS keine Konstante sondern variiert in Abhängigkeit von Produkt- und Rohstoffpreis. Figur 3 zeigt, wie sich eine Erhöhung des Rohstoffpreises in Abhängigkeit von der Rohstoffpreis-Sensitivität auf den Produktpreis niederschlägt. Beide Grössen sind normiert indem der neue Preis ( $K^*$  resp.  $L^*$ ) auf den alten bezogen wird ( $K$  resp.  $L$ ). Offenbar wirkt sich eine Steigerung des Rohstoffpreises bei einer kleinen RPS, wie sie z.B. in Elektronikprodukten bezüglich Kupfer zu finden ist, kaum auf den Produktpreis aus. Je höher allerdings die RPS ist, desto stärker schlagen höhere Rohstoffkosten auf den Produktpreis durch.

Die RPS wird im Folgenden kurz anhand des Beispiels Kupfer illustriert. Der Produktpreis  $K_P$  für eine Regenrinne, bestehend aus 100% Kupfer  $K_P$  ( $M_{MetP}$ ), liegt bei 25 US\$/kg, davon 7 US\$ ( $L$ ) für das Kupfer. Folglich ist die RPS, also der Anteil des Kupferpreises am Verkaufspreis, für eine Regenrinne  $7/25=28\%$ . In diesem Fall würde eine Verdreifachung des Kupferpreises (von  $L=7$  US\$/kg auf  $L^*=21$  US\$/kg) den Preis für die Regenrinne auf 39 US\$/kg ( $K^*_P$ ) für verteuern, also fast um einen Faktor 2. Viele Bauherren würden dann wohl auf Regenrinnen aus Kunststoff oder verzinktem Stahl ausweichen. Dies gilt auch für viele andere Low-Tech Produkte: hier kann man bei ansteigenden Rohstoffpreisen häufig auf andere, billigere Materialien ausweichen.

Anders sieht es bei High-Tech Produkten aus. Angenommen in einem Mobiltelefon seien 5g ( $M_{MetP}$ ) Kupfer verbaut [12]. Bei einem Kupfer-Weltmarktpreis von  $L=7$  US\$/kg liegt der Wert des in dem Mobiltele-

fon eingebauten Kupfers bei 0.04 US\$. Bei einem Preis  $K_p$  für das Mobiltelefon von 400 US\$ beträgt die RPS nur 0.01%. Der Preis des Mobiltelefons hängt also kaum vom Kupferpreis ab. Bei einer Verdreifachung des Kupferpreises würden sich die Herstellungskosten des Mobiltelefons nur um rund 0.07 US\$ erhöhen, also praktisch gar nicht.

Aus diesen beiden Beispielen kann man allgemein ableiten, dass die in den nächsten Jahrzehnten zu erwartenden massiven Preissteigerungen der Metalle bei Low-Tech Produkten sehr merklich auf den Produktpreis durchschlagen werden, hingegen bei High-Tech Produkten praktisch gar nicht.

Figur 4 zeigt anhand von weiteren Produktbeispielen die abnehmende RPS im Verlauf der Wertschöpfungskette. Eine Erhöhung des Rohstoffpreises schlägt massiv auf Industrieprodukte wie Transformatoren oder Generatoren durch. Diese Produkte bestehen grossenteils aus Kupfer und haben eine hohe RPS. Aber der Endverbraucher kauft weder Generatoren noch Transformatoren und auch keine Starkstromleitungen, sondern elektrische Energie. Die Kilowattstunde Strom hat aber wiederum eine sehr geringe

RPS, sodass ein höherer Kupferpreis kaum auf den Strompreis durchschlägt.

Da die Kosten der vom Endkunden erworbenen Produkte kaum vom Rohstoffpreis abhängen, wird – entgegen weithin verbreiteter Annahme – kein steigender Kostendruck auf den Verbraucher aufgebaut, der zu einer starken Dämpfung des Rohstoffbedarfs führen könnte.

#### 4 Modellierung der globalen Rohstofflager

In der nahen Zukunft ist eine explosive Steigerung des globalen Rohstoffbedarfs dadurch zu erwarten, dass die Schwellenländer mit ansteigendem Wohlstand nicht nur immer grössere Mengen an Produkten konsumieren, sondern vor allem auch langlebige Materiallager aufbauen, die gewaltige Rohstoffmengen binden, insbesondere Metalle [13], [14]. Die naheliegende Idee diesen Metallbedarf durch forciertes Recycling zu decken ist leider nicht zielführend. Durch das Metallrecycling kann, per Definition, nur der aus einem urbanen Metalllager abfließende Anteil erfasst und zurückgeführt wer-

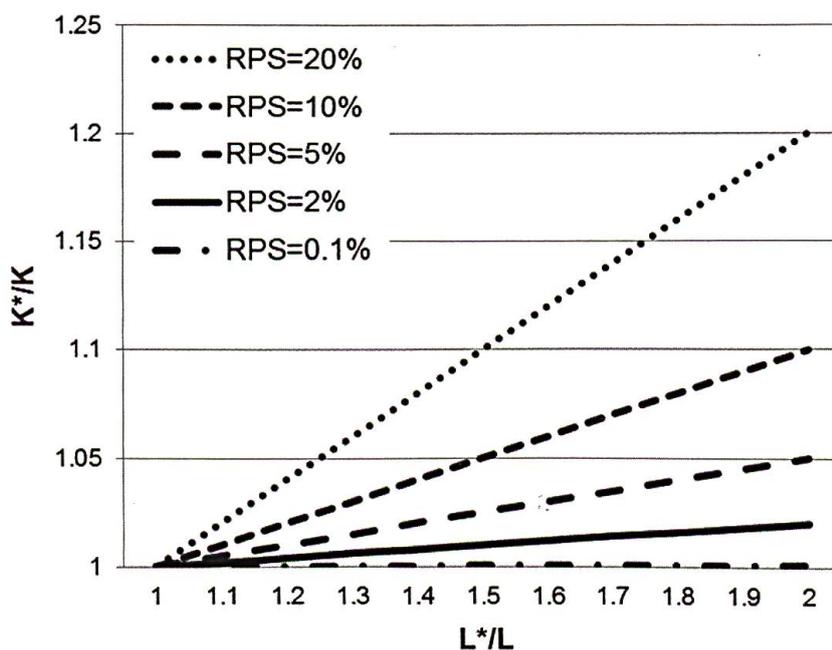


Fig. 3: Der Zusammenhang zwischen dem normierten Rohstoffpreis ( $L^*/L$ ) und den normierten Produktkosten ( $K^*/K$ ) für verschiedene Rohstoffpreis-Sensitivitäten RPS.

Kupfer											
Produkt	Münze	Generator	Transformator	Dachrinne	Isol. Draht	Isol. Draht verlegt	PKW	Wasserkraftwerk (146 GWh)	Elektromotor 230V	kWh (Angaben pro kWh, nicht pro kg)	Smartphone
											
Cu-Gehalt RPS	68.25%	56.00%	40.00%	28.00%	7.78%	1.05%	0.56%	0.26%	0.09%	0.01%	0.01%
	100%	50%	50%	100%	40%	40%	1.60%	3.50%	7%	0.0004%	5%

Fig. 4: Beispiel Kupfer - Abnehmende Rohstoff-Preissensitivität entlang der Wertschöpfungskette.

den, es kann aber kein Lager aufgebaut werden. Folglich wird das Metallrecycling in den nächsten Jahrzehnten, bis die Metalllager auch in den Schwellenländern aufgebaut sind, auf globaler Ebene eine untergeordnete Rolle spielen – jedenfalls im Vergleich zu den aus Primärrohstoffen bereitzustellenden Metallmengen [15]. Anschliessend kehrt sich die Situation um: wenn die globalen Metalllager gesättigt sind (wie derzeit schon bei uns), wird die Erzproduktion in den Hintergrund treten und das Recycling in den Vordergrund.

Die unten diskutierte Abschätzung des künftigen Kupferflusses und des Kupferlagers basiert auf einer Dynamischen-Material-Fluss-Analyse (DMFA), [16], [17]. In unsere Betrachtungen haben wir sowohl Low-Tech Produkte (wie Dachrinnen) als auch High-Tech Produkte (wie Mobiltelefone) einbezogen. Low-Tech Produkte sind meist Bestandteil der Infrastruktur und daher langlebig. Das Kupfer, welches darin verbaut ist, bleibt folglich über viele Jahre im Lager. Anders sieht es bei High-Tech Produkten aus. Diese werden durch den Konsumenten bereits nach relativ kurzer Zeit ersetzt, wodurch das darin enthaltene Kupfer aus dem Lager abfließt. Aus dem Lager abfließende, kupferhaltige Produkte werden entweder recycelt, oder in Deponien beseitigt. Das Kupfer aus den recycelten Produkten wird ins Lager zurückgeführt, der Kreislauf schliesst sich (18). Das Kupfer, welches in die Beseiti-

gung fließt, muss durch Kupfer aus Erz ersetzt werden (19).

Wie in Figur 5 dargestellt ist, gibt es zwischen der Kupferproduktion, dem Kupferpreis und dem COG Rückkopplungseffekte. Mit fortschreitender Kupferproduktion sinkt der COG, weil zunehmend auf Armerze zurückgegriffen werden muss. Mit sinkendem COG steigt der Aufwand je Kilogramm Kupfer, weil grössere Mengen an Material umgesetzt werden müssen. Mit ansteigenden Gestehungskosten steigt der Marktpreis für Kupfer. Ein starker Preisanstieg hat schliesslich einen dämpfenden Effekt auf die Nachfrage nach Kupfer, z.B. indem Kupfer in Low-Tech Produkten durch billigere Materialien ersetzt wird, z.B. Dachrinnen aus Kunststoff oder verzinktem Stahlblech anstatt aus Kupfer. Durch diese negative Rückkopplung werden die Nachfrage, und damit der

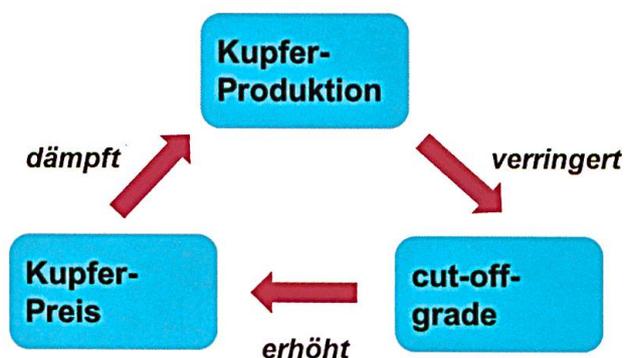


Fig. 5: Rückkopplungseffekte zwischen der Kupferproduktion, dem cut-off-grade und dem Kupferpreis.

Anstieg der globalen Kupferproduktion, gedämpft.

Kupfer ist Bestandteil verschiedenster Produkte mit unterschiedlicher Lebensdauer und Recyclingrate. Bei der Modellierung wurde zwischen den zwei Produktkategorien «Infrastruktur & Gebäuden» sowie «Mobile Gegenstände» unterschieden. «Infrastruktur & Gebäude» wurde eine Lebensdauer von 40 Jahren und eine Recyclingrate von 70% zugewiesen. Die Lebensdauer von mobilen Gegenständen wurde auf 14 Jahre und deren Recyclingrate 20% festgelegt [20], [21]. Die Produkte der Kategorie «Infrastruktur & Gebäude» sind wegen ihres höheren COG für das Recycling zwar grundsätzlich ergiebiger als «Mobile Gegenstände». Sie sind aber auch langlebiger, daher länger in die Gebrauchsphase eingebunden, und stehen folglich erst zu einem späteren Zeitpunkt für ein Recycling überhaupt zur Verfügung.

Figur 6 zeigt die Entwicklung des Kupfer-Lagerbestands pro Kopf verschiedener Länder von 1900 bis 2020. Europa und die USA haben ihre Kupferlager schon heute vollständig aufgebaut – das Inventar hat sich bei rund 300 kg/Einwohner stabilisiert. Schwellenländer wie Brasilien, China oder Indien stehen heute erst am Anfang dieser Entwicklung. Global gesehen befinden wir uns zur

Zeit bei nur etwa 25 bis 35 kg/Kopf (Sternsymbol), also rund einem Zehntel der Menge, die pro Kopf in den entwickelten Ländern im urbanen Lager akkumuliert wurde.

Die Entwicklung des globalen anthropogenen Kupferlagers von 1900 bis 2150 ist in den Figuren 7 und 8 skizziert. Wie der Grafik zu entnehmen ist, wächst der Rohstoffbedarf in den Entwicklungs- und Schwellenländern noch bis Mitte dieses Jahrhunderts massiv an. Erst nach 2060 sinkt das globale Kupferlager durch die dämpfenden Rückkopplungsmechanismen (aufgrund des hohen Preises) und aufgrund der stagnierenden Weltbevölkerung wieder ab.

Die Bedeutung des Recyclings steigt zwar stetig an, doch erst gegen Ende dieses Jahrhunderts wird sich ein Grossteil des Kupferbedarfs durch Recycling decken lassen. Wegen der dissipativen Verluste wird es auch in der Zukunft nicht möglich sein, ganz auf den Primärerzabbau zu verzichten.

In Figur 9 und Figur 10 ist für Kupfer die Entwicklung von COG, Börsenpreis und Lagerentwicklung dargestellt. Die Unsicherheit wurde mittels Monte-Carlo-Modellierung ermittelt. Berücksichtigt wurden Szenarien ohne Dämpfung (links), und mit Dämpfung (rechts) des Kupferverbrauchs durch ansteigende Kupferpreise.

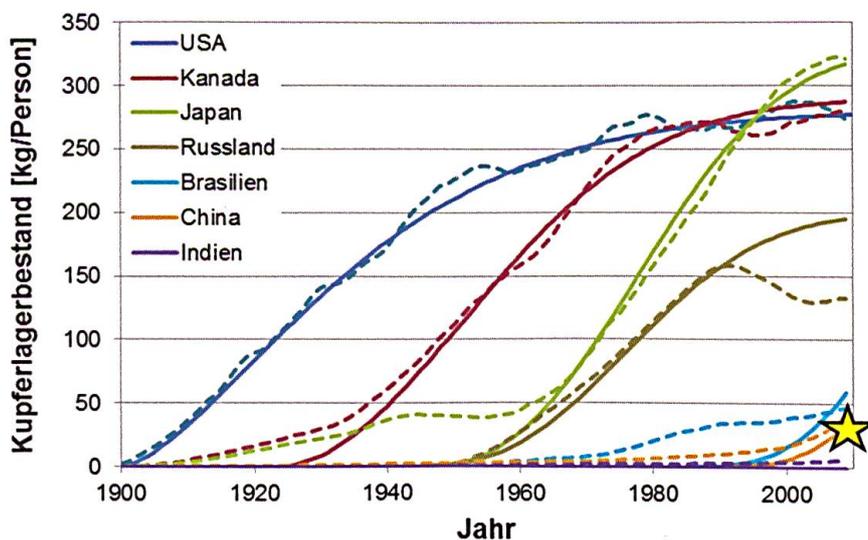


Fig. 6: Die Entwicklung des Kupfer-Lagerbestands pro Kopf von 1900 bis 2020. Die gestrichelten Linien repräsentieren die Messwerte und die durchgezogenen Linien die Approximation durch RRSB-Verteilungen, mit welchen die Messwerte angenähert wurden. Der Stern markiert das Niveau des aktuellen durchschnittlichen globalen Kupferinventars.

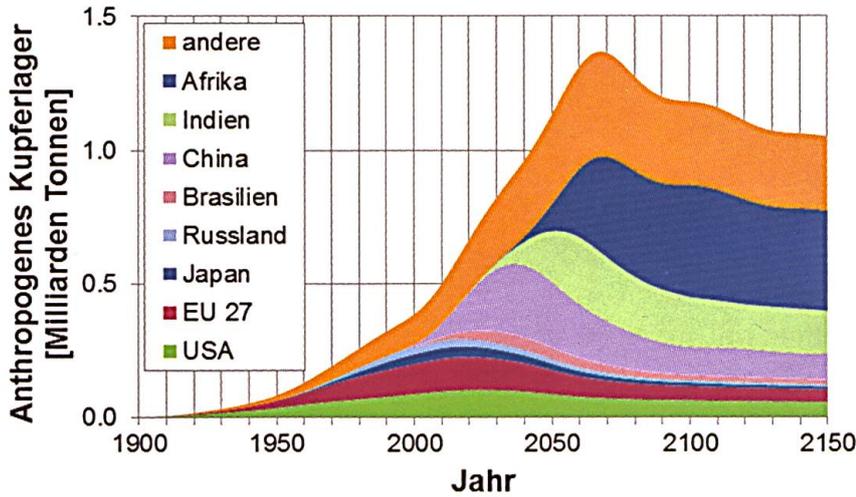


Fig. 7: Der totale globale Lagerbestand an Kupfer wird sich in den nächsten Jahren vervielfachen bevor er aufgrund von Substitutionseffekten bei Low-Tech-Produkten, infolge des massiven Preisanstieges von Kupfer, wieder etwas zurückgeht.

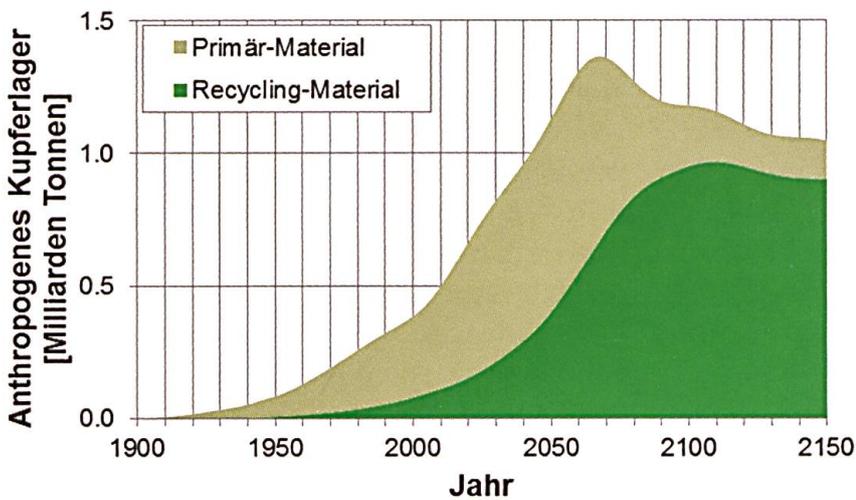


Fig. 8: Da sich das Kupferlager, global betrachtet, in den nächsten Jahrzehnten noch im Aufbau befindet, kann ein Grossteil des Kupfers in dieser Phase nur durch die Erzgewinnung bereitgestellt werden («Primärmaterial»). Das Recycling spielt erst mit der Sättigung der globalen Lager eine dominierende Rolle, eilt also der Lagerentwicklung um einige Jahrzehnte hinterher.

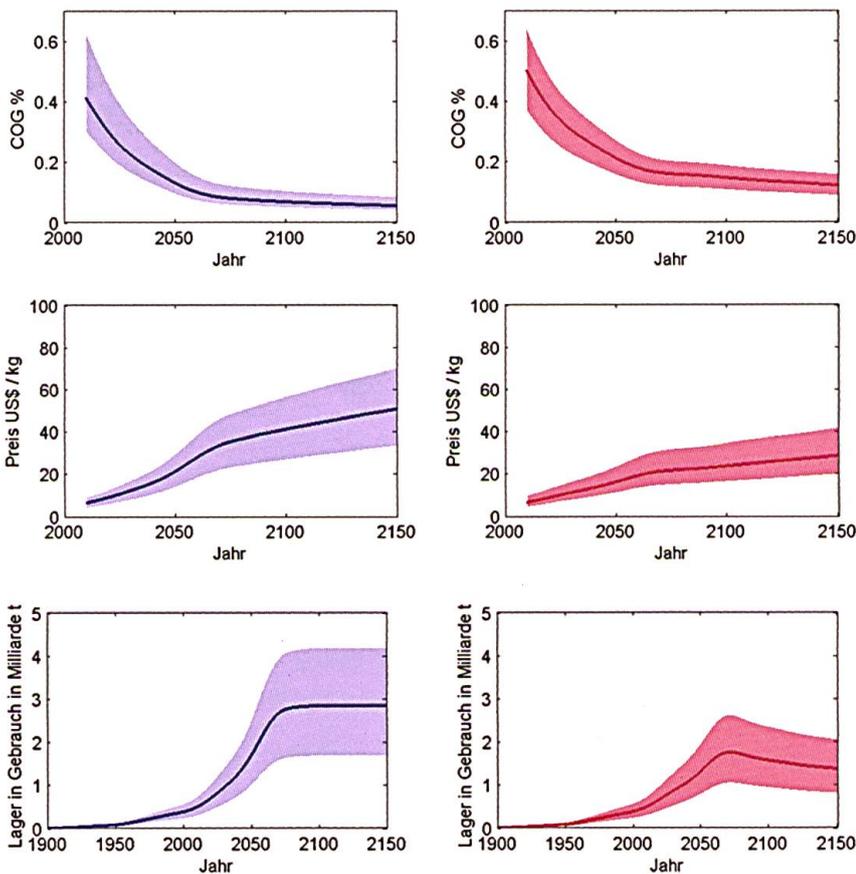


Fig. 9: Modellierung der Entwicklung des COG (oben) und des Rohstoffpreises (unten), links ohne und rechts mit Dämpfung des Kupferverbrauchs aufgrund ansteigender Preise.

Fig. 10: Modellierung der Lagerentwicklung: links ohne und rechts mit Dämpfung.

## 5 Umweltbelastung durch Metallgewinnung

Eine Methode zur Abschätzung der Umweltbelastung ist die Ökobilanzierung, z.B. nach der Methode der ökologischen Knappheit. Bei dieser Methode wird jede Umwelteinwirkung durch eine entsprechende Anzahl Umweltbelastungspunkte (UBP) quantifiziert [22]. Um die einzelnen Rohstoffe untereinander vergleichbar zu machen, werden alle Umwelteinwirkungen erfasst, welche bis zu einer definierten Verarbeitungsstufe im Lebenszyklus anfallen. Im Folgenden sind die Umwelteinwirkungen berücksichtigt, welche von der Mine bis zur Lieferung der Rohstoff-Barren ins Regionallager anfallen.

Sehr gering konzentrierte Erze (wie Gold) verursachen pro Kilogramm extrahiertem Wertstoff eine sehr viel höhere Umweltschädigung als Erze mit hohen Gehalten (z.B. Phosphate) [23]. Sie sind aber eben wegen der geringen Konzentration im Erz auch nur unter hohen Kosten gewinnbar – wie oben ausgeführt. Folglich korrelieren Umweltbelastung in UBP und Rohstoffpreis. Die Korrelation zwischen der Umweltbelastung in UBP und dem Rohstoffpreis ist anhand einer Vielzahl von Beispielen in Figur 11 verdeutlicht.

Bemerkenswert ist, dass Quecksilber eine deutlich höhere Umweltbelastung verursacht, als man anhand des Marktpreises erwarten sollte. Diese Abweichung ist ein Indiz dafür, dass Quecksilber eine sehr hohe spezifische Toxizität aufweist, während die Umwelteinflüsse der meisten anderen Rohstoffe überwiegend durch die Menge an bewegtem Material dominiert werden («ökologischer Rucksack»). Je tiefer der COG, umso verdünnter ist das Material, umso höher sind die Gewinnungskosten und entsprechend höher ist der Preis. Ist der Rohstoffpreis bekannt, lassen sich die UBP der einzelnen Metalle mithilfe des Zusammenhangs in Figur 11 abschätzen.

Aus unseren Betrachtungen zu COG und Rohstoffpreis ergibt sich folgender verblüffend einfacher Zusammenhang: Der COG ist umgekehrt proportional zum Rohstoffpreis/kg. Der Grund liegt darin, dass aktuell die Gewinnung von einer Tonne Erz rund US\$ 35.- kostet, völlig unabhängig davon um welches Erz mit welchem Gehalt es sich handelt und wo auf der Welt es abgebaut wird. Je geringer der Metallgehalt des Erzes allerdings ist, umso höher muss dessen Marktpreis sein, um die US\$ 35.- Gewinnungskosten zu tragen. Bei einem Marktpreis von US\$ 7.- pro Kilogramm Kupfer errechnet sich der COG zu 0.5%, denn ein Gehalt von 5 kg Kupfer kompensiert gerade die Gestehungskosten von US\$ 35.- pro Tonne Erz. In analoger Weise errechnet sich der derzeitige COG für Gold (Marktpreis US\$ 35.-/g) zu 1g/t.

Analoge Betrachtungen gelten für die Umweltbilanz des Erzabbaus. Der ökologische Aufwand um eine Tonne Erz abzubauen und das Metall daraus zu extrahieren beträgt etwa 100'000 Umweltbelastungspunkte (UBP), unabhängig davon welches Erz und wie hoch dessen Metallgehalt. Folglich ist die Umweltbelastung bei Erzen mit geringen Metallgehalten (z.B. Gold) je Kilogramm extrahiertem Metall viel höher als bei Erzen mit hohen Metallgehalten (wie z.B. Eisen).

Zusammengefasst können folgende «Konstanten» für grobe Abschätzungen verwendet werden:

- Gestehungskosten Rohstoffe 2016:  
B1 = 35 US\$/Tonne «Erz»
- Umwelteinwirkung Rohstoffgewinnung 2016: B2 = 100'000 UBP/Tonne «Erz»

Daraus, dass der Marktpreis eines Metalls umgekehrt proportional zu dessen Gehalt ist (COG) und dass die Umweltbelastung zur Extraktion eines Metalls ebenfalls umge-

kehrt proportional zum COG ist, folgt, dass Marktpreis und Umweltbelastung bei Rohstoffen korrelieren sollten. Dies wurde in Figur 11 verifiziert.

## 6 Fazit

Ein Hauptproblem der künftigen Rohstoffversorgung ist die stark ansteigende Masse an geringhaltigen Erzen, welche infolge des sinkenden COG abgebaut werden muss – mit verheerenden Auswirkungen für die Umwelt. Das Problem der künftigen Rohstoffversorgung ist weniger ökonomischer als viel mehr ökologischer Natur. Mit den in Zukunft bereitzustellenden gigantischen Mengen an Metallen werden massive Umweltprobleme ausgelöst. Dies betrifft insbesondere den dissipativen Schadstoffeintrag in die Umwelt durch die Metallgewinnung aus Erzen und Abfällen einerseits, sowie während der Gebrauchsphase langlebiger Güter andererseits (z.B. durch Korrosion). Die Rohstoffgewinnung erfordert einen stark ansteigenden Ressourcenaufwand (Energie, Chemikalien), und generiert Unmengen an Abraum. Emissionen entstehen aus dem Abraum und den Aufbereitungsrückständen vor allem wenn

Schwermetalle auslaugen (Stichwort «acid mine drainage»).

Das Recycling kann innerhalb der nächsten 20 Jahre nur einen kleinen Teil des massiv ansteigenden Rohstoffbedarfs decken, weil erstens Lager grundsätzlich nicht durch Recycling aufgebaut werden können, und zweitens weil momentan in den Schwellenländern viele Metalle in langlebige Güter wie Infrastrukturbauten (Kupfer-Starkstromkabel, Schienen etc.) eingebaut werden und sich damit dem unmittelbar rezyklierbaren «Umlauf» entziehen.

Um die bergbaubezogenen Umweltprobleme in den Griff zu bekommen, müssen wir den Bergbau «sauberer» gestalten. Der dreckigste Anbieter ist häufig auch der billigste Anbieter und gibt damit den Marktpreis vor – siehe die Produktion von «Seltenen Erden» in China. Dies führt in einem freien Markt zu einer «Abwärtsspirale» der Rohstoffpreise auf Kosten der Umwelt. Um aus dieser Spirale auszubrechen, müssen Umwelt- und Sozialstandards für Metalle in Form von Labels eingeführt werden (entsprechend Havelaar, Fairtrade).

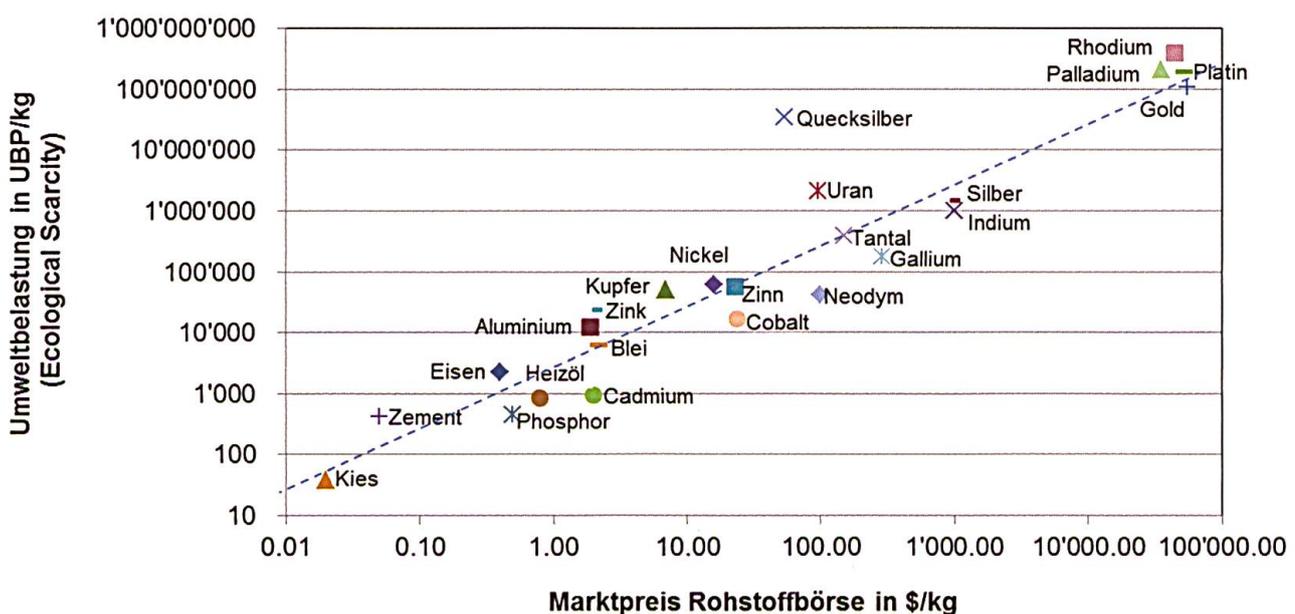


Fig. 11: Der Zusammenhang zwischen der Umweltbelastung, modelliert mit der Ökobilanzierungsmethode «Ecological Scarcity», und dem Rohstoffpreis.

Man mag anführen, dass eine saubere Gewinnung der Metalle die ohnehin stark ansteigenden Metallpreise noch weiter verteuern würde. Glücklicherweise ist aber die geringe Rohstoff-Preissensitivität unserer Produkte und Dienstleistungen nicht nur Kern des Problems, sondern auch der Schlüssel zu dessen Lösung. Wäre der Konsument bereit, beispielsweise 1% mehr für ein aus umweltverträglich gewonnenen Rohstoffen bestehendes Mobiltelefon zu bezahlen, dann könnten der Produzenten dieser «Öko-Rohstoffe» einen massiven Aufschlag auf den Marktpreis der verbauten Metalle verlangen, und sich ökologisch profilieren, ohne dass sie ihren Kunden einen merkbar höheren Preis überwälzen müssten [25], [27]. Diese Überlegungen gelten vor allem für die so genannten «Gewürzmetalle» (Indium, Gallium...), die in winzigen Mengen in praktisch allen elektronischen Geräten eingesetzt werden.

Folgende Handlungsempfehlungen werden aus diesem Fazit abgeleitet:

- Deklarationspflicht der Rohstoffe zur Herstellung von Elektronikprodukten (ähnlich Lebensmittel): Zertifizierung, Labeling [28].
- Erstellen von Zwischenlagern für Abfälle, welche lagerstabile Rohstoffe enthalten. Die Zwischenlagerung des Abfalls erfolgt, bis der COG des Erzes soweit gesunken ist, dass die zwischengelagerten Abfälle marktgetrieben aufbereitet werden. Eine solche Übergangslösung kommt z.B. für Indium aus Monitoren [29] und Phosphor aus Klärschlammasche [30] in Frage.
- Kontrolle legaler sowie auch illegaler Exporte von E-Produkten und E-Schrott in Schwellenländer, denn die Verwendung von Elektronikprodukten in diesen Ländern nimmt massiv zu. Es spielt übrigens grundsätzlich keine Rolle, ob funktionierende oder defekte Geräte legal oder ille-

gal dorthin exportiert werden. Spätestens nach Ablauf der Lebensdauer der Geräte fallen sie dort als E-Schrott an. Eine Möglichkeit zur Lösung dieses Problems wäre die Rücknahme von einer Tonne E-Schrott aus Schwellenländern für jede Tonne der dorthin exportierten Elektronik.

- Dissipation verhindern, weil die Rohstoffe sonst praktisch nicht mehr rückgewinnbar sind und aus dem Kreislauf ausscheiden.
- Das Metallrecycling als Investition in die Zukunft vorantreiben [24], [26].

Das Kernproblem der globalen Rohstoffversorgung besteht nicht darin, dass die Rohstoffe knapp oder zu teuer werden, sondern dass wir die Umwelt mit deren Gewinnung exzessiv belasten. Eine mögliche Lösung dieses Problems wäre «weniger konsumieren». Dieser Ansatz ist angesichts des immensen Nachholbedarfs der Schwellen- und Entwicklungsländer beim Rohstoffverbrauch jedoch unrealistisch. Wenn wir also nicht «weniger» produzieren können, dann sollten wir wenigstens «sauberer» produzieren. Hierzu ist die Einführung von «Labels» für saubere Rohstoffe unerlässlich.

Die Grundlagen zu dieser Veröffentlichung wurden im Rahmen des Projekts «METCYCLE» für das Bundesamt für Umwelt der Schweiz, BAFU, Abteilung «Abfall und Rohstoffe», erarbeitet.

## Literatur

- [1] Wittmer, Dominic et al., et al. Umweltrelevante metallische Rohstoffe 2.1. Wuppertal: Wuppertal Institut, 2011.
- [2] Bardi, Ugo. Der geplünderte Planet. München: oekom, 2013.
- [3] Anderson, Steven. U.S Geological Survey. 1980.
- [4] Stanzl, Jochen. Logos. Big Picture: Welche Metalle sind wirklich knapp? [Online] 16. 02 2011. [Zitat vom: 27. 11 2012.] <http://www.boerse-go.de/nachricht/Big-Picture-Welche-Metalle-sind-wirklich-knapp,a2467644.html>.
- [5] Meinert, Larry. Mineral Resources Supply & Information with a Focus on Rare Earth Elements. Paris: USGS Mineral Resource Program, 2012.
- [6] von Nauckhoff, Mikael Henrik. Strategische Metalle und Seltenerdmetalle. München: FinanzBuch Verlag GmbH, 2010.
- [7] Minnitt, R.C.A. Cut-off grade determination for the maximum value of a small Wits-type gold mining operation. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 06 2004, S. 277-284.
- [8] Achzet, Benjamin, Armin, Reller und Volker, Zepf. Unternehmensstrategien zur Sicherung von Rohstoffen. Thema Umwelt. Juni 2011, S. 10-11.
- [9] Rosa, Rui Namorado. Kupfer: geht eine lange Erfolgsgeschichte bald zu Ende? [Buchverf.] Ugo Bardi. Der geplünderte Planet. München: oekom, 2013.
- [10] Prior, T., et al., et al. Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. Global Environmental Change. 22, 2012.
- [11] Vieira, Marisa, et al., et al. Ore Grade Decrease as Life Cycle Impact Indicator for Metal Scarcity: the Case of Copper. Environmental Science and Technology. 2012.
- [12] Morf, Leo und Taverna, Ruedi. Metallische und nichtmetallische Stoffe im Elektroschrott, Stoffflussanalyse. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, 2004.
- [13] Günther, Hannes und Kröger, Antje. Chinesisches Monopol bei Seltenen Erden: Risiko für die Hochtechnologie. Berlin: DIW Berlin, 2011.
- [14] Pagani, Marco und Caporali, Stefano. Das Huber-Modell als Prognoseinstrument für die Entwicklung der Rohstoffreserven der Welt. [Buchverf.] Ugo Bardi. Der geplünderte Planet. München: oekom, 2013.
- [15] Bringezu, Stefan. Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2011.
- [16] Streicher-Porte, Martin. Prospective environmental assessment: Model building, material flow assessment and dynamic modeling. Zürich: ETH, 2012.
- [17] Armstrong, Clive, Chaudry, Omar und Streifel, Shane. The outlook for metal markets prepared for G20 Deputies Meeting Sydney 2006. Washington: Oil, Gas Mining and Chemicals Department of the World Bank Group, 2006.
- [18] Buchert, Matthias, et al., et al. Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. Recklinghausen: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2012.
- [19] Morf, Leo, et al., et al. Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste - Sources and fate in a Swiss incineration plant. Waste Management. 2012.
- [20] Bader, H.P., et al., et al. Copper flows in buildings, infrastructure and mobiles: a dynamic model and its application to Switzerland. Clean Technologies and Environmental Policy. 2011.
- [21] Graedel, T.E. What do we know about metal recycling rates? Journal of Industrial Ecology. 2011.
- [22] Jungbluth, Niels, Stucki, Matthias und Leuenberger, Marianne. Gesamt-Umweltbelastung durch Konsum und Produktion der Schweiz. Bern: BAFU, 2011.
- [23] Wittmer, Dominic. Screening Environmentally Relevant Rare Metals and Comparing their Life-Cycle. Darmstadt : Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, 2012.
- [24] Schüler, Doris, et al., et al. Study on Rare Earth and Their Recycling. Darmstadt: Öko-Institut e.V., January 2011.
- [25] von Gleich, Arnim, et al., et al. Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg, Erkenntnisse – Erfahrungen - praktische Erfolge, Endbericht des BMBF-Projektes. Hamburg: Uni Hamburg, 2004.
- [26] Wäger, Patrick, Widmer, Rolf und Böni, Heinz. Strategien für die Rückgewinnung seltener Metalle. St.Gallen: EMPA, 2011.
- [27] van Abel, Bas und Ballester, Miquel. Fairphone. [Online] [Zitat vom: 03. 12 2012.] <http://www.fairphone.com/>.
- [28] Steinbach, Volker, et al., et al. Was können zertifizierte Handelsketten für Metallrohstoffe bewirken? Hannover: Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2011.
- [29] Böni, Heinz und Widmer, Rolf. Entsorgung von Flachbildschirmen in der Schweiz . St.Gallen: EMPA, SWICO, 2011.
- [30] Vuuren, Bouwman und Beusen. Phosphorus demand of the 1970-2100 period: A scenario analysis of resource depletion. Global Environmental Change. 08. 04 2010, S.428-439.