



Seltene Metalle Rohstoffe für Zukunftstechnologien

SATW

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften
Académie suisse des sciences techniques
Accademia svizzera delle scienze tecniche
Swiss Academy of Engineering Sciences

Inhaltsverzeichnis

4	Zusammenfassung
5	Vorwort
6	Eine rasante Entwicklung
7	Mobiltelefone als anthropogenes Rohstofflager
7	Werden seltene Metalle knapp?
9	Kritische Faktoren
14	Beispiel Lithium
16	Beispiel Seltene Erden
18	Beispiel Indium
21	Beispiel Platingruppenmetalle
24	Beispiel Tantal
26	Wege zu einer nachhaltigen Nutzung
26	Vertiefung des Wissens
26	Entwicklung von Handlungsoptionen und -strategien
27	Umsetzung auf institutioneller Ebene
28	Die Rolle der Schweiz: Keine Primärressourcen, keine Verantwortung?
29	Referenzen
32	Impressum

Wissenschaft und Technik zum Wohle der Gesellschaft

Die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) vereinigt Personen, Institutionen und Fachgesellschaften, die in den technischen Wissenschaften und deren Anwendung tätig sind. Sie fördert die Technik zum Wohle der Gesellschaft und stärkt das Verständnis der Gesellschaft für die Technik. Die SATW ist politisch neutral und nicht kommerziell orientiert. Zurzeit hat sie rund 240 Einzelmitglieder und 60 Mitgliedsgesellschaften.

In verschiedenen Fachbereichen setzt die Akademie Arbeitsgruppen ein. Diese erarbeiten Studien sowie Empfehlungen und führen interaktive Veranstaltungen durch. Die SATW unterhält ständige Fachkommissionen auf den Gebieten angewandte Biowissenschaften, Energie, Informations- und Kommunikationstechnologie, Nanotechnologie, Ethik und Technik, Technik und Gesellschaft sowie Auslandsbeziehungen.

Zusammenfassung

Unsere Gesellschaft ist von seltenen Metallen abhängig wie nie zuvor: Mobiltelefone, Flachbildschirme, Digitalkameras, Autos oder Windkraftwerke wären in ihrer heutigen Form und Funktionalität kaum denkbar ohne seltene Metalle, verfügen diese Stoffe doch über aussergewöhnliche Eigenschaften. Platin beispielsweise kommt in Autokatalysatoren zum Einsatz, Tantal wird für die Produktion von Flugzeugturbinen oder von Mikrokondensatoren in Mobiltelefonen verwendet. Indium wird in Verbindung mit Zinn als transparenter Leiter in Flachbildschirmen eingesetzt und Lithium ist entscheidendes Element bei wiederaufladbaren Batterien.

Die Frage, wie der weltweit steigende Bedarf an diesen Elementen mittel- bis längerfristig befriedigt werden kann, wird kontrovers diskutiert. Dabei zeigt sich, dass verschiedene Faktoren das Angebot beeinflussen: So sind die abbauwürdigen Vorkommen seltener Metalle häufig auf einige wenige Gebiete beschränkt; dadurch ergeben sich politisch und wirtschaftlich kritische Abhängigkeiten. Seltene Metalle werden zudem meist nicht alleine abgebaut, sondern fallen als Nebenprodukte bei der Gewinnung von anderen Elementen an. Das Angebot wird bei den seltenen Metallen daher nicht nur durch die unmittelbare Nachfrage nach dem spezifischen Element gesteuert.

Erschwerend kommt hinzu, dass seltene Metalle erst ansatzweise in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Die Gründe dafür sind vielfältig: Lithium etwa ist so günstig, dass sich ein Recycling noch kaum lohnt. Indium lässt sich nur mit grossem Aufwand zurückgewinnen, weil es im einzelnen elektronischen Gerät in sehr geringen Konzentrationen vorkommt. Bei Tantal wiederum stellt sich das Problem, dass dieses Element bei pyrometallurgischen Recyclingprozessen als Reststoff in die Schlacke übergeht und aus dieser nur schwer zurückgewonnen werden kann.

Die konkreten Beispiele in der vorliegenden Schrift zeigen, dass der heutige Umgang mit seltenen Metallen künftig zu kritischen Situationen führen kann. Gefragt sind deshalb Ansätze für einen nachhaltigeren Umgang mit diesen wichtigen Elementen. Dazu braucht es ein besseres Verständnis der entsprechenden Stoffkreisläufe sowie gezielte und koordinierte Massnahmen, die international institutionell verankert sind. Auch die Schweiz als rohstoffarmes Land hat ein grosses Interesse daran, dass nachhaltige Lösungen in diesem Bereich gefunden werden. Als wichtiger Forschungsstandort kann sie einen konkreten Beitrag zur Lösung der anstehenden Probleme leisten.

Vorwort

Seltene Metalle wurden in den letzten Jahren immer häufiger eingesetzt. Insbesondere mit dem Aufkommen der Informations- und Kommunikationstechnologien, aber auch der Photovoltaik, ist der Bedarf an Indium, Platingruppenmetallen oder Seltenen Erden stark angestiegen. In diesem Zusammenhang ist eine Diskussion darüber entbrannt, ob die Verfügbarkeit der seltenen Metalle der Verbreitung dieser Zukunftstechnologien Grenzen setzen könnte. Diese Frage ist auch deshalb von grosser Bedeutung, weil diese Technologien notwendig sind, um die Gesellschaft nachhaltiger zu gestalten.

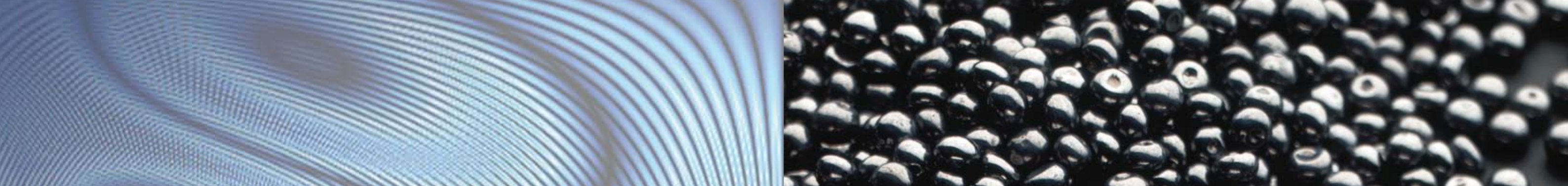
Die vorliegende Schrift zeigt die Problematik der Verfügbarkeit seltener Metalle sowie mögliche Lösungen auf. Dazu stellt sie zunächst Faktoren vor, die kritisch für die Versorgung mit seltenen Metallen werden können. Sodann werden anhand von fünf Beispielen – Indium, Lithium, Platingruppenmetalle, Seltene Erden, Tantal – die momentane und mögliche zukünftige Situation von Angebot und Nachfrage sowie die bestehenden Herausforderungen und Probleme illustriert. Schliesslich werden drei Stossrichtungen vorgestellt, an denen sich ein nachhaltigerer Umgang mit seltenen Metallen orientieren könnte.

Die Verfügbarkeit seltener Metalle wird auch an Tagungen immer öfter diskutiert, so etwa am World Resources Forum (WRF), welches im September 2009 erstmals stattfand und in den wissenschaftlichen Kongress R'09 eingebettet war. Rund 380 Wissenschaftler, Politiker und Wirtschaftsexponenten aus allen Teilen der Welt – darunter auch prominente Persönlichkeiten wie Dennis Meadows (Club of Rome-Studie «Grenzen des Wachstums») und Ernst Ulrich von Weizsäcker – diskutierten dabei in Davos während drei Tagen globale und lokale Fragen des Ressourcenverbrauchs. Sie schlugen auch Ansätze für eine erhöhte Ressourcenproduktivität vor, welche die Effizienz von Material und Energieverbrauch bei Produkten, Dienstleistungen und Prozessen erhöhen könnten. Das WRF wurde von der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) organisiert und von der SATW unterstützt.

Tagtäglich nutzen wir seltene Metalle, meist ohne uns dessen bewusst zu sein. Mit dieser Schrift möchten SATW und Empa dazu beitragen, dass die Öffentlichkeit die aktuelle und die zukünftige Abhängigkeit von seltenen Metallen erkennt. Lassen Sie die Erkenntnisse dieser Schrift in Ihre Entscheidungen und in Ihr persönliches Handeln einfließen – sei dies als Politikerin oder Politiker, als Behördemitglied, als Wirtschaftsfachperson, als Lehrkraft, als Medienschaffender oder als Privatperson! So arbeiten wir gemeinsam daran, nachhaltiger mit unseren Rohstoffen umzugehen und unsere Verantwortung gegenüber zukünftigen Generationen wahrzunehmen.

Prof. Dr. René Dändliker
Präsident der SATW

Dr. Xaver Edelmann
Mitglied Direktion Empa



Eine rasante Entwicklung

Der Verbrauch an seltenen Metallen hat in den letzten Jahren rasant zugenommen, spielen diese Stoffe doch bei vielen Zukunftstechnologien eine entscheidende Rolle. Angesichts dieses Wachstums stellt sich die Frage, inwieweit die Versorgung mit diesen Metallen längerfristig gewährleistet bleibt. Bei näherem Hinsehen zeigt sich, dass eine Reihe von Faktoren sich kritisch auf das Angebot auswirken kann.

Unter geochemisch seltenen Metallen versteht man metallische Stoffe, die in der Erdkruste in einer Konzentration von weniger als 0,01 Gewichtsprozenten vorkommen (Skinner, 1979). Noch zu Beginn des vorigen Jahrhunderts waren seltene Metalle als Rohstoffe für Technologien und Produkte kaum ein Thema. Dies hat sich in den vergangenen Jahrzehnten stark verändert: Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften spielen seltene Metalle bei verschiedenen Anwendungen eine immer wichtigere Rolle, beispielsweise bei Autokatalysatoren, Flugzeugturbinen, Flachbildschirmen, Mobiltelefonen oder Photovoltaikanlagen. Die steigende Bedeutung zeigt sich unter anderem daran, dass für seltene Metalle wie Gallium, Indium, Iridium, Palladium, Rhenium, Rhodium, Ruthenium oder die Seltenen Erden mehr als 80 Prozent der Mengen, die seit 1900 aus mineralischen

Lagerstätten gewonnen worden sind, erst in den vergangenen 30 Jahren abgebaut wurden (Abb. 1).

Für die Zukunft wird erwartet, dass die Nachfrage nach seltenen Metallen weiter steigt. Alternative Energie- und Verkehrstechnologien werden voraussichtlich an Bedeutung gewinnen und die damit einhergehende Massenproduktion beispielsweise von Lithiumionenbatterien, Brennstoffzellen oder Dünnschicht-Photovoltaikzellen wird die Nachfrage nach diesen Elementen rasch ansteigen lassen. Eine kürzlich veröffentlichte Studie zu ausgewählten Zukunftstechnologien (Angerer et al., 2009) ergab, dass der Jahresbedarf an verschiedenen seltenen Metallen im Jahr 2030 um ein Vielfaches höher liegen könnte als die Jahresproduktion für diese Technologien im Jahr 2006 (Abb. 7).

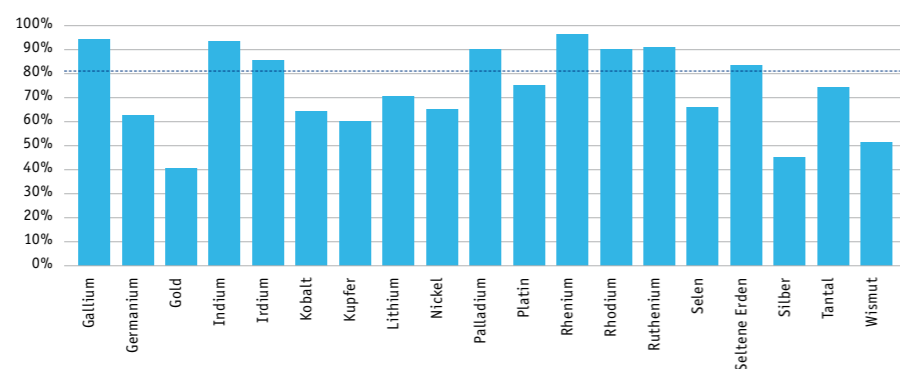


Abb. 1: Anteile ausgewählter, nach 1978 gewonnener seltener Metalle an der kumulierten Primärproduktion seit 1900 (Hagelüken und Meskers, 2010)

Mobiltelefone als anthropogenes Rohstofflager

Ein eindrückliches Beispiel für diese Entwicklung sind Mobiltelefone. Chemisch gesehen können sie als komplexe «Mischungen» von Elementen angesehen werden. In einem einzigen Mobiltelefon finden sich rund 40 chemische Elemente (Abb. 2). Wie bei zahlreichen modernen elektronischen Produkten kommen auch hier die meisten dieser Elemente im Einzelgerät nur in sehr geringen Konzentrationen vor. Durch die Massenproduktion werden jedoch insgesamt beträchtliche Stoffmengen mobilisiert: Im Jahr 2008 wurden knapp 1,3 Milliarden Mobiltelefone verkauft, wobei rund 31 Tonnen Gold, 325 Tonnen Silber, 12 Tonnen Palladium und 4900 Tonnen Kobalt in Umlauf gebracht wurden. Zusammen mit den durch PCs und Laptops ausgelösten, ähnlich grossen Stoffströmen entsprach dies rund 3 Prozent (Silber), 4 Prozent (Gold), 16 Prozent (Palladium) bzw. 23 Prozent (Kobalt) der Jahresminenproduktion der entsprechenden Metalle (Abb. 3).

Werden seltene Metalle knapp?

Aufgrund der stark wachsenden Nachfrage stellt sich die Frage, inwieweit die Versorgung mit seltenen Metallen mittel- und langfristig gedeckt werden kann. Um diese Frage zu beantworten, ist es zunächst wichtig zu verstehen, wie die verfügbaren geologischen Vorräte überhaupt erfasst werden. Ausgehend von bestehenden Daten zu vorhandenen geologischen Lagerstätten sowie der Abbaubarkeit der entsprechenden Mineralien, welche sich an ökonomischen und technologischen Kriterien orientiert, wird grundsätzlich zwischen Ressourcen, Reservebasis und Reserven unterschieden (s. Abb. 4).

Der am weitesten gefasste Begriff der Ressource bezeichnet hier eine Ansammlung (bzw. eine Lagerstätte) von natürlich auftretenden gasförmigen, flüssigen oder festen Materialien in oder auf der Erdkruste, aus der ein Rohstoff gegenwärtig oder in Zukunft potentiell ökonomisch gewonnen werden kann. Die Reservebasis wiederum umfasst denjenigen Teil der Ressourcen, der spezifische Minimalanforderungen bezüglich Abbaubarkeit (u.a. Erzgehalt, Abbautiefe) erfüllt. Diese ergeben sich

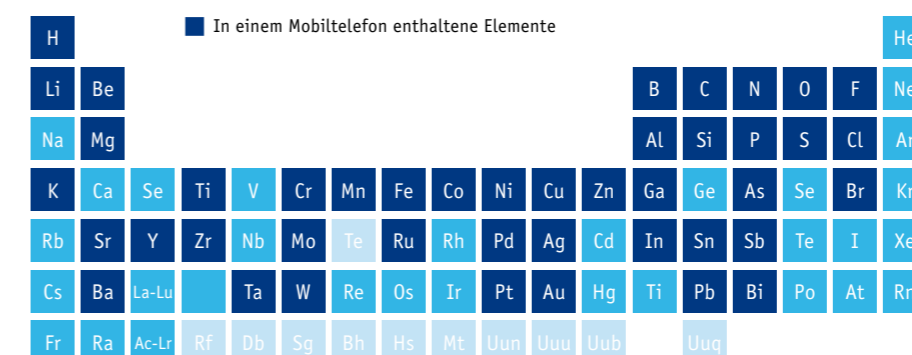


Abb. 2: Materielle Zusammensetzung eines Mobiltelefons (Umicore, 2010)

aus den bestehenden Bergbau- und Produktionspraktiken. Die Reserven schliesslich beinhalten denjenigen Teil der Reservebasis, der unter den gegenwärtigen ökonomischen und technischen Rahmenbedingungen gefördert werden kann (United States Geological Survey (USGS), 2009).

Ressourcen, Reservebasis und Reserven sind keine konstanten, festgelegten Grössen, sondern unterliegen immer wieder Neubewertungen – zum Beispiel wenn neue Lagerstätten gefunden, neue Fördertechnologien entwickelt oder bisher ungenutzte Lagerstätten durch Preisänderungen ökonomisch rentabel werden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden bei den exemplarischen Beschreibungen in den folgenden Kapiteln jeweils sowohl die aktuellen Reserven als auch die Reservebasis angegeben.

Dividiert man die bekannten Reserven oder die Reservebasis durch die heutige Jahresproduktion, lässt sich die sogenannte statische Reichweite ermitteln. Diese Grösse wird immer wieder als Indikator für die absolute

(geologische) Verfügbarkeit eines chemischen Elementes herangezogen (Cohen, 2007). Aufgrund der ständigen Neubewertung von Ressourcen, Reservebasis und Reserven sowie der sich fortlaufend ändernden Nachfrage ist diese Interpretation jedoch irreführend. Die statische Reichweite sollte viel eher als Indikator für die Notwendigkeit einer Erschliessung neuer Lagerstätten sowie eines verstärkten Recyclings bzw. einer Substitution durch weniger kritische Elemente verstanden werden (Wellmer und Wagner, 2006).

Bei der Diskussion um eine mögliche Verknappung seltener Metalle lassen sich – grob vereinfachend – zwei Haltungen unterscheiden (Wolfensberger et al., 2008): Für die Ressourcenpessimisten steht die sogenannte physikalische oder absolute Knappheit im Vordergrund. Demnach könnte aufgrund einer Erschöpfung mineralischer Lagerstätten die Nachfrage nach seltenen Metallen ab einem gewissen Zeitpunkt möglicherweise nicht mehr gedeckt werden (Gordon et al., 2007). Ressourcenoptimisten hingegen vertreten eher einen relativen

Mobiltelefone	PC & Laptop	Anteil an jährlicher Primärproduktion
1300 Mio Stück	300 Mio Stück	
<ul style="list-style-type: none"> x 250 mg Ag ≈ 325 t Ag x 24 mg Au ≈ 31 t Au x 9 mg Pd ≈ 12 t Pd x 9 g Cu ≈ 12,000 t Cu 	<ul style="list-style-type: none"> x 1000 mg Ag ≈ 300 t Ag x 220 mg Au ≈ 66 t Au x 80 mg Pd ≈ 24 t Pd x ≈ 500 g Cu ≈ 150,000 t Cu 	<ul style="list-style-type: none"> Ag: 3% Au: 4% Pd: 16% Cu: <1%
1300 Mio Akkus*	≈ 140 Mio Laptop Akkus*	
<ul style="list-style-type: none"> x 3.8 g Co ≈ 4900 t Co 	<ul style="list-style-type: none"> x 65 g Co ≈ 9100 t Co 	<ul style="list-style-type: none"> Co: 23%
* Li-Ionen Typ	* Li-Ionen Typ (heute Standard)	

Abb. 3: Aufkommen seltener Metalle in elektronischen Geräten (Umicore, 2010)

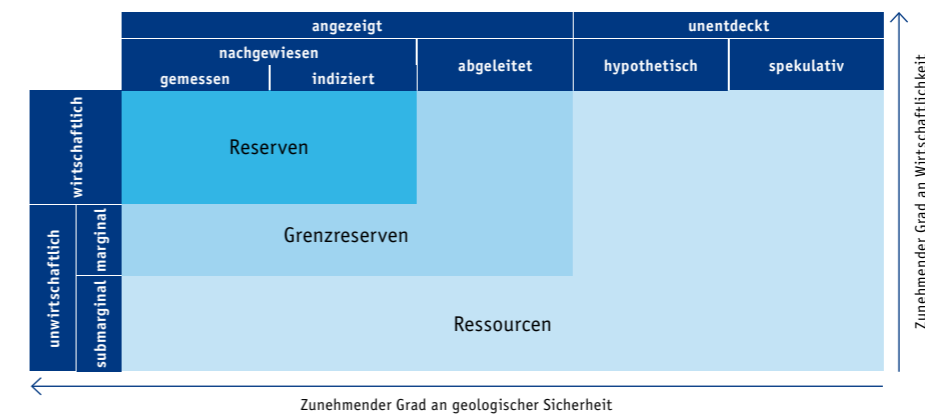


Abb. 4: Definition von Reserve, Reservebasis und Ressourcen nach McKelvey (modifiziert nach USGS, 2009)

Begriff von Knappheit. Aus dieser Perspektive ist Knappheit ein Missverhältnis zwischen Nachfrage und Angebot und stellt in der Regel ein kurzfristigeres Phänomen dar. Ressourcenoptimisten verweisen dabei auf die regulierende Funktion des Marktes über den Preis, auf den technologischen Fortschritt bei der Gewinnung von seltenen Metallen aus mineralischen Lagerstätten oder Abfällen sowie auf die Substitution von knappen durch andere, häufiger vorkommende Metalle (Tilton, 2003).

Sowohl die eher pessimistische Einschätzung der Verfügbarkeit von seltenen Metallen als auch ein zu optimistisches Vertrauen auf die regulierenden Kräfte des Marktes greifen jedoch vermutlich zu kurz: Eine langfristige Versorgung mit seltenen Metallen setzt vielmehr voraus, dass verschiedene potentiell kritische Faktoren berücksichtigt werden.

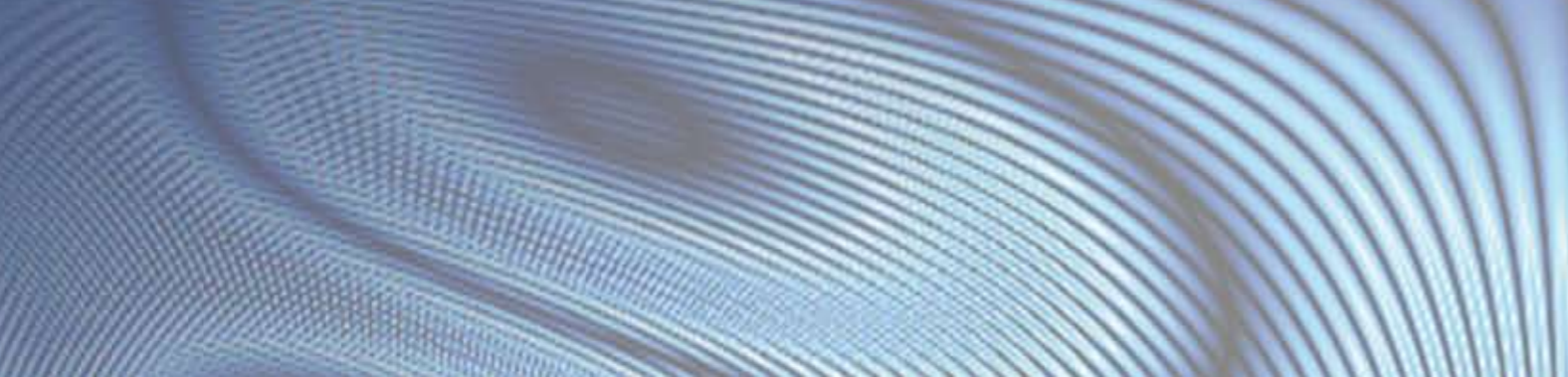
Kritische Faktoren

Geologische, geopolitische, technologische, ökonomische, soziale oder ökologische Faktoren können für sich alleine oder in Kombination zu kritischen Versorgungssituationen betreffend seltener Metalle führen (National Research Council, 2008). Seltene Metalle, bei denen dies kurz-, mittel- oder langfristig eintreten könnte, werden im Folgenden kritisch genannt.

Geologische Faktoren

Ein wichtiger geologischer Faktor, der zu einer Verknappung von seltenen Metallen führen könnte, ist die Qualität und insbesondere der Metallgehalt der noch vorhandenen mineralischen Lagerstätten. Seit einigen Jahren ist dabei ein Trend hin zu abnehmenden Metallgehalten zu verzeichnen (MacLean et al., 2010).

In diesem Zusammenhang wird häufig auf das bimodale Verteilungsmodell seltener Metalle verwiesen (Abb. 5), das in den 1970er Jahren von Brian Skinner entwickelt



Nicht nur bei der Primärproduktion wird die Verfügbarkeit seltener Metalle durch die Kopplung an andere Metalle beeinflusst, sondern auch bei der Sekundärproduktion, d.h. der Rückgewinnung dieser Elemente durch Recyclingverfahren. Im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie beispielsweise wurden in den letzten Jahrzehnten ständig neue Produkte mit einer immer grösser werdenden Vielfalt an seltenen Metallen erzeugt (Johnson et al., 2007). Beim Recycling dieser Produkte und der darin enthaltenen Metallkombinationen haben dabei bisher vor allem Edelmetalle wie Gold oder Palladium sowie Kupfer wegen ihres beträchtlichen ökonomischen Werts die Hauptrolle gespielt. Werden moderne metallurgische Verfahren angewendet, lassen sich zusätzlich zu diesen Elementen auch assoziierte Elemente wie Indium, Selen oder Zinn zurückgewinnen. Damit können Metalle, welche in der Primärproduktion die Rolle von Hauptmetallen spielen, bei der Sekundärproduktion zu Nebenprodukten werden und umgekehrt.

Ökologische Faktoren

Die Primärproduktion von seltenen Metallen ist in der Regel mit schwerwiegenden Eingriffen in die Umwelt verbunden. So werden beim Rohstoffabbau natürliche Landschaften teilweise massiv beeinträchtigt, grosse Mengen an Wasser, Energie und anderen Rohstoffen verbraucht und zuvor in Gesteinen gebundene Schadstoffe freigesetzt. Dies wird dadurch verstärkt, dass sich die Ressourcen häufig in Ländern befinden, wo Umweltstandards vergleichsweise wenig Gewicht beigemessen wird (MacLean et al., 2010).

Die Umweltbelastung durch die Gewinnung seltener Metalle ist teilweise deutlich höher als bei den klassischen Industriemetallen. Dies zumindest zeigen einfache, beispielhafte Berechnungen mit Hilfe der Methode der Ökobilanz (Abb. 8), oder des «ökologischen Rucksacks» (Schmidt-Bleek, 1993).

Eine erhöhte Nachfrage nach seltenen Metallen kann dazu führen, dass auf Ressourcen zurückgegriffen werden muss, welche schwerer zugänglich sind und einen geringeren Metallgehalt aufweisen. Dies hätte zur Folge, dass der Abbau auf geologisch und ökologisch empfindlichere Gebiete (Kontinentalabhänge, Tiefsee, Antarktis, Naturschutzgebiete) ausgedehnt wird und die Umweltauswirkungen infolge des grösseren Energie- und Wasserverbrauchs sowie der steigenden Abfallmengen im Bergbau weiter zunehmen.

Auch die Sekundärproduktion kann, wenn nicht entsprechende Umweltstandards eingehalten werden, beträcht-

liche Umweltauswirkungen verursachen. So führt beispielsweise das informelle Recycling von Elektro- und Elektronikaltgeräten in Ländern wie Indien oder China zu unkontrollierten Schadstoffemissionen, welche die Luft- und Wasserqualität der entsprechenden Regionen massiv beeinträchtigen (Sepúlveda et al., 2010).

Schliesslich gilt es zu bedenken, dass seltene Metalle in Produkten häufig in so geringen Konzentrationen vorliegen, dass eine Rückgewinnung sowohl aus ökonomischer wie auch aus technologischer Sicht gar nicht möglich ist. Damit gehen wertvolle Ressourcen unwiederbringlich verloren.

Illustrierende Beispiele

In den folgenden Abschnitten werden anhand von fünf Beispielen die Angebots- und Nachfragesituation sowie die bestehenden Herausforderungen und Probleme bei verschiedenen seltenen Metallen exemplarisch dargestellt:

- Lithium ist ein wichtiges Element für den Bau von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (Batterien); eine ausreichende Versorgung mit diesem Element wird als eine wesentliche Voraussetzung für die Verbreitung dieser Technologie angesehen.
- Die als Seltene Erden bezeichneten Elemente sind wichtig für zahlreiche Zukunftstechnologien (zum Beispiel Permanentmagnete in Elektromotoren). Politisch motivierte Beschränkungen auf der Angebotsseite sind bereits ein Thema geworden.
- Am Beispiel Indium lassen sich die Wechselwirkungen zwischen rapide steigender Nachfrage infolge Verbreitung von Zukunftstechnologien (in diesem Falle Informations- und Kommunikationstechnologien) und existierenden Versorgungsstrukturen gut illustrieren.
- Die Platingruppenmetalle sind in den letzten Jahrzehnten verbreitet zur Anwendung gekommen (zum Beispiel in Autokatalysatoren). An ihnen lassen sich zahlreiche typische Zusammenhänge zwischen Angebots- und Nachfragestrukturen aufzeigen.
- Tantal ist eine Ressource, die für bestimmte Anwendungen der Mikroelektronik (zum Beispiel Kondensatoren für Mobiltelefone) wesentlich ist. Die Nachfrage nach Tantal wird für soziale Konflikte in Afrika mitverantwortlich gemacht.

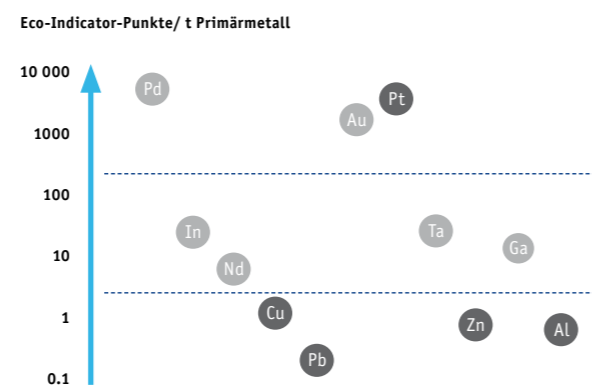


Abb. 8: Spezifische Umweltbelastungen durch die Primärproduktion von Aluminium (Al), Blei (Pb), Gallium (Ga), Gold (Au), Indium (In), Neodym (Nd), Kupfer (Cu), Palladium (Pd), Platin (Pt), Tantal (Ta) und Zink (Zn) (ecoinvent Centre, 2009). Eco-Indicator-Punkte sind ein Mass für die kumulierte Umweltbelastung.

Beispiel Lithium

Die Bezeichnung Lithium wurde vom griechischen Wort líthos (Stein) abgeleitet. Lithium ist ein chemisches Element der 1. Hauptgruppe (Alkalimetalle) des Periodensystems. Es hat die kleinste Dichte der unter Standardbedingungen festen Elemente und ist das leichteste Metall. In der Erdkruste kommt es in einer durchschnittlichen Konzentration von 60 ppm (parts per million) vor – dies entspricht 60 Gramm pro Tonne Festgestein.

Angebot

Lagerstätten

Lithium ist Bestandteil von rund 150 Mineralien. Von diesen sind aus technischer Sicht Amblygonit, Lepidolith, Petalit und Spodumen am bedeutendsten. Lithiumsalze, insbesondere Lithiumchlorid, kommen verbreitet auch in Salzlaken vor, zum Beispiel in ausgetrockneten Salzseen in Südamerika, den USA oder in China, aber auch in Ölfeldwasser oder geothermischen Quellen.

Für das Jahr 2009 wurden die weltweiten Lithiumreserven vom USGS auf rund 9.9 Mio. Tonnen geschätzt. Der grösste Teil davon befindet sich in Chile (76 Prozent), gefolgt von Argentinien (8 Prozent), Australien (6 Prozent), China (5 Prozent), Brasilien und Kanada (je 2 Prozent) und anderen (1 Prozent) (Abb. 9). Neben Chile (7.5 Millionen Tonnen) verfügt vor allem Bolivien (9 Millionen Tonnen) über nennenswerte Lithiumressourcen (USGS, 2010).

Primärproduktion

Lithium wird sowohl aus Salzlake als auch aus Mineralien, vor allem Spodumen, einem Lithiumaluminiumsilikat, gewonnen. Salzlaken mit hohen Lithiumgehalten, aus denen Lithiumsalz durch Sonneneinstrahlung in Evaporationsbecken ausgefällt wird, sind heute die wichtigsten industriellen Lithiumquellen. Im Jahr 2009 wurden weltweit rund 18 000 Tonnen Lithium gewonnen. Davon stammte der grösste Teil aus Chile (41 Prozent), gefolgt von Australien (25 Prozent), China (13 Prozent) und Argentinien (12 Prozent) (Abb. 10). Dank der hohen Lithiumkonzentration, der hohen Evaporati-

onsrate und dem geringen Anteil an Salzen, die den Ausfällungsprozess stören, ist die Lithium-Gewinnung im chilenischen Salar de Atacama besonders günstig.

Sekundärproduktion

Das Recycling von Lithium wird heute noch kaum praktiziert, was u.a. auf den vergleichsweise niedrigen Marktpreis für Lithium und die geringen Lithiumkonzentrationen in Produkten zurückgeführt wird. Obwohl sich derzeit verschiedene Recyclingverfahren in Entwicklung befinden, ist das künftige Recyclingpotential für Lithium unklar. Einerseits wird erwartet, dass insbesondere das Angebot an gebrauchten Lithiumbatterien stark zunehmen wird und die Sammelquote von Produkten auf Lithiumbasis durch die Einführung von Verordnungen wie zum Beispiel die EU Batterie-Direktive (Europäische Gemeinschaft, 2006) ansteigt; andererseits wird die

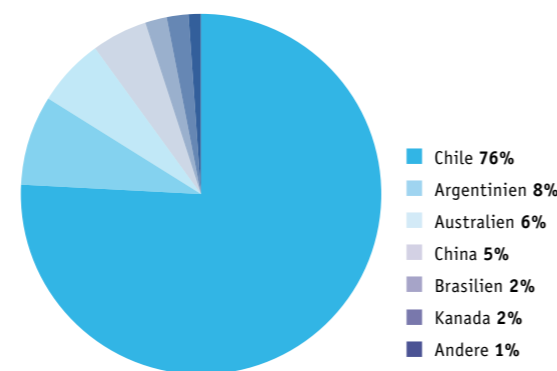


Abb. 9: Verteilung der weltweiten Lithiumreserven im Jahr 2009 (USGS, 2010)

Entwicklung des Lithiumrecyclings u.a. davon abhängen, ob der Marktpreis von Lithium ein Recycling überhaupt attraktiv macht.

Nachfrage

Lithium wird unter anderem für die Herstellung von Keramik und Glas, Batterien und Schmierfetten verwendet (Abb. 11). Von der Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) wurde die globale Nachfrage nach Lithium im Jahr 2007 auf 17 500 Tonnen geschätzt, mit einer jährlichen Zuwachsrate von 7,5 Prozent in den vorangegangenen 10 Jahren (Jaskula, 2008). Wegen der erhöhten Nachfrage nach wiederaufladbaren Batterien in tragbaren elektronischen Geräten hat vor allem der Lithiumverbrauch in der Batterienproduktion stark zugenommen. Es wird davon ausgegangen, dass die globale Nachfrage nach Lithium durch anhaltend stark wachsende Märkte für wiederaufladbare Batterien, u.a. für die Elektromobilität, weiter ansteigen wird. Die Substitutionsmöglichkeiten für diesen Anwendungsbereich sind insofern begrenzt, als wiederaufladbare Batterien, die auf Lithium beruhen, einzigartige Eigenschaften wie hohe Energiedichte bei langer Lebensdauer besitzen.

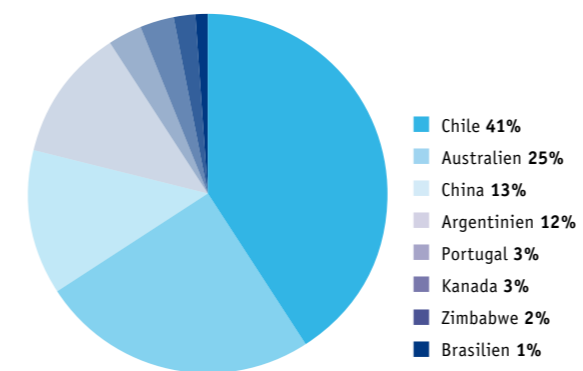


Abb. 10: Verteilung der Weltjahresproduktion von Lithium im Jahr 2009 (USGS, 2010)

Probleme und Herausforderungen

Die erwartete starke Zunahme der Nachfrage nach wiederaufladbaren Lithiumbatterien wird voraussichtlich eine deutliche Erhöhung der Primärproduktion von Lithium erforderlich machen. Dies wird eine Ausweitung der Förderaktivitäten auf weitere, bisher unberührte Landschaften (zum Beispiel den bolivianischen Salar de Uyuni oder den tibetischen Zabuye-Salzsee) nach sich ziehen – mit entsprechenden Folgen für die Ökosysteme. Aufgrund der in diesen Regionen weniger idealen Voraussetzungen für eine Lithiumgewinnung ist davon auszugehen, dass der Aufwand für die Lithiumproduktion wie auch die damit zusammenhängenden Umweltauswirkungen zunehmen werden.

Eine Möglichkeit, dieser Entwicklung entgegenzuwirken und Abhängigkeiten von den produzierenden Ländern zu verringern, besteht in der Rücknahme von gebrauchten, lithiumhaltigen Produkten und der anschliessenden Rückgewinnung des Lithiums. Dafür müssen jedoch zuerst die entsprechenden Sammelstrukturen und Recyclingkapazitäten eingerichtet und geeignete Anreize geschaffen werden.

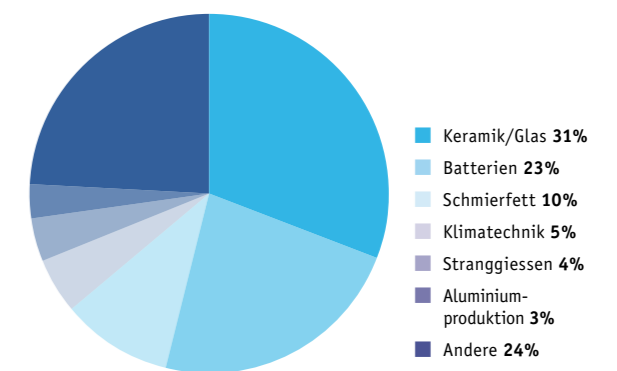


Abb. 11: Verwendung von Lithium in den USA im Jahr 2009 (USGS, 2010)

Beispiel Seltene Erden

Unter dem Begriff «Seltene Erden» wird eine Gruppe von 17 Elementen zusammengefasst, welche aus den 15 Lanthaniden (Ordnungszahl 57 bis 71) sowie Scandium und Yttrium besteht (Abb. 2). Wegen ihrer ähnlichen chemisch-physikalischen Eigenschaften sowie ihres gemeinsamen Vorkommens werden sie in der Regel nicht einzeln, sondern als Gruppe behandelt. Seltene Erden kommen in vergleichsweise hohen durchschnittlichen Konzentrationen in der Erdkruste vor – die Gehalte der zwei seltensten Seltenen Erden, Thulium und Lutetium, sind beispielsweise rund 200 Mal höher als derjenige von Gold. Aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften gibt es jedoch nur vergleichsweise wenige Lagerstätten, in denen Seltene Erden angereichert vorliegen. Dies gilt besonders für die schwereren Seltenen Erden.

Angebot

Lagerstätten

Die weltweiten Reserven an Oxiden von Seltenen Erden wurden vom USGS für das Jahr 2009 auf rund 99 Millionen Tonnen geschätzt, wovon sich der grösste Teil in China (38 Prozent) befindet, gefolgt von der Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS) (19 Prozent) und den USA (13 Prozent) (Abb. 12; USGS, 2010). Im Jahr 2008 belief sich die weltweite Reservebasis auf ca. 150 Millionen Tonnen (USGS, 2009); für das Jahr 2009 wurden keine diesbezüglichen Zahlen mehr ausgewiesen. Seltene Erden kommen vorwiegend in den Mineralien Bastnäsit sowie Monazit vor. Bei der Gewinnung von seltenen Erden aus Monazit besteht die Gefahr der Freisetzung von radioaktivem Thorium und Radium (Angerer et al., 2009).

Primärproduktion

Im Jahr 2009 wurden rund 124 000 Tonnen Seltene Erden gewonnen, davon über 95 Prozent in China (USGS, 2010). China ist auch führend in der Weiterverarbeitung von Seltenen Erden (Buchert et al., 2009).

Sekundärproduktion

Im industriellen Bereich werden in den USA derzeit vor allem Rückstände aus der Herstellung von Permanentmagneten recycelt. Aktivitäten im Bereich der Konsumgüter sind nicht bekannt. In Zukunft wird ein wei-

tergehendes Recycling am ehesten im Bereich der Produktionsrückstände möglich sein. Allerdings können derzeit wegen der Vielfalt von Anwendungen hierzu keine verlässlichen Aussagen gemacht werden. Das Recyclingpotential bei den Konsumgütern wird als vergleichsweise klein eingestuft, weil Seltene Erden häufig nur in geringen Konzentrationen zum Einsatz kommen, oft in Legierungen eingesetzt und bei Schmelzverfahren vorwiegend als Oxide in die Schlacke überführt werden (Buchert et al., 2009).

Nachfrage

Die insgesamt 17 Seltenen Erden werden in vielfältigen Endanwendungen eingesetzt. In den USA dominierte im Jahr 2008 deren Einsatz in der Metallurgie (29 Prozent), in der Elektronik (18 Prozent), in chemischen Katalysatoren (14 Prozent), als Leuchtstoffe u.a. für Computermonitore, Lampen und Fernsehgeräte (12 Prozent) sowie in Autokatalysatoren (9 Prozent) (USGS, 2010) (Abb. 13).

Die globale Nachfrage nach Seltenen Erden wurde für das Jahr 2008 auf 132 500 Tonnen geschätzt. 1953 betrug die Nachfrage noch 1000 Tonnen. Es wird davon ausgegangen, dass sich das in den vergangenen Jahren beobachtete jährliche Nachfragewachstum um mehr als 4 Prozent auch in Zukunft fortsetzen wird, weil Seltene Erden in vielen Zukunftstechnologien und damit in Wachstumsmärkten ein-

gesetzt werden (Buchert et al., 2009). Konkret kommen Seltene Erden beispielsweise in folgenden Anwendungen zum Einsatz (National Research Council, 2008):

- Europium (Eu) dient in Form von Europiumoxid (Eu_2O_3) als roter Leuchtstoff in Farbkathodenstrahlröhren und Flüssigkristallbildschirmen. Trotz des hohen Europiumpreises gibt es zurzeit keinen Ersatzstoff.
- Mit Erbium (Er) dotierte Abschnitte von Glasfasern dienen als Laserverstärker in Glasfaserkabeln der Telekommunikation. Auch in diesem Fall gibt es trotz des hohen Preises für Erbium zurzeit keinen Ersatzstoff.
- Cer (Ce) wird als Ceroxid (CeO_2), das eine einzigartige Kombination von physikalischen und chemischen Eigenschaften in wässrigen Lösungen aufweist, zum Polieren praktisch aller Gläser und Linsen verwendet. Cer und andere Seltenen Erden werden auch als Promotoren in Autoabgaskatalysatoren eingesetzt.
- Neodym (Nd), Samarium (Sa), Gadolinium (Gd), Dysprosium (Dy) und Praseodym (Pr) schliesslich werden, einzeln oder gemischt, in Legierung mit anderen Metallen verwendet, um hoch leistungsfähige Permanentmagnete etwa für miniaturisierte elektrische und elektronische Geräte (mit Anwendungen u.a. im Audio-, Video- und Automobilbereich) oder Windturbinen herzustellen.

Für viele Anwendungen der Seltenen Erden gibt es zwar Substitutionsmöglichkeiten; diese sind jedoch in der Regel weniger effektiv oder es handelt sich, wie etwa in der Beleuchtungstechnologie, selbst wieder um Seltene Erden (Roskill Information Services, 2007; Säuberlich, 2008).

Probleme und Herausforderungen

Abbauwürdige Seltene Erden kommen zwar vor allem in China, der GUS, den USA und Australien in vergleichsweise grossen Mengen vor, allerdings konzentrieren sich Abbau und Aufbereitung heute vorwiegend auf China (Liedtke&Elsner, 2009). Eine Verringerung der Abhängigkeit von China, welches begonnen hat, den Export an Seltenen Erden einzuschränken, würde den Abbau von Lagerstätten ausserhalb dieses Lan-

des sowie ein verstärktes Recycling erfordern. Voraussetzung hierfür wäre u.a. die Entwicklung von ökoeffizienten Abtrenn-, Schmelz- und Recyclingverfahren, welche den spezifischen chemischen Charakteristika und dem ökonomischen Wert der einzelnen Seltenen Erden Rechnung trägt. Zu beachten gilt es dabei insbesondere auch, dass die Gewinnung von Seltenen Erden aus bestimmten Mineralien durch Freisetzung radioaktiver Elemente zu massiven Umweltbeeinträchtigungen führen kann.

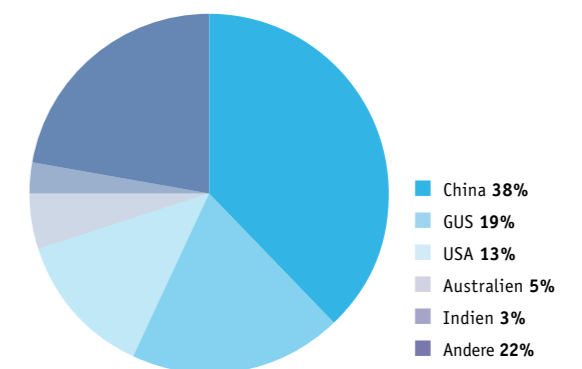


Abb. 12: Verteilung der weltweiten Reserven Seltener Erden im Jahr 2009 (USGS, 2010)

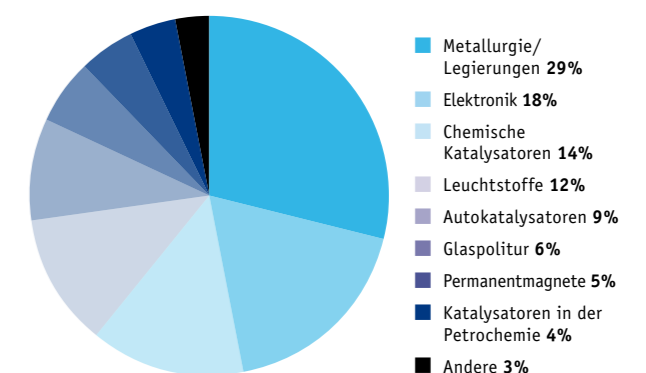


Abb. 13: Verwendung von Seltenen Erden in den USA im Jahr 2008 (USGS, 2010)

Beispiel Indium

Indium ist ein Element der 13. Hauptgruppe des Periodensystems. In der Erdkruste kommt es mit durchschnittlich 240 ppb (parts per billion) vor – dies entspricht umgerechnet 24 Gramm pro 100 Tonnen Festgestein. Indium hat einen niedrigen Schmelzpunkt und ist bei normalen Temperaturen weitgehend resistent gegenüber Oxidation. Als Legierungsbestandteil steigert Indium bereits in geringer Konzentration die Härte und die Korrosionsbeständigkeit der jeweiligen Materialien.

Angebot

Lagerstätten

Indium kommt in der Natur nicht elementar vor, sondern meist als Bestandteil sulfidischer Metallerze. Diese verfügen teilweise über einen überdurchschnittlich hohen Indiumanteil, der bis zu einem Gewichtsprozent betragen kann. Trotz der relativ hohen Konzentration in sulfidischen Erzen ist dieser Anteil für den alleinigen Abbau von Indium nach wie vor zu gering und daher ökonomisch uninteressant. Indium wird deshalb aktuell nur als Nebenprodukt bei der Produktion von Hauptmetallen, insbesondere Zink, Kupfer und Blei, aus den entsprechenden Erzen Zinksulfid (Zinkblende), Kupfersulfid (Kupferkies) und Bleisulfid (Bleiglanz), sowie aus verschiedenen Zinnverbindungen gewonnen. Vor allem Zinkblende weist hohe Indiumkonzentrationen auf, die allerdings regional sehr unterschiedlich sind.

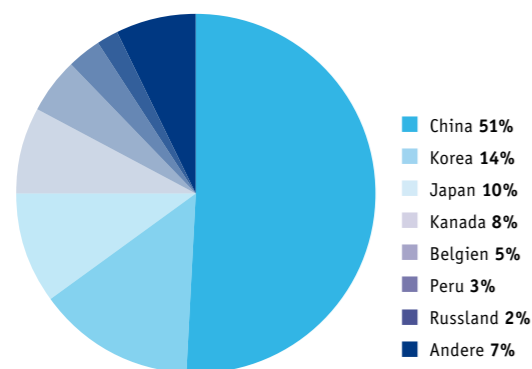


Abb. 14: Verteilung der Weltjahresproduktion von Indium im Jahr 2009 (USGS, 2010)

Für das Jahr 2007 wurden die weltweiten Indiumreserven vom USGS auf insgesamt rund 11 000 Tonnen geschätzt; die weltweite Reservebasis wurde auf ca. 16 000 Tonnen beziffert. Im Gegensatz zu anderen Metallen wie den Seltenen Erden oder Lithium sind die Lagerstätten weltweit zwar relativ weit gestreut. Dennoch lässt sich gemäss Angaben aus dem Jahr 2008 auch für indiumhaltige Erze eine Konzentration auf das ressourcenreiche Förderland China feststellen, welches rund 62 Prozent der weltweit identifizierten Indiumreserven beherbergt (USGS, 2008). Weitere bedeutende Vorkommen sind in Peru, Kanada, den USA, Russland und Japan zu finden. Darüber hinaus gibt es auch vereinzelt Vorkommen in Australien und Europa.

Aufgrund der unzureichenden Datengrundlage werden seit dem Jahr 2008 vom USGS keine Angaben mehr zu Reserven und Reservebasis gemacht.

Primärproduktion

Die Primärproduktion von Indium hat sich in den vergangenen Jahren rasant entwickelt. In den 1970er und 1980er Jahren belief sich die jährliche weltweite Produktion noch relativ konstant auf etwa 50 Tonnen. Danach stieg sie kontinuierlich an und verdoppelte sich zwischen 1986 und 1988 auf etwa 100 Tonnen. 1995 und 2000 folgten weitere Produktionszunahmen auf 239 bzw. 335 Tonnen. Im Jahr 2007 wurde mit einer jährlichen Primärproduktion von 553 Tonnen erstmals die 500-Tonnen-Grenze überschritten (Jorgenson & George, 2005; USGS 2009).

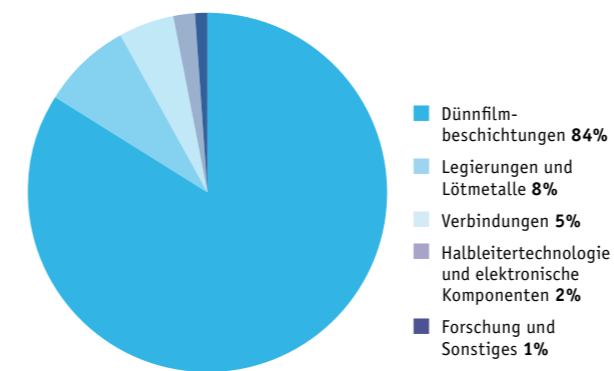


Abb. 15: Verwendung von Indium in den USA im Jahr 2007 (USGS, 2008)

Gemäss USGS (2010) ist derzeit China mit rund 300 Tonnen bzw. 51 Prozent des Weltmarktes der weltgrößte Anbieter von primär raffiniertem Indium, gefolgt von Südkorea (85 Tonnen bzw. 14 Prozent) Japan (60 Tonnen bzw. 10 Prozent), Kanada (50 Tonnen bzw. 8 Prozent), Belgien (30 Tonnen bzw. 5 Prozent), Peru (20 Tonnen bzw. 3 Prozent), Russland (12 Tonnen bzw. 2 Prozent) und weiteren Ländern wie die USA, Deutschland, die Niederlande oder Grossbritannien (Abb. 14). Vor allem die Raffinationsstandorte in Belgien, aber auch in Deutschland, den Niederlanden und Grossbritannien sind für die Produktion von hochreinem Indium auf Erzimporte aus dem Ausland angewiesen.

Sekundärproduktion

Die Sekundärproduktion von Indium erfolgt heute in erster Linie durch die Aufbereitung von Produktionsrückständen aus der Indiumzinnoxid (engl. Indium Tin Oxide, ITO)-Dünnschichtbeschichtung (sogenannte Targets), vornehmlich in China, Japan und Südkorea. Aus den dabei entstehenden Produktionsrückständen können durch gängige Aufbereitungsverfahren schätzungsweise 60 bis 65 Prozent des enthaltenen Indiums zurückgewonnen werden.

Die weltweiten Kapazitäten zur Sekundärproduktion von Indium aus Produktionsrückständen belaufen sich Schätzungen zufolge auf rund 400 Tonnen pro Jahr. Angesichts der Preisentwicklung auf dem Weltmarkt wurden die Aufbereitungskapazitäten vor allem in Japan und Südkorea ausgebaut: In Japan beispielsweise soll sie sich mittlerweile auf über 150 Tonnen belaufen, mehr als die doppelte Menge der japanischen Primärproduktion von 60 Tonnen. Eine Steigerung der Produktionskapazitäten von Sekundärindium um weitere 245 Tonnen pro Jahr ist geplant (China: 120 Tonnen; Japan: 100 Tonnen; Südkorea: 25 Tonnen) (Phipps et al. 2007; Stevens, 2007).

Mit Ausnahme von Mobiltelefonen findet ein Recycling von Indium aus ausgedienten Konsumprodukten derzeit kaum statt. Das genaue Ausmass der weltweiten Sekundärproduktion aus der Aufbereitung indiumhaltiger Konsumprodukte lässt sich nur schwer abschätzen, da bislang keine verlässlichen Statistiken existieren.

Nachfrage

Trotz der zunehmenden Bedeutung von Indium für viele Industrieenanwendungen sind keine verlässlichen Zahlen hinsichtlich der weltweiten Nachfrage bzw. des Indiumverbrauchs vorhanden. Nach Angaben des USGS belief sich der Wert des im Jahr 2008 in den USA verwendeten Primärindiums auf etwa 89 Millionen US-Dollar (2007: 75 Millionen US-Dollar). Dies entspricht bei den für 2008 gängigen Indiumpreisen rund 130 Tonnen (2007: 125 Tonnen). Für den aktuellen weltweiten Verbrauch wird angenommen, dass dieser die Primärproduktion mittlerweile übersteigt, womit ein Zurückgreifen auf Produktionsausschüsse, welche in den vergangenen Jahren wegen fehlender Recyclingkapazitäten zwischengelagert wurden, notwendig wird (USGS, 2009).

Gemäss USGS (2008) macht die Herstellung von Dünnschichtbeschichtungen in Form von ITO mit 84 Prozent weltweit den derzeit grössten Anteil am Indiumverbrauch aus (Abb. 15). ITO-Beschichtungen werden vor allem für Flachbildschirme jeglicher Grösse verwendet. Andere Anwendungsbereiche wie Legierungen und Lötmetalle (8 Prozent), weitere metallische Verbindungen (5 Prozent), Halbleitertechnologien und elektronische Komponenten (2 Prozent) sowie Anwendungen in der Forschung und sonstiges (1 Prozent) nehmen dagegen nur eine untergeordnete Rolle ein.

Von einer weiteren Nachfragesteigerung ist insbesondere aufgrund der globalen Marktentwicklung von Elektronikartikeln mit ITO-Beschichtungen auszugehen. Besonders hervorzuheben ist auch die Photovoltaikindustrie: Diese verbraucht derzeit zwar einen geringen Anteil des verfügbaren Indiums und ist statistisch noch der Halbleiteranwendung zugeordnet; in Zukunft ist jedoch mit einer hohen Wachstumsrate zu rechnen (Abb. 7). Dies betrifft vor allem Dünnschichtbeschichtungen in Form von Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS). Angaben der Indium Corporation zufolge könnte sich die Nachfrage nach Indium für CIGS-Anwendungen in der Photovoltaikindustrie von derzeit 30 bis 35 t pro Jahr auf bis zu 300 t im Jahr 2013 steigern. Insbesondere die Investitionen in die CIGS-Solarzellenproduktion in Europa, Japan und den USA lassen zumindest für die nächsten Jahre eine weltweit erhöhte Nachfrage nach Indium erwarten (Watanabe, 2008).

Die relativ geringe Verfügbarkeit und die aktuellen Preisschwankungen haben zu einer intensiven Suche nach Substitutionsmöglichkeiten für Indium geführt. Bei der Herstellung von Transistoren wird Indium mittlerweile fast ganz durch Silicium ersetzt. Nukleare Kontrollstäbe werden vermehrt mit höheren Anteilen an Hafnium anstatt Indium hergestellt. In Legierungen mit einem hohen Anteil an Indium kommt vermehrt Gallium zum Einsatz, ebenso in Photovoltaikzellen und Halblei-

teranwendungen. Gallium und Hafnium sind allerdings auch als potenziell kritisch einzustufen (USGS, 2009).

Für den quantitativ bedeutendsten Anwendungsbereich der ITO-Beschichtungen sind derzeit kaum nennenswerte Substitutionsmöglichkeiten in Sicht, da angedachte Alternativen wie z.B. Silber-Zinn-Oxid oder Zink-Zinn-Oxid mit einem Leistungsverlust und einer geringeren Produktqualität verbunden sind. Kürzlich wurde jedoch ein Verfahren zum Aufdruck von Antimon-Zinn-Oxid (ATO) entwickelt, das bereits erfolgreich im Bereich der LCD-Technologie getestet werden konnte (USGS, 2009).

Probleme und Herausforderungen

Eine Vorhersage der künftigen Nachfrage nach Indium ist schwierig; insgesamt werden für die nächsten Jahre jedoch hohe Steigerungsraten erwartet.

Es ist davon auszugehen, dass die von Zukunftstechnologien dominierte Verwendung von Indium und die derzeit noch eingeschränkte Recyclierbarkeit weiterhin grosse Nachfrageimpulse auf die Primärrohstoffgewinnung ausüben werden. Bezüglich der vorhandenen Reserven bestehen dabei zurzeit erhebliche Unsicherheiten: So wurden für die Jahre 2008 und 2009 vom USGS weder Reserven noch Reservebasis ausgewiesen, weil die Daten für konsistente Angaben nicht ausreichen (USGS, 2008 und 2009).

Zur Deckung des Bedarfs sollte zusätzlich zur bereits stattfindenden Sekundärproduktion von Indium aus Produktionsabfällen langfristig auch eine umfassende Indiumrückgewinnung aus Konsumgütern angestrebt werden, insbesondere aus Elektronikgeräten und Photovoltaikanlagen. Hierbei besteht vor allem die Herausforderung, die jeweils in geringen Konzentrationen enthaltenen Indiumanteile kosteneffizient und umweltschonend zurückzugewinnen.

Beispiel Platingruppenmetalle

Als Platingruppenmetalle (PGM) werden die Elemente Platin (Pt), Palladium (Pd), Rhodium (Rh), Ruthenium (Ru), Iridium (Ir) und Osmium (Os) bezeichnet. Zusammen mit Gold und Silber zählen sie alle zur Gruppe der Edelmetalle. Eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit, hohe Schmelzpunkte und ausgeprägte katalytische Eigenschaften machen die PGM – mit Ausnahme von Osmium – zu unverzichtbaren Werkstoffen für viele High-Tech-Produkte.

Angebot

Lagerstätten

PGM treten in natürlichen Lagerstätten grundsätzlich gemeinsam auf, wobei die Platin- und Palladium-Gehalte im Erz um den Faktor 5 bis 10 über denjenigen von Rhodium und Ruthenium und um den Faktor 50 über denjenigen von Iridium und Osmium liegen. Die weltweiten PGM-Reserven wurden vom USGS für das Jahr 2009 auf 71 000 Tonnen geschätzt, wovon sich 89 Prozent im südafrikanischen Bushveld-Komplex und 9 Prozent in Russland befinden. Die restlichen 2 Prozent entfallen auf Nordamerika, Zimbabwe, Kolumbien, Finnland und China (USGS, 2010). Die Reservebasis betrug gemäss USGS im Jahr 2008 rund 80 000 Tonnen; für das Jahr 2010 liegen keine diesbezüglichen Angaben mehr vor. (USGS, 2009).

Zusammen mit den PGM kommen in den Erzen auch Gold, Nickel, Kupfer und Chrom vor. Die Lagerstätten in Südafrika, Zimbabwe und den USA werden vor allem wegen den PGM abgebaut. Nickel und Kupfer werden dort als Nebenprodukte gewonnen. In Russland und Kanada hingegen sind die PGM Nebenprodukte der Nickelgewinnung. Generell sind die Lagerstättengehalte an PGM und Gold mit weniger als 10 Gramm pro Tonne Gestein sehr gering. Zudem ist die Gewinnung der Erze aus grossen Tiefen (Südafrika) bzw. im Permafrost (Russland) aufwendig, energieintensiv und mit einem erheblichen Flächenbedarf verbunden.

Primärproduktion

Im Jahr 2008 wurden rund 440 Tonnen PGM gewonnen (2007: 500 Tonnen), davon 186 Tonnen Platin (205 Ton-

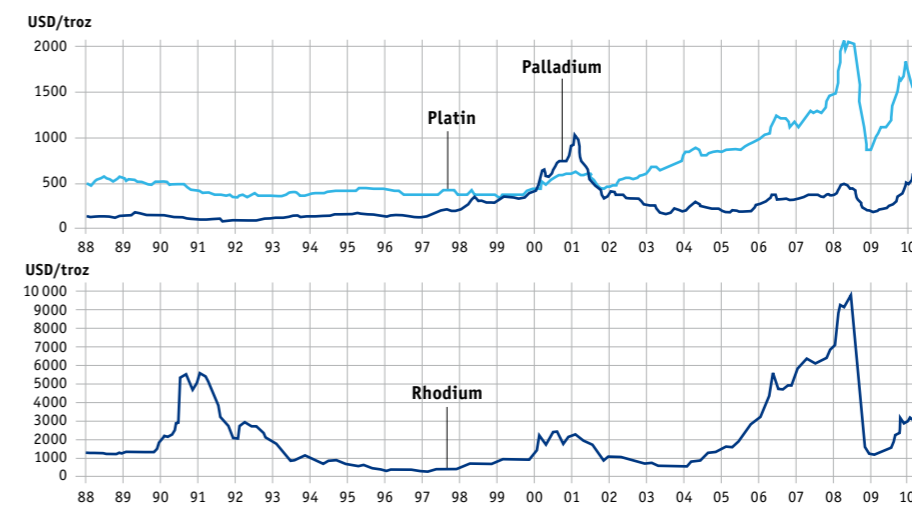


Abb. 16: Preisentwicklung (Monatsdurchschnitte) von Platin, Palladium und Rhodium zwischen Januar 1988 und Juli 2010 (Umicore, 2010).

nen), 197 Tonnen Palladium (222 Tonnen), 22 Tonnen Rhodium (26 Tonnen) und ca. 30 Tonnen Ruthenium und 3,5 Tonnen Iridium. 60 Prozent der Produktion stammten aus Südafrika (75 Prozent bei Platin, über 80 Prozent bei Rhodium, Ruthenium, Iridium), knapp 30 Prozent aus Russland (43 Prozent bei Palladium) und 9 Prozent aus Nordamerika. Der starke Produktionsrückgang im Jahr 2008 ist vor allem auf vorübergehende Probleme in der südafrikanischen Stromversorgung zurückzuführen. Dies wiederum führte dazu, dass in der ersten Jahreshälfte 2008 die Preise für Platin und Rhodium auf ein Rekordniveau anstiegen (Abb. 16). Ende 2008 brachen die Nachfrage nach PGM und damit auch deren Preise wegen der Wirtschaftskrise ein. Inzwischen haben sowohl Nachfrage als auch Preise wieder stark angezogen.

Sekundärproduktion

Recycling leistet bereits heute – mit einem geschätzten Anteil von rund 50 Prozent an der Bruttonachfrage – einen wichtigen Beitrag zur Versorgung mit PGM. Bei der Sekundärproduktion ist zu unterscheiden zwischen industriellen Anwendungen und Konsumgütern. Bei industriellen Anwendungen wie Katalysatoren für die (Petro-) Chemie oder Anwendungen in der Glasindustrie sind sehr effektive Recyclingsysteme vorhanden. Bei Platin, Palladium und Rhodium

werden – auch bei langen Produktlebensdauern – über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg betrachtet Recyclingquoten von über 90 Prozent erzielt. Die meisten industriellen Anwender führen die PGM in einem geschlossenen Stoffkreislauf, d.h. sie werden am Produktlebensende von einem spezialisierten Edelmetallscheidebetrieb zurückgewonnen und stehen dann für neue Produkte zur Verfügung.

Sehr viel schwieriger gestaltet sich das Recycling von PGM aus Konsumgütern, vor allem Autokatalysatoren und Elektronik. Zwar ist bei den meisten PGM-haltigen Produkten durch den grossen ökonomischen Wert der PGM ein wirtschaftlicher Anreiz für das Recycling gegeben und auch die Recyclingtechnologie für PGM ist sehr hoch entwickelt: sogar aus komplexen Produkten können mit modernen metallurgischen Verfahren Ausbeuten von über 95 Prozent erzielt werden. Da die Produkteigentümer jedoch mehrfach wechseln, Altprodukte global gehandelt werden und die Informationen über die Qualität und die globalen Handelsströme mangelhaft sind, werden diese Produkte am Lebensende sehr oft nicht in adäquate Recyclingprozesse zurückgeführt («offene Stoffkreisläufe»). Weltweit gehen hierdurch rund 50 Prozent dieses PGM-Recyclingpotenzials verloren. Ähnlich grosse Verluste treten auch beim Recycling von Palladium aus Dentalanwendungen auf.

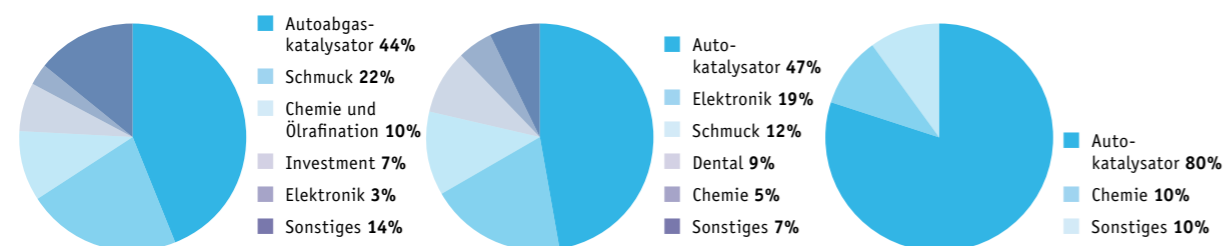


Abb. 17: Verwendung von Platin, Palladium und Rhodium, Nettobedarf (Umicore, 2010)

Nachfrage

Knapp 50 Prozent der Minenproduktion von Platin, Palladium und Rhodium finden Verwendung in Autoabgaskatalysatoren. Weitere wichtige Anwendungsgebiete sind Elektronik, Schmuck und Prozesskatalysatoren in der Chemie und Erdölraffination (Abb. 17). Ruthenium wird vor allem in der Elektronik (Computerfestplatten), Iridium in der (Elektro-) Chemie, in Zündkerzen und in verschiedenen Spezialanwendungen eingesetzt. Seit 1980 hat die weltweite Nachfrage durch das Aufkommen der Autoabgaskatalysatoren stark zugenommen. Bei Platin und Palladium ist eine Zunahme von 180 Prozent, bei Rhodium ein Anstieg um 250 Prozent zu verzeichnen. Auch für mögliche Zukunftstechnologien haben PGM eine grosse Bedeutung: Brennstoffzellenfahrzeuge zum Beispiel benötigen – bezogen auf den heutigen PGM-Gehalt der Autokatalysatoren – voraussichtlich die zwei- bis dreifache Mengen an Platin.

In der Katalyse können PGM teilweise gegeneinander substituiert werden, z.B. Platin durch Palladium in Autokatalysatoren. Ein Ersatz durch Nicht-Edelmetalle im industriellen Massstab ist bisher aber nicht gelungen. In der Elektronik lassen sich PGM teilweise durch andere Metalle substituieren (z.B. durch Nickel bei Vielschichtkondensatoren). Die besonderen Eigenschaften der PGM führen aber häufig zu einer geringeren Leistungsfähigkeit bei Verwendung von Substituten.

Probleme und Herausforderungen

Die absoluten Vorräte an PGM sind noch für viele Jahrzehnte ausreichend, eine Erschöpfung der Lagerstätten ist in absehbarer Zeit nicht zu erwarten. Es ist aber auch in den kommenden Jahren immer wieder mit temporären Verknappungen zu rechnen, die zu erheblichen Preisausschlägen führen können (Abb. 16). Hierfür gibt es verschiedene Ursachen, unter anderem:

- Aufgrund der Konzentration von Vorräten und Produktion auf wenige Länder (Südafrika, Russland) und Minengesellschaften, wirken sich politische oder

wirtschaftliche Entwicklungen (zum Beispiel Stromversorgungskrisen wie im Jahr 2008 in Südafrika), aber auch Naturereignisse in den Förderregionen, unmittelbar auf die Versorgung aus.

- Weil auf der Nachfrageseite wenige Anwendungen dominieren, wirken sich Veränderungen beispielsweise in der Automobilindustrie unmittelbar auf die Balance zwischen Angebot und Nachfrage aus.
- Die Erschliessung neuer Lagerstätten bzw. die Ausweitung der Förderkapazitäten ist sehr langwierig und risikoreich (Preisausschläge). Bei kurzfristigen Nachfragesprüngen kann die PGM-Produktion in der Regel nicht folgen.
- Das Angebot der «kleinen PGM» Rhodium, Ruthenium und Iridium ist direkt von der Förderung von Platin und Palladium abhängig. Im Falle Russlands und Kanadas ist die Förderung von Palladium und Platin zudem abhängig von der Nickelproduktion. Russland wird ohne entsprechende Nachfrage die Nickelproduktion nicht ausweiten, um mehr Palladium zu fördern. Ebenso wird Südafrika die Platinproduktion nicht erhöhen, nur um mehr Ruthenium oder Iridium zu fördern. Andernfalls würde die verstärkte Produktion der Nebenprodukte zu einem Preisverfall bei den Hauptmetallen führen, was für die Minengesellschaft kaum lukrativ ist.

Eine wichtige Rolle für die Versorgungssicherheit kommt damit dem verstärkten Recycling zu. Defizite bestehen vor allem bei den Konsumgütern: Ein Grossteil der alten Automobile, Computer und Mobiltelefone aus Europa wird derzeit in Entwicklungs- und Schwellenländer exportiert, weshalb heute ein wesentlicher Teil des Recyclingpotenzials nicht genutzt wird. Sofern in den Importländern diese Produkte überhaupt recycelt werden, geschieht dies meist unter sehr einfachen Bedingungen mit hohen Metallverlusten und zum Teil massiven Umweltauswirkungen.

Beispiel Tantal

Tantal ist ein Element der 5. Gruppe in der 6. Periode (Vanadiumgruppe) des Periodensystems. In der Erdkruste kommt Tantal mit einem Anteil von rund 2 ppm (parts per million) vor – dies entspricht 2 Gramm pro Tonne Festgestein. Damit ist Tantal etwa dreimal häufiger als Silber.

Angebot Lagerstätten

Tantal wird vor allem aus den Mineralien Tantalit, Mikrolith und Wodginit gewonnen. Die weltweiten Reserven an Tantal wurden vom USGS für das Jahr 2009 auf rund 110 000 Tonnen geschätzt. Vor einer Neubewertung der brasilianischen Reserven durch den USGS im Jahr 2007 waren die weltweiten Tantalreserven lediglich auf insgesamt 43 000 Tonnen beziffert worden. Die weltweite Reservebasis belief sich im Jahr 2008 auf rund 180 000 Tonnen. Entsprechende Angaben für das Jahr 2009 liegen nicht vor (USGS, 2009 und 2010).

Gemäss USGS (2010) befinden sich die weltweiten Tantalreserven vor allem in Brasilien und Australien (Abb. 18). Wegen der unzureichenden Datenlage nicht berücksichtig

sichtigt sind dabei Länder wie Äthiopien, der Demokratischen Republik Kongo oder Ruanda.

Primärproduktion

Australien und Brasilien produzierten gemäss USGS im Jahr 2009 jeweils 560 Tonnen bzw. 180 Tonnen Tantal. Damit hatten sie, gemessen an der Weltjahresproduktion von rund 1160 Tonnen, zusammen einen Weltmarktanteil von rund 63 Prozent (Abb. 19). Die Angaben zur Weltjahresproduktion in den zentralafrikanischen Ländern (je 100 Tonnen in der Demokratischen Republik Kongo und in Ruanda) sind mit Unsicherheiten behaftet. Gemäss Aussagen eines UN-Expertenberichts (United Nations Security Council, 2008), könnte sich die tatsächliche Produktion in der Demokratischen Republik Kongo und ihren Nachbarländern im Jahr 2008 etwa auf dem Niveau Australiens bewegt haben.

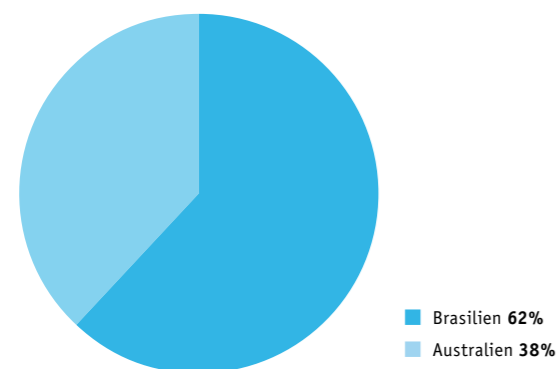


Abb. 18: Verteilung der weltweiten Tantalreserven im Jahr 2009; wegen der unzureichenden Datenlage sind Länder wie Äthiopien, die Demokratische Republik Kongo oder Ruanda nicht berücksichtigt (USGS, 2010)

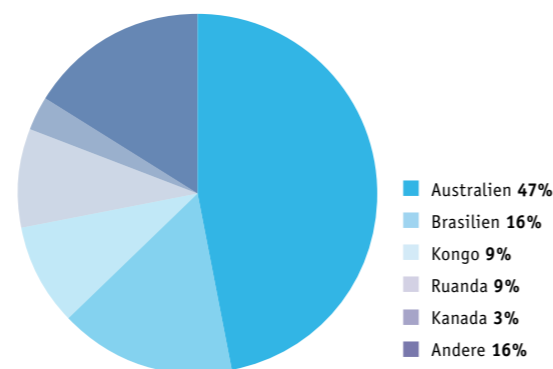


Abb. 19: Verteilung der weltweiten Tantalproduktion im Jahr 2009 (USGS, 2010)

Sekundärproduktion

Im industriellen Bereich werden Schätzungen zufolge rund 20 bis 25 Prozent des jährlichen Tantalinputs durch Recycling von Produktionsrückständen zurückgewonnen. Ein Recycling von Tantal aus gebrauchten elektronischen Geräten und Komponenten findet hingegen kaum statt, weil der Tantalgehalt hier sehr klein und die Rückgewinnung schwierig ist: Tantal oxidiert leicht und wird so in pyrometallurgischen Prozessen, welche bereits heute für die Rückgewinnung von seltenen Metallen aus Mobiltelefonen und anderen elektronischen Geräten zum Einsatz kommen, in die Rückstände (Schlacke) überführt (Buchert et al., 2009).

Nachfrage

Tantal wird aufgrund seiner sehr spezifischen Eigenschaften in ganz unterschiedlichen Bereichen eingesetzt. Der grösste Anteil des produzierten Tantals – rund 60 Prozent – wird derzeit für die Herstellung von elektronischen Bauteilen verwendet, insbesondere für Kondensatoren, da Tantal elektrische Energie auch bei geringen Abmessungen in hohen Kapazitäten speichern und freisetzen kann (USGS, 2009).

Zudem kommt Tantal als Tantalcarbid beispielsweise in Schneidwerkzeugen, als Legierung in der Luft- und Raumfahrtindustrie oder als besonders hochtemperaturresistente und dauerhafte Beschichtung in Turbinen zum Einsatz. Als wichtigste Zukunftstechnologien, welche die Nachfrage nach Tantal beeinflussen könnten, werden miniaturisierte Informations- und Kommunikationstechnologie-Anwendungen, die Herstellung von Präzisionsmaschinen und Bauteilen sowie Turbinen für die Energieerzeugung und den Flugzeugbau betrachtet (Buchert et al., 2009).

Tantal lässt sich in verschiedenen Anwendungen substituieren, so etwa durch Niob in Carbiden, Aluminium und Keramik in Elektrocondensatoren oder andere seltene Metalle wie Hafnium, Iridium, Molybdän, Niob, Rhenium oder Wolfram in Hochtemperaturanwendungen (USGS, 2010). Allerdings führt dies in der Regel zu einer Verringerung der Leistungsfähigkeit und teilweise zu einer Verschiebung des Problems auf andere seltene Metalle.

Probleme und Herausforderungen

Der Abbau von Tantal wird für Bürgerkriege und die Bedrohung von einheimischen Tierarten in der Demokratischen Republik Kongo mitverantwortlich gemacht (Behrendt et al., 2007). Hier stellt sich in besonderer Masse die Frage, wie der Abbau von seltenen Metallen nachhaltiger gestaltet werden kann.

Während vor allem im industriellen Bereich bereits gewisse Recyclingaktivitäten stattfinden, wird eine Rückgewinnung speziell aus gebrauchten Elektronikgeräten durch die chemischen Eigenschaften sowie die Feinverteilung des Tantals in den Produkten und Rückständen erschwert.



Wege zu einer nachhaltigen Nutzung

Für einen nachhaltigeren Umgang mit seltenen Metallen müssen das bestehende Wissen vertieft sowie darauf aufbauend konkrete Handlungsoptionen entwickelt werden. Um diese Optionen umfassend und zielführend zu verwirklichen, bedarf es zudem eines geeigneten institutionellen Rahmens. Auch die Schweiz als rohstoffarmes Land kann hierzu konkrete Beiträge leisten.

Wesentliche Elemente einer nachhaltigen Entwicklung sind die gerechte Verteilung der Chancen und Belastungen zwischen den heute lebenden Generationen (Verteilungsgerechtigkeit) sowie zwischen den heutigen und den zukünftigen Generationen. Ein nachhaltiger Umgang mit seltenen Metallen sollte sich an folgenden drei Stossrichtungen orientieren: Als erstes muss das Wissen über die Faktoren, welche Nachfrage und Versorgung mit seltenen Metallen beeinflussen, vertieft werden. Zweitens sind Handlungsoptionen und -strategien für eine nachhaltigere Gestaltung der Nachfrage- und Versorgungssysteme zu entwickeln. Schliesslich braucht es Institutionen, welche die weltweite Umsetzung solcher Optionen unterstützen.

Vertiefung des Wissens

Im Vergleich zu anderen mineralischen Rohstoffen ist das naturwissenschaftlich-technische Wissen über Vorkommen und Verteilung seltener Metalle noch begrenzt, weshalb Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in diesem Bereich gezielt verstärkt werden sollten. Hierbei ist insbesondere auch eine Verbesserung der Datengrundlage bezüglich der in den vergangenen Jahrzehnten neu entstandenen anthropogenen Lager seltener Metalle anzustreben (s. International Panel for Sustainable Resource Management, 2010). Darauf aufbauend lassen sich unter Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und sozialer Gesichtspunkte geeignete Recyclingsysteme entwickeln.

Im Hinblick auf ein verstärktes Recycling von seltenen Metallen ist ein spezielles Augenmerk auf Konsumgüter wie Elektro- und Elektronikgeräte zu richten. In diesem Zusammenhang sind auch ökoefiziente Verfahren zu entwickeln, welche eine Rückgewinnung kritischer seltener Metalle aus komplexen Mischungen ermöglichen. Zur Reduktion bestehender Abhängigkeiten sollte zudem verstärkt nach Substitutionsmöglichkeiten gesucht werden, wobei darauf geachtet werden muss, dass es dabei nicht lediglich zu einer Verschiebung des Problems kommt (zum Beispiel bei einer Substitution von Gallium durch Germanium). Priorität bei der Suche nach Substituten sollte Anwendungen eingeräumt werden, bei denen seltene Metalle dissipativ eingesetzt werden oder wenig Potenzial zur Verbesserung der Recyclingmöglichkeiten besteht.

Entwicklung von Handlungsoptionen und -strategien

Ausgehend von einer verbesserten Wissensgrundlage können, u.a. mit Hilfe von Szenarioanalysen, potenzielle ökologische, ökonomische und soziale Auswirkungen verschiedener möglicher zukünftiger Entwicklungen der Nachfrage nach und der Versorgung mit kritischen Metallen beschrieben werden. Daraus lassen sich unter Einbezug der relevanten Akteure Handlungsoptionen und -strategien für einen nachhaltigeren Umgang mit kritischen Metallen ableiten.

Ein nachhaltigerer Umgang mit seltenen Metallen verlangt möglichst umweltschonende, ökonomisch effiziente und sozial gerechte Wertschöpfungsketten.

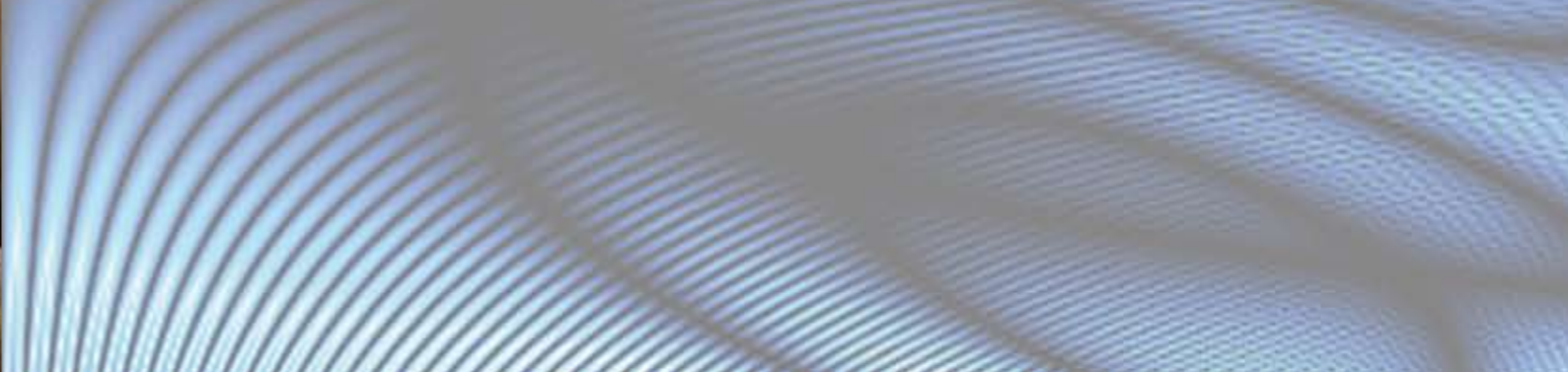
Wesentliche Voraussetzung hierfür ist eine Perspektive, welche den gesamten Lebenszyklus einer Ressource bzw. eines Produktes betrachtet – von der Gewinnung bis zur Entsorgung bzw. zum Recycling. Dazu gehört auch, dass das «stoffliche Design» des jeweiligen Produktes sowie die Sammlung, Sortierung, Aufbereitung und das anschliessende Behandlungsverfahren eng aufeinander abgestimmt sind. Eine zentrale Voraussetzung hierfür ist eine transparente Kommunikation zwischen den Akteuren entlang der Wertschöpfungskette. Andernfalls besteht die Gefahr, dass signifikante Mengen seltener Metalle irreversibel durch Feinverteilung in Technosphäre und Umwelt verloren gehen.

Durch Erhöhung der Materialeffizienz lässt sich der Verbrauch von seltenen Metallen für eine spezifische Funktion (zum Beispiel das Führen eines Telefongesprächs) reduzieren. Damit solche Effizienzgewinne nicht durch eine verstärkte Nachfrage nach Produkten überkompensiert werden, sollte auch dem Aspekt der Suffizienz – also einer Einschränkung des Konsums von Gütern auf das Notwendige – vermehrt Beachtung geschenkt werden. Dies würde allerdings eine Abkehr vom Trend erfordern, dass neue materielle Produkte in immer kürzeren Abständen auf den Markt kommen und gekauft werden. Auch in diesem Bereich ist dem Grundsatz einer Betrachtung des gesamten Lebenszyklus Rechnung zu tragen. So kann zum Beispiel in bestimmten Fällen eine kürzere Lebenszeit eines Produkts zugunsten von daraus resultierenden Vorteilen in der Nutzungsphase durch ein neues Produkt von Vorteil sein.

Schaffung eines geeigneten institutionellen Rahmens

Die Umsetzung der verschiedenen Optionen für einen nachhaltigeren Umgang mit seltenen Metallen erfordert einen geeigneten institutionellen Rahmen. Von Bleischwitz (Bleischwitz und Bringezu, 2007; Bleischwitz und Pfeil, 2009) und Kollegen wurde in diesem Zusammenhang ein System für ein globales Ressourcenmanagement vorgeschlagen, das aus drei Eckpfeilern besteht:

- Ein internationales Panel für ein nachhaltiges Ressourcenmanagement, welches im November 2007 auf Initiative der Europäischen Kommission im Rahmen des United Nations Environment Programme (UNEP) eingerichtet wurde. Das zwischenstaatlich legitimierte Expertengremium bereitet weltweit den unabhängigen wissenschaftlichen Sachverstand zum Umgang mit stofflichen Ressourcen auf und formuliert Empfehlungen.
- Ein internationales Abkommen mit dem Ziel, weltweit ein nachhaltiges und friedliches Ressourcenmanagement zu etablieren. Das Abkommen sollte zwei Rechtsprinzipien verbindlich verankern: Zum einen das Prinzip des gemeinsamen Erbes der Menschheit (common heritage of mankind), wonach Ressourcen den einzelnen Staaten und Akteuren zur Nutzung überlassen sind, letzten Endes jedoch in ihrem geologischen und anthropogenen Gesamtbestand als Erbe angesehen und zumindest in ihren wichtigsten Funktionen an künftige Generationen weitergegeben werden sollten. Zum anderen das Prinzip der «Materialverantwortung» (materials stewardship), wonach eine optimale und angemessene Förderung, Produktion und Nutzung von Rohstoffen zum Wohle der Gesellschaft und unter Wahrung von Umweltbelangen stattfinden soll.
- Eine internationale Agentur zum nachhaltigen Ressourcenmanagement, welche Daten bereitstellt und die Umsetzung international vereinbarter Aufgaben – z.B. Roadmaps und Projekte zum nachhaltigen Ressourcenmanagement in Entwicklungsländern – sicherstellen würde. Eine derartige Einrichtung kann auch unter dem Dach einer bestehenden Organisation aufgebaut werden.



Referenzen

Inwieweit ein solches System den geeigneten Rahmen darstellt, mit dem sich die Ressourcenproblematik in den Griff bekommen lässt, und ob bzw. unter welchen Umständen auch die Entwicklungs- und Schwellenländer damit einverstanden wären, wird sich weisen müssen. 2008 wurde in der EU eine Rohstoffstrategie verabschiedet, welche eine grössere Versorgungssicherheit zum Ziel hat und u.a. eine Reduktion der Verwendung von Primärressourcen anstrebt (European Commission, 2008). In diesem Zusammenhang wurde kürzlich der Bericht einer von der Europäischen Kommission geführten Arbeitsgruppe veröffentlicht, welche die kritischsten Rohstoffe für die EU ermittelt hat (European Commission, 2010).

Die Rolle der Schweiz: Keine Primärressourcen, keine Verantwortung?

Die Handlungsmöglichkeiten der Schweiz in Bezug auf die seltenen Metalle sind nicht offensichtlich. Auch wenn die Schweiz über keine relevanten Primärvorkommen an seltenen Metallen verfügt, sprechen doch viele Gründe dafür, dass sie sich verstärkt für einen nachhaltigeren Umgang mit seltenen Metallen einsetzt. So ist die Schweiz als postindustrielle Gesellschaft von Zukunftstechnologien abhängig, bei denen seltene Metalle eine wichtige Rolle spielen. Sie sollte deshalb ein grosses Interesse daran haben, sorgsam mit den kritischen Metallen umzugehen, die für diese Technologien notwendig sind. Ferner trägt die Schweiz als Land, in dem solche Technologien sich oft sehr früh verbreiten,

indirekt eine Mitverantwortung für die ökologischen und sozialen Auswirkungen des Abbaus von Primärressourcen in anderen Ländern. Und nicht zuletzt kann die Schweiz durch das Einbringen von Wissen etwa im Bereich der Substitution besonders kritischer Metalle ihre Position in der internationalen Forschungslandschaft stärken und eine nachhaltige Entwicklung im Bereich des Umgangs mit Ressourcen fördern.

Erste Schritte in diese Richtung wurden bereits gemacht. So hat die Schweiz bereits vor mehr als 15 Jahren Rücknahmesysteme für Elektro- und Elektronikaltgeräte eingeführt, die eine Rückgewinnung wertvoller Ressourcen aus ausgedienten Konsumgütern ermöglichen (SENS, 2010; SWICO Recycling, 2010; Wäger et al., 2010). Aber auch auf der Seite der primären Rohstoffgewinnung leistet die Schweiz einen Beitrag: Im Juni 2009 hat sie beschlossen, die «Extractive Industries Transparency Initiative (EITI)», welche die Transparenz bei Einnahmen aus Bergbaukonzessionen in Entwicklungsländern sowie die gute Unternehmensführung im Rohstoffsektor fördert, mit einem Beitrag von 3 Millionen US\$ zu unterstützen (seco, 2009). Weitere Schritte, etwa in Richtung eines verstärkten Engagements für einen nachhaltigeren Konsum oder einer Substitution kritischer Metalle durch weniger problematische Elemente sollten folgen.

Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weidemann, F., Scharp, M., Lüllmann, A., Handke, V. und Marwede, M. (2009) Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Behrendt, S., Kahlenborn, W., Feil, M., Dereje, C., Bleischwitz, R. und Delzeit, R. (2007) Seltene Metalle. Massnahmen und Konzepte zur Lösung des Problems konfliktverschärfender Rohstoffausbeutung am Beispiel Coltan. Umweltbundesamt, Dessau.

Bleischwitz, R. und Bringezu, S. (2007) Globales Ressourcenmanagement – Konfliktpotenziale und Grundzüge eines Global Governance-Systems. SEF Policy Paper 27, Stiftung Entwicklung und Frieden (SEF), Bonn.

Bleischwitz, R. und Pfeil, F. (2009): Globale Rohstoffpolitik, Herausforderungen für Sicherheit, Entwicklung und Umwelt. Reihe EINE WELT, Baden-Baden: Nomos Verlag.

Bridge, G. (2004) Contested Terrain: Mining and the Environment, *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2004 (29), 205–259.

Buchert, M., Schlüer, D. und Bleher, D. (2009) Critical Metals for future sustainable technologies and their recycling potential. Öko-Institut, Freiburg i. Br.

Cohen, D. (2007) Earth's natural wealth: an audit. *New Scientist*, May 23.

ecoinvent Centre (2009), ecoinvent data v2.1. ecoinvent Berichte 1-25, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2009, www.ecoinvent.org.

European Commission (2008) The Raw Materials Initiative - Meeting our Critical Needs for Growth and Jobs in Europe. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council (COM(2008) 699), Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

European Commission (2010) Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials.

Europäische Gemeinschaft (2006) Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG. Amtsblatt der Europäischen Union L 266/1.

Gordon, R. B., Bertram, M. und Graedel, T. E. (2007) Metal stocks and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103, 1209-1214.

Hagelüken, C. and Meskers, C.E.M. (2008) Mining Our Computers – Opportunities and Challenges to Recover Scarce and Valuable Metals from End-of-Life Electronic Devices. *Electronics Goes Green*, Berlin, 7-10. September.

Hagelüken, C. und Meskers, C.E.M. (2010) Complex Life Cycles of Precious and Special Metals, in: Graedel, T., and van der Voet, E. (eds.) *Linkages of Sustainability*. Strüngmann Forum Report 4. Cambridge, MA: The MIT Press.

International Panel for Sustainable Resource Management (2010) Metal Stocks in Society. Scientific Synthesis. United Nations Environment Programme.

Jaskula, B.W. (2008) 2007 Minerals Yearbook. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.

Johnson, J., Harper, E.M., Lifset, R. and Graedel, T.E. (2007) Dining at the Periodic Table. Metals Concentrations as They Relate to Recycling. Environ. Sci. Technol., 41, 1759-1765.

Jorgenson, J.D. und George, M.W. (2005). *Indium*. Mineral Commodity Profile. Reston, Virginia.

Liedtke, M. und Elsner, H. (2009), Commodity Top News Nr. 31, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR.

MacLean, H.L., Duchin, F., Hagelüken, C., Halada, K., Kesler, S.E., Moriguchi, Y, Mueller, D., Norgate, T.E., Reuter, M.A., van der Voet, E., Hagelüken, C. und Meskers, C.E.M. (2010) Stocks, Flows and Prospects of Mineral Resources, in: Graedel, T., and van der Voet, E. (eds.) Linkages of Sustainability. Strüngmann Forum Report 4. Cambridge, MA: The MIT Press.

National Research Council (2008). Minerals, Critical Minerals and the U.S. Economy. Washington D.C.: The National Academies Press.

Phipps, G., Mikolajczak, C. und Guckes, T. (2007) Indium and Gallium supply sustainability. 22nd EU PV-Solar Conference. Milan, September 4, 2007.

Roskill Information Services (2007). The economics of Rare Earths and Yttrium. London.

Säuberlich, E. (2008). Ressourcenmanagement seltener Metalle in der Lampenindustrie am Beispiel Seltener Erden. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Universität Augsburg.

Schmidt-Bleek, F. (1993) Wieviel Umwelt braucht der Mensch: MIPS – das Mass für ökologisches Wirtschaften. Berlin: Birkhäuser.

seco (2009) Schweiz fördert Transparenz im Rohstoffsektor. Staatssekretariat für Wirtschaft, Bern, 8. Juni 2009. <http://www.news.admin.ch/message/index.html?lang=de&msg-id=27332>.

SENS (2010) Fachbericht 2009. Stiftung Entsorgung Schweiz. http://www.sens.ch/global/pdf/marktplatz/100624_SENS_FB_2009_druck_d.pdf.

Sepúlveda, A., Schluep, M., Renaud, F.G., Streicher, M., Kuehr, R., Hagelüken, C. und Gerecke, A.C. (2010) A review of the environmental fate and effects of hazardous substances released from electrical and electronic equipments during recycling: Examples from China and India. Environmental Impact Assessment Review 30, 28–41.

Skinner, B. (1976) A Second Iron Age Ahead? American Scientist 65, 258-269.

Skinner, B. (1979) Earth Resources. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 76, 4212 – 4217.

Stevens, L.G. (2007) Indium as a critical metal. Clinton, March 7, 2007.

SWICO Recycling (2010) Tätigkeitsbericht 2009. Schweizerischer Wirtschaftsverband für Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik. http://www.swicorecycling.ch/downloads/497/242620/swi_taetigkeitsbericht_d.pdf.

Tilton, J. (2003) *On Borrowed Time?: Assessing the Threat of Mineral Depletion*. Washington D.C.: Resources for the Future.

USGS (2008) Mineral Commodity Summaries 2007. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.

USGS (2009) Mineral Commodity Summaries 2008. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.

USGS (2010) Mineral Commodity Summaries 2009. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.

Umicore (2010) Persönliche Mitteilungen.

United Nations Security Council (2008): Final report of the Group of Experts on the Democratic Republic of the Congo, No. S/2008/773, 12. Dezember 2008.

Wäger, P., Hirschier, R. und Eugster, M. (2010) Environmental Impacts of the Swiss Collection and Recycling Systems for Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Zur Publikation eingereicht in Science of the Total Environment.

Watanabe, M. (2008). Solar cell makers look to substitute silicon with indium. In: Platts Metals Week. v. 79, no. 9, March 3rd, 2008.

Wellmer, F.W. und Wagner, M. (2006) Metallic Raw Materials – Constituents of our Economy. In: von Gleich, A., Ayres R.U. und Gösling-Reisemann, S. Sustainable Metals Management. Dordrecht: Springer. S. 41-68.

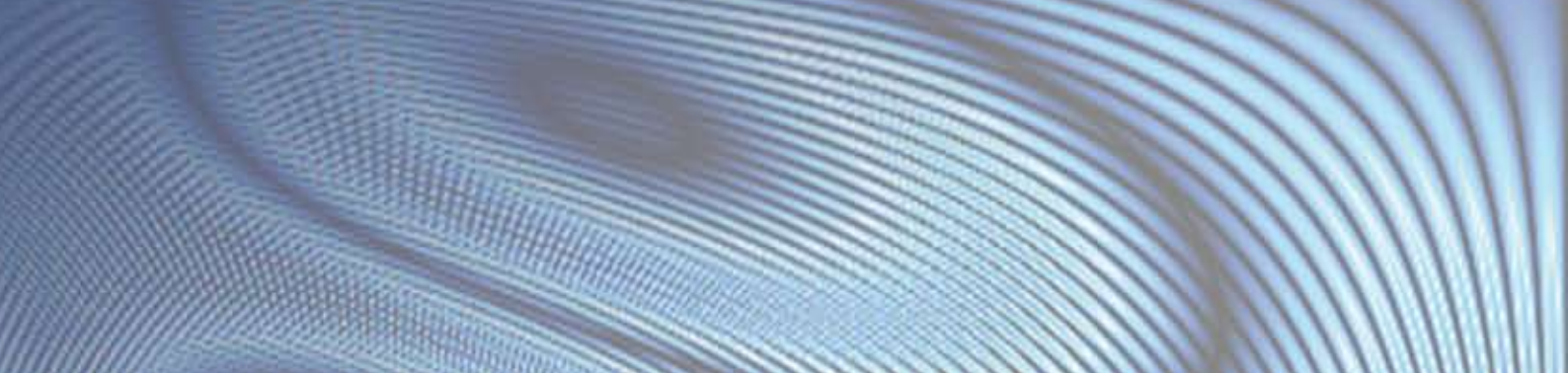
Wolfensberger, M., Lang, D. J. und Scholz, R. W. (2008). (Re-) Structuring the field of Non-Energy Mineral Resource Scarcity. Summary of the Workshop “Scarce Raw Materials” August 31 – September 2, 2007 – Davos, Switzerland. Zurich: Institute for Environmental Decisions (IED), Natural and Social Science Interface (NSSI), ETH Zürich.

World Resources Forum (2009) Davos, 15-16 September 2009. http://www.worldresourcesforum.org/wrf_declaration.

Dank

Ein grosser Dank geht an die beiden Hauptautoren Patrick Wäger (Empa) und Daniel Lang (ETH Zürich, jetzt Leuphana Universität Lüneburg) für ihr grosses Engagement bei der Erstellung dieser Schrift. Sie wurden unterstützt von Raimund Bleischwitz und Dominic Wittmer (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie), Christian Hagelüken (Umicore) sowie Simon Meissner und Armin Reller (Universität Augsburg). Ein herzliches Dankeschön auch an diese Co-Autoren.

Das Kapitel «Wege zu einer nachhaltigen Nutzung» beruht auf den Ergebnissen eines Workshops zum nachhaltigen Umgang mit seltenen Elementen, welcher am 15. September 2009 an der R'09-Konferenz von Patrick Wäger, Daniel Lang, Armin Reller und Roland Scholz (ETH Zürich) durchgeführt wurde. Wir danken allen Teilnehmenden sowie den Diskussionsleitern und -leiterinnen Dana Cordell, Andreas Köhler, Anna Stamp und Saskia Ziemann für ihre Beiträge.



Impressum

SATW Schrift Nr. 41

Seltene Metalle, November 2010

SATW Geschäftsstelle
Seidengasse 16, 8001 Zürich
Tel. +41 (0)44 226 50 11
E-Mail info@satw.ch

Hauptautoren Patrick A. Wäger und Daniel J. Lang

Co-Autoren Raimund Bleischwitz, Christian Hagelüken, Simon Meissner, Armin Reller, Dominic Wittmer

Review Xaver Edelmann, Hans Hänni, Eberhard Jochem, Ulrich W. Suter, Andreas Zuberbühler

Redaktion Felix Würsten

Bilder Umicore, Fotolia

ISBN 3-908235-17-0

SATW

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften
Académie suisse des sciences techniques
Accademia svizzera delle scienze tecniche
Swiss Academy of Engineering Sciences



Mitglied der
Akademien der Wissenschaften Schweiz