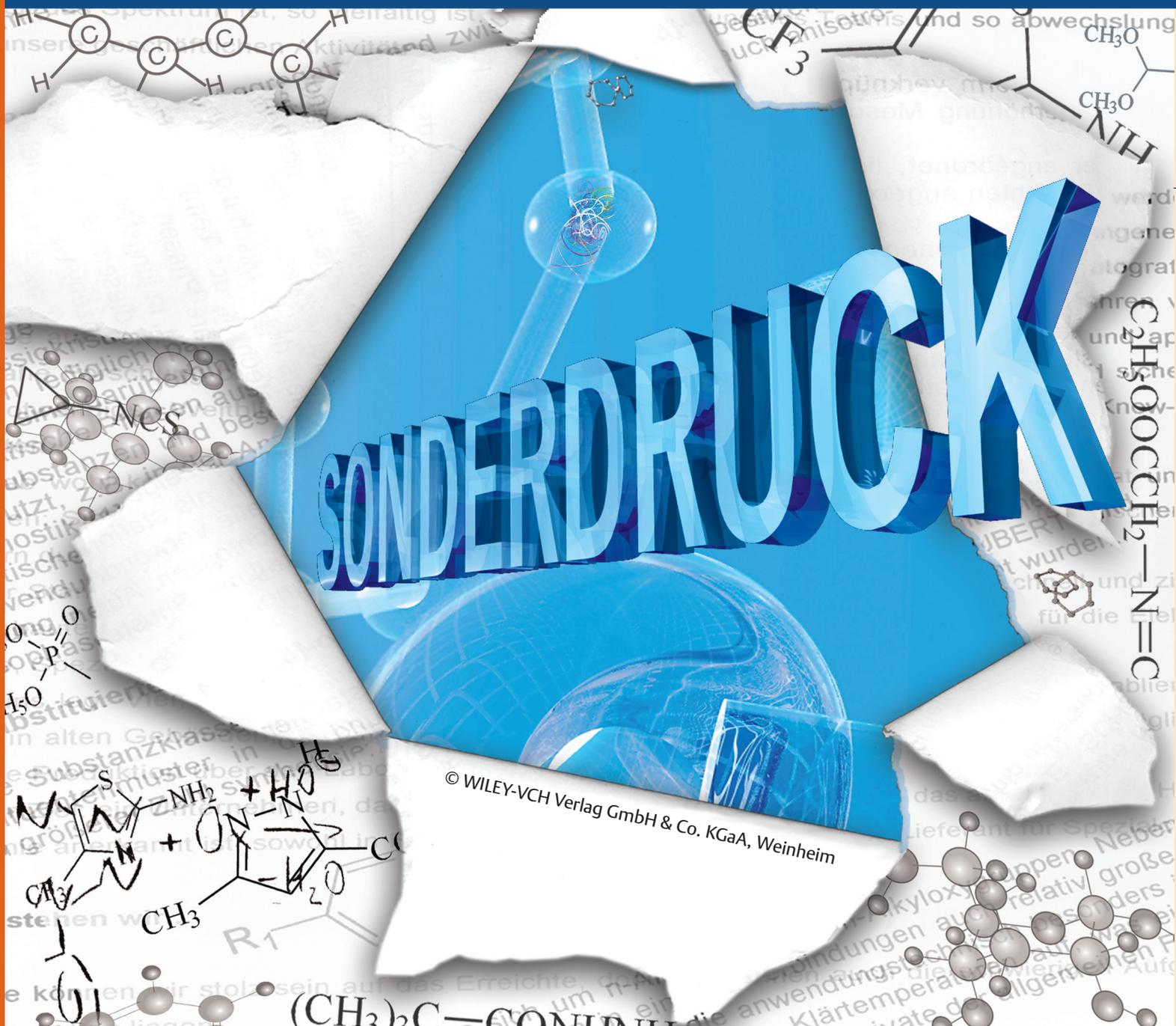


CHEMIE

IN UNSERER ZEIT

SONDERDRUCK

© WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim





Wie kritisch ist die Versorgungslage?

Die Verfügbarkeit von Hochtechnologie-Rohstoffen

FRANK MELCHER | HILDEGARD WILKEN



Die Europäische Union hat auf Basis der Bewertung des Versorgungsrisikos und der wirtschaftlichen Bedeutung 14 kritische Rohstoffe definiert; dazu gehört auch Germanium. Eine potenzielle Quelle für das Metall ist der „Big Hill“ von Lubumbashi im Kongo, der aus Schlacken der Kupfer- und Zinkproduktion aus der Verhüttung Germanium-reicher Sulfiderze besteht.

Die Bundesrepublik Deutschland ist bei vielen Rohstoffen importabhängig (Abbildung 1). Dies trifft besonders auf Rohstoffe zu, aus denen Metalle gewonnen werden. Für Blei, Zink, Kupfer, Nickel, Eisen, Aluminium und Edelmetalle (Gold, Silber, Platin) kann der Bedarf durch Recycling partiell gedeckt werden. Der kontinuierliche Anstieg der Rohstoffnachfrage und die Volatilität der Rohstoffpreise haben die deutsche Industrie und Politik gleichermaßen alarmiert. Dies führte dazu, dass das Thema der zukünftigen Versorgung mit Rohstoffen derzeit in der Öffentlichkeit und der Politik gleichermaßen diskutiert wird. In diesem Beitrag möchten wir die Einflussgrößen auf die Rohstoffnachfrage am Beispiel von Hochtechnologie-Metallen näher beleuchten und erläutern, wie die deutsche und europäische Politik auf drohende Versorgungsengpässe reagieren.

Die deutsche Wirtschaft ist Kunde auf dem globalen Rohstoffmarkt. Viele metallische Rohstoffe stammen aus Übersee, einige sind auf nur wenige Länder konzentriert (Abbildung 2). Gerade in letzter Zeit hat das Thema der „Seltenen Erden“ für mediale Aufmerksamkeit gesorgt, als man feststellte, dass über 97 % der Weltproduktion aus China stammen und auch die größten Reserven dieser „Zukunfts- und Hochtechnologie-Metalle“ dort liegen. Außerdem gibt China Exportquoten vor, die für die weiterverarbeitende heimische Industrie bedrohlich wirken.

Die Sicherung der Rohstoffversorgung ist für Deutschland als Technologiestandort und Exportnation unabdingbare Voraussetzung. Die deutsche Wirtschaft ist seit etwa 2004 mit einer geänderten Rohstoffsituation konfrontiert. Vor allem infolge des rasanten Wirtschaftswachstums der Schwellenländer, allen voran Chinas, steigt die Rohstoffnachfrage – abgesehen von einem kurzen Einbruch 2009 aufgrund der Finanz- und Wirtschaftskrise – kontinuierlich. Dies stellt den Rohstoffsektor vor neue Herausforderungen. Vor diesem Hintergrund der deutlich veränderten weltweiten Rohstoffsituation mit markttechnisch bedingten Rohstoffverknappungen, weiter steigenden Rohstoffpreisen und des hohen Rohstoffbedarfs der deutschen Wirtschaft sowohl für Schlüssel- als auch für Zukunftstechnologien, hat auf nationaler Ebene ein Dialog zwischen Wirtschaft und Politik stattgefunden. Der Dialog unter Federführung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) führte über mehrere Zwischenschritte 2010 zur Verabschiedung der Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Als eine strukturelle Maßnahme im Rahmen der Rohstoffstrategie der Bundesregierung hat der damalige Bundeswirtschaftsminister Brüderle am 4. Oktober 2010 die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) gegründet. Die DERA dient als Schnittstelle und zentrale Informationsplattform für Politik und Wirtschaft. Auf europäischer Ebene fand ein vergleichbarer Dialogprozess mit Entstehung der Raw Materials Initiative statt, aus der sich jetzt nach und nach verschiedene Aktivitäten und Programme ableiten.

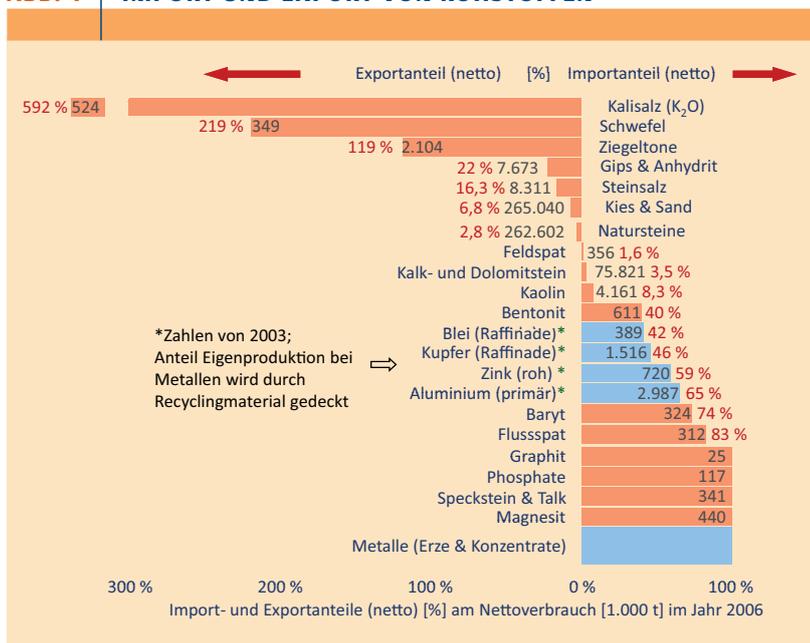
Die Deutsche Rohstoffagentur – Struktur und Aufgaben

Die Aufgabe der DERA ist die Unterstützung der deutschen Wirtschaft bei der Sicherung der Rohstoffversorgung. Die

DERA untersucht und bewertet die Verfügbarkeit und die Marktsituation der Rohstoffe aus Sicht der Wirtschaftsunternehmen unter besonderer Berücksichtigung rohstoffwirtschaftlicher, markttechnischer und geopolitischer Aspekte. Dabei werden die Themen Versorgungsrisiken sowie Beschaffungs- und Absicherungsstrategien unter Einbeziehung der gesamten Wertschöpfungskette einschließlich der Rohstoffpreise in den Fokus gestellt. Mit diesem Aufgabenportfolio wird nicht nur die rohstoffexplorierende und rohstoffgewinnende Wirtschaft sondern in besonderem Maße die für den Technologiestandort Deutschland bedeutende rohstoffverarbeitende Wirtschaft unterstützt.

Ein weiterer Fokus ist die bedarfsgerechte Aufbereitung unternehmensrelevanter Rohstoffpotenziale wie Lieferquellen, Investitionsmöglichkeiten in Explorations-, Bergbau- und Aufbereitungsprojekte sowie Rohstoffeffizienz. Die DERA betrachtet alle nichterneuerbaren Rohstoffe (Metalle, Industriemineralien, Baurohstoffe und Energierohstoffe), so dass sie flexibel und vorausschauend auf sich verändernde globale als auch regionale Marktsituationen reagieren kann. Dabei werden neben den primären Rohstoffen auch die sekundären Rohstoffe und die Rohstoffeffizienz in die Bewertungen zur Rohstoffverfügbarkeit sowie zur Darstellung der Rohstoffpotenziale einbezogen. Auf der Basis der Rohstoffinformationen und -analysen berät die DERA

ABB. 1 | IMPORT UND EXPORT VON ROHSTOFFEN



Die deutsche Wirtschaft ist vor allem bei den metallischen Rohstoffen stark importabhängig. Durch Recycling kann der Bedarf der Bunt-, Edel- und Leichtmetalle wenigstens teilweise durch eigene Produktion gedeckt werden. Im Sektor der Industriemineralien (Salz, Schwefel, Ton) ist Deutschland aber auch Exportnation.

ABB. 2 | LIEFERLÄNDER VON MINERALISCHEN ROHSTOFFEN



Mineralische Rohstoffe, ob Metalle, Industriemineralien oder Energierohstoffe, kommen aus aller Welt nach Deutschland. In dieser Grafik sind nur die wichtigsten Lieferländer genannt. PGM = Platingruppenmetalle, SE = Seltene Erden

Volatilität: Ausmaß der Schwankungen von Preisen; der Begriff wird im Bankwesen auch auf Aktien- und Devisenkurse oder Zinssätze angewendet.

die deutsche Wirtschaft, u. a. durch das im Aufbau befindliche Rohstoffinformations- und -frühwarnsystem sowie die DERA-Rohstoffdialoge, in denen aktuelle rohstoffwirtschaftliche Fragestellungen aufgenommen, mit den betroffenen Unternehmen diskutiert und Lösungsoptionen dargestellt werden.

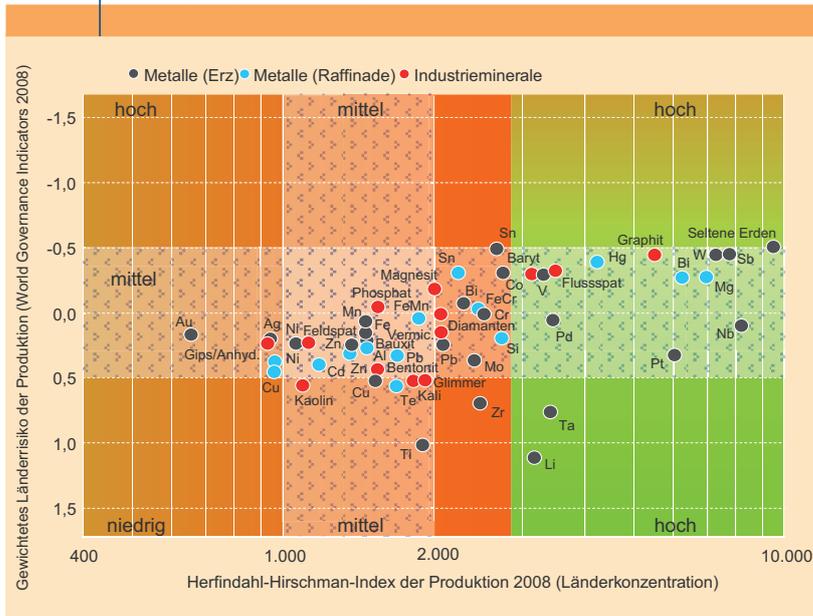
Ferner unterstützt die DERA die Rohstoffförderprogramme des Bundes mit fachlichem Know How. Darüber hinaus baut sie Kooperationen mit rohstoffreichen Ländern auf. Ziel ist der Aufbau von Netzwerken auf staatlicher und wirtschaftlicher Ebene zur gemeinsamen Bewertung und Darstellung von Rohstoffpotenzialen und Investitionsmöglichkeiten.

Kritische Rohstoffe

Die Bewertung der Sicherheit einer Rohstoffversorgung erfolgt nach Indikatoren, in die wiederum verschiedene Faktoren eingehen. Mögliche Indikatoren für eine Rohstoffversorgung sind die Länderkonzentration und das Länderrisiko (Abbildung 3). Die Länderkonzentration bewertet die Marktanteile der Wettbewerber eines Marktes [1], während das Länderrisiko aus den „Worldwide Governance“-Indikatoren berechnet wird [2]. Rohstoffe, die aus wenigen (hohe Länderkonzentration) und politisch oder wirtschaftlich kritisch bewerteten Ländern (hohes Länderrisiko) stammen, werden hinsichtlich ihrer zukünftigen Verfügbarkeit als unsicher oder kritisch betrachtet; dies sind unter anderem die bereits erwähnten Seltenen Erden, aber auch Antimon, Wolfram, Niob und Magnesium.

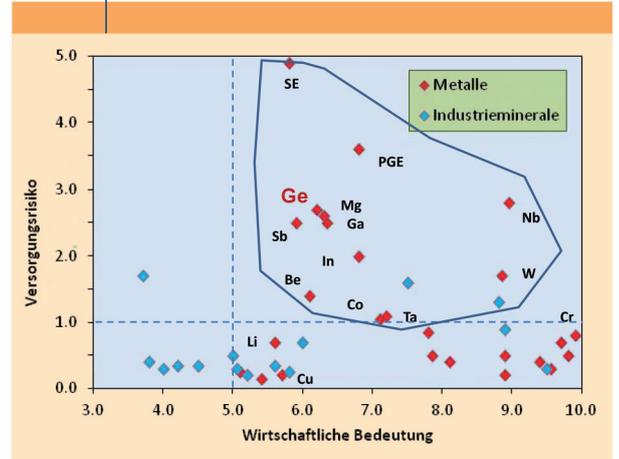
Die Europäische Union [3] hat auf der Basis der Bewertung des Versorgungsrisikos und der wirtschaftlichen Bedeutung 14 kritische Rohstoffe definiert (Abbildung 4):

ABB. 3 | VERSORUNGSRISIKO



Das potenzielle Versorgungsrisiko wird für Erze, raffinierte Metalle und Industriemineralien abgeschätzt. In diesem Diagramm werden die Länderkonzentration und das Länderrisiko bewertet.

ABB. 4 | KRITISCHE ROHSTOFFE



Die „Ad-Hoc Working Group on defining critical raw materials“ der Europäischen Kommission hat vierzehn mineralische Rohstoffe auf der Basis des Versorgungsrisikos und ihrer wirtschaftlichen Bedeutung für die EU als kritisch definiert.

deutung 14 kritische Rohstoffe definiert (Abbildung 4): die Metalle Beryllium, Magnesium, Niob, Tantal, Wolfram, Kobalt, Gallium, Germanium, Indium, Antimon und die Gruppen der Platingruppenelemente (PGE) und Seltenen Erden (SE). Hinzu kommen die Industriemineralien Graphit und Flussspat (Tabellen 1 und 2).

Im Vergleich dazu wird die Versorgung mit vielen anderen mineralischen Rohstoffen des täglichen Gebrauchs in diesem Diagramm als unkritisch bewertet, z.B. für Kupfer, Zink, Eisen oder Gold. Im sogenannten „Metallrad“ [4] stellt man fest, dass viele kritische Metalle überwiegend als Beiprodukte oder Koppelprodukte aus der Gewinnung anderer Hauptmetalle stammen: z.B. Gallium aus der Aluminiumgewinnung (Bauxit-Rohstoffe) [5]; Germanium und Indium aus Zink-Blei-Sulfid-erzen; Platingruppenmetalle aus Chrom-, Kupfer- und Nickelerzen (Abbildung 5). Für solche Nebenprodukte existiert oft keine eigene Produktionsinfrastruktur wie Mineral- oder Elementabtrennung. Die Metalle enden daher oft in Abgängen oder Emissionen und sind daraus kaum mehr wirtschaftlich gewinnbar. Nur aus kontrolliert deponierten Schlacken oder Schlämmen ist eine spätere Rückgewinnung zumindest zum Teil möglich [6]. Eine Produktionssteigerung von Koppelprodukten kann nur durch eine verstärkte Gewinnung des Hauptprodukts stattfinden. Ist dies nicht gegeben – wie beispielsweise in vielen Bleilagerstätten, die als Nebenprodukt Germanium oder Silber führen – sind auch die Koppelprodukte nicht wirtschaftlich zu gewinnen. Daher bestehen für Koppelprodukte sehr komplexe marktwirtschaftliche, technische und ökonomische Randbedingungen, die bei einer Marktanalyse zu berücksichtigen sind [6].

Einige der kritischen Rohstoffe wie Gallium, Indium, Germanium, SE-Elemente, PGE und Tantal werden zukünftig in hohen Anteilen in Hochtechnologie-Produkten Verwendung finden (Tabelle 3). In einer vom BMWi beauf-

TAB. 2 | VERWENDUNG DER KRITISCHEN ROHSTOFFE UND GRÜNDE FÜR DEREN KRITIKALITÄT [3]

| Element | | Nutzung (Beispiele) |
|---|--|--|
| Beryllium | 99 % der Weltproduktion stammen aus den USA und China Niedrige Recyclingrate Kaum substituierbar | Elektronik |
| Magnesium | EU importiert 47 % der Weltproduktion Hauptproduzent ist China Handelshemmnisse aus Südafrika, China und Russland Niedrige Recyclingrate | Verpackung, Legierungen |
| Kobalt | DR Kongo als Hauptquelle, dort starke Konkurrenz durch chinesische Firmen Kaum substituierbar | Legierungen, Batterien, Hartmetalle |
| Gallium | Hauptproduzent ist China Geringe Produktion in der EU (Slowakei, Ungarn) Handelshemmnisse aus Südafrika, China und Russland Derzeit kein Recycling aus Schrott Substitution nur für einige Anwendungen möglich | Halbleiter, erneuerbare Energien, Laserdioden |
| Germanium | Hauptproduzent ist China Bedeutende Erzeugung von Ge-Metall in der EU Recyclingrate unter 30 % | Telekommunikation, Solar, Infrarotoptik |
| Niob | Keine Produktion in der EU Recyclingrate 20 % Substitution problematisch (Kosten, Performance) | Stahl, Werkzeuge |
| Indium | Hauptproduzent ist China Limitiertes Recycling aus Produktionsabfällen Substitution nur für einige Anwendungen möglich | Elektronik |
| Antimon | Keine Substitutionsmöglichkeit als Flammschutzmittel Hauptproduzent ist China, weltweit größte Reserven Niedrige Recyclingrate Drohender weltweiter Know-how-Verlust für Flammschutzmittel | Flammschutzmittel, Batterien |
| Tantal | DR Kongo als wichtige Quelle Substitution nur unter Performance-Verlust möglich Recycling limitiert | IT, Telekommunikation |
| Wolfram | China ist wichtigstes Förderland und hat die größten Reserven China verarbeitet auch Abfälle und Schrotte Substitutionsmöglichkeiten sind limitiert durch Kosten, Performance, Umwelt EU ist ein Weltmarktführer bei vielen W-basierten Produkten, drohender Know-how-Verlust | Hartmetall, Werkzeuge |
| Platingruppen-elemente (PGE) | Keine Produktion in der EU Importe aus Südafrika und Russland Recycling ist limitiert und abhängig von Technologien; häufig dissipative Verteilung Substituierbarkeit untereinander gegeben, vermindert aber nicht das Versorgungsproblem | Automobilindustrie (Katalysatoren), Elektronik |
| Seltene Erd-Elemente (SE) | Keine Produktion in der EU Importe vor allem aus China; Exportquoten SE-Extraktion aus Erzen ist schwierig Kein Recycling | Automobilindustrie, erneuerbare Energien, Magnete, Batterien |
| Graphit | 95 % werden importiert, v.a. aus China Sehr niedrige Recyclingrate | Stahl, Gießerei, Brennstoffzelle |
| Flussspat | 25 % des EU Verbrauchs stammen aus eigener Produktion Rest ist aus China; Exportquoten und Exportsteuern Recyclingrate unter 1 % Limitierte Substitutionsmöglichkeiten | Chemie, Stahl |
| Recyclingraten: Anteile von Recyclingmaterial an der Gesamtproduktion | | |

kator würde bedeuten, dass im Jahr 2030 alleine die betrachteten Zukunftstechnologien mehr von diesen Metallen verbrauchen, als derzeit weltweit produziert werden. Dies könnte zu ernsthaften Versorgungsengpässen und Preissteigerungen und damit auch erheblichen Belastungen für die deutsche und europäische Industrie führen. So wird z.B. das 4-fache (Indikator für 2030: 3,97) der derzeitigen Gesamtproduktion von Gallium allein für Hochtechnologie-Produkte wie in der Photovoltaik prognostiziert, während aktuell lediglich 18 % der Gesamtbergbauproduktion von Gallium (Indikator: 0,18) in diese Bauteile fließen.

Geologische Verfügbarkeit

Wie viel mineralische Rohstoffe sind eigentlich weltweit vorhanden und wo genau liegen diese Rohstoffe? Die Metallreserven sind aus geologischen Gründen in der für den Bergbau zugänglichen Erdkruste (etwa in den obersten 1 bis 4 Kilometern) recht ungleichmäßig verteilt. Europa hat vergleichsweise wenige Metallvorräte, nur beim Eisen (Schweden), Kupfer (Polen, Schweden), Nickel (Finnland) sowie bei Blei und Zink (Irland) gibt es bedeutendere Reserven. Die größten Vorräte der Metalle liegen auf anderen Kontinenten, beispielsweise in Australien (Eisen, Aluminium), in Kanada (Nickel), in Afrika oder Südamerika, im infrastrukturell kaum entwickelten Sibirien oder in Ländern, die diese Rohstoffe zunehmend für den Eigenbedarf benötigen (China, Indien, Brasilien) (Abbildung 6).

Der Begriff der geologischen Reserve ist eine dynamische Größe. Sie gibt die sicher nachgewiesenen und zu den heutigen Bedingungen technisch und wirtschaftlich abbaubaren Mengen eines Rohstoffes an (Abbildung 7). Nachgewiesene, aber derzeit als unwirtschaftlich und/oder als technisch nicht abbaubar eingestufte Anteile werden als Ressourcen bezeichnet; Potenziale sind vermutete gewinnbare Mengen eines Rohstoffes. Obwohl die Potenziale für viele Metalle zumeist unbekannt sind, werden sie in der Regel als genügend hoch eingeschätzt, so dass aus geologischen Gründen keine Engpässe zu befürchten sind. Ressourcen werden durch zunehmende Explorationstätigkeit und Preissteigerungen zu Reserven, umgekehrt können heute bauwürdige Lagerstätten durch Preisverfall wiederum zu Ressourcen abgewertet werden. Der Begriff der Reservenbasis bezeichnet die Gesamtheit aller Reserven plus den Anteil der Ressourcen, der nachzeitigem Wissensstand in näherer Zukunft bereits zu Reserven werden kann.

Vielfach wird der Begriff der geologischen Verfügbarkeit (in der Literatur auch als „Reichweite“ bezeichnet) verwendet, um anzugeben, wie lange ein bestimmtes Metall aus geologischen Gründen beispielsweise auf der Basis der Reserven, Reservenbasis oder Ressourcen theoretisch noch zur Verfügung steht. Diese Größe bezieht sich auf die derzeitige Marktsituation (Verbrauch) und den derzeitigen Kenntnisstand über die Reserven.

Die geologische Verfügbarkeit ändert sich durch Schwankungen beim Verbrauch und Explorationsaufwand, der wiederum mit dem Rohstoffpreis verknüpft ist. Für ei-

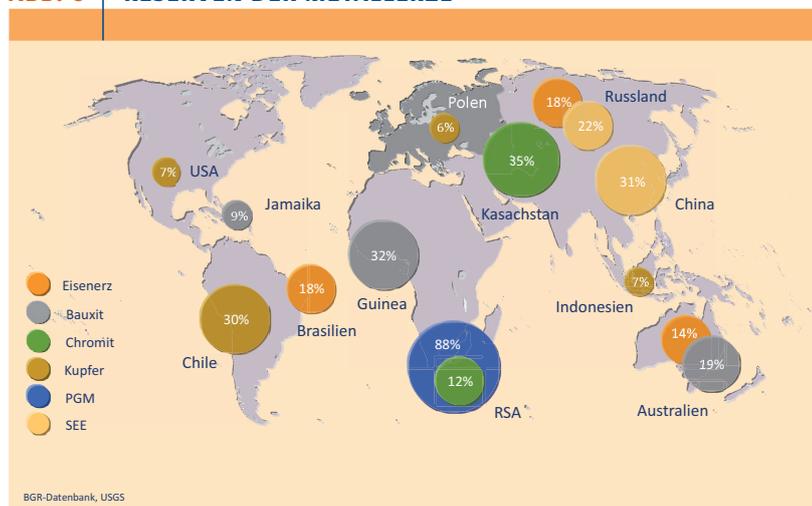
TAB. 3 | KENNZAHLEN WICHTIGER KRITISCHER METALLE IM VERGLEICH ZU KUPFER, SILBER UND ZINN

| Metall | Statische Reservenreichweite | Länderkonzentration | Bedarf für Zukunftstechnologien [7, 15] | |
|-----------|------------------------------|------------------------------------|---|-----------------------------|
| | Jahre (nach Abb. 8, Tab. 1) | Skalierter Herfindahl-Index [1, 7] | Indikator ² 2006 | Indikator ² 2030 |
| Kupfer | 43 | 0,14 | 0,09 | 0,24 |
| Silber | 22 | 0,14 | 0,28 | 0,83 |
| Zinn | 19 | 0,18 | 0,57 | 0,71 |
| Gallium | 7230 ¹ | unbekannt | 0,18 | 3,97 |
| Indium | 24 | 0,59 | 0,40 | 3,29 |
| Germanium | 180 ¹ | unbekannt | 0,28 | 2,20 |
| Neodym | 220 | 0,23 | 0,23 | 1,66 |
| Platin | 195 | 0,63 | gering | 1,35 |
| Tantal | 204 | 0,55 | 0,40 | 1,02 |
| Kobalt | 77 | 0,19 | 0,21 | 0,43 |
| Palladium | 195 | 0,36 | 0,09 | 0,29 |
| Niob | 48 | 0,94 | 0,01 | 0,03 |
| Yttrium | 61 | 0,26 | 0 | 0,01 |
| Antimon | 11 | 0,34 | <0,01 | <0,01 |

¹ bezogen auf eine Reservenbasis von 564.000 t (Gallium) und 25.000 t (Germanium);
² Indikator des Rohstoffbedarfs für ausgewählte Zukunftstechnologien (Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien im Jahr 2006 bzw. 2030 geteilt durch die Rohstoffproduktion 2006)

nige Metalle, die gemeinhin als kritisch angesehen werden, liegt sie bei mehreren hundert Jahren (SE, PGE; Abbildung 8); in diesen Fällen sind die Vorräte durch einige gut erkundete Großlagerstätten gut bekannt. So enthalten die drei Platinhorizonte („Reefs“) des riesigen magmatischen Bushveld Komplexes in Südafrika 75 % der gesamten weltweiten Platin-Reserven, sowie 52 % der Palladium-, 82 %

ABB. 6 | RESERVEN DER METALLERZE



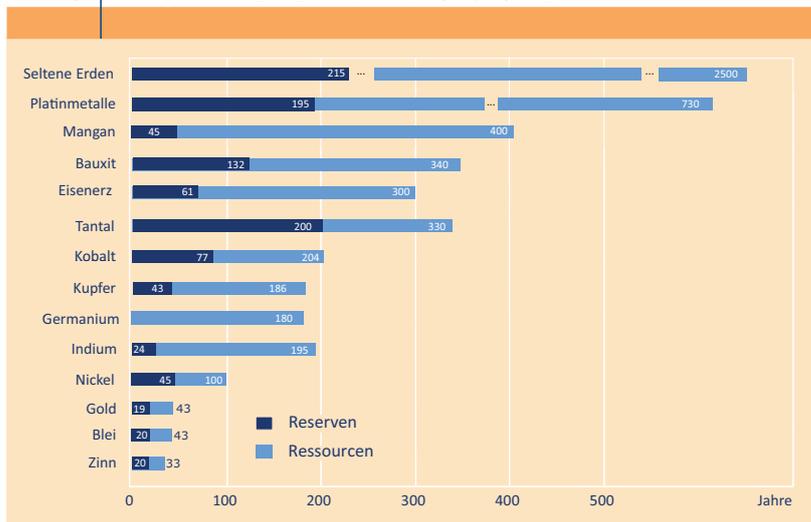
Die Verteilung der Reserven (nachgewiesen und wahrscheinlich) einiger wichtiger Metallerze. Die Grafik zeigt nur Länder, die über mindestens 50 % der Reserven eines bestimmten Rohstoffes verfügen.

ABB. 7 DEFINITIONEN



Definition von Reserven, Reservenbasis, Ressourcen und Potenzialen.

ABB. 8 REICHWEITE DER METALLROHSTOFFE



Die statische Reichweite für einige Metallrohstoffe bezogen auf die Reserven (dunkelblau) und Ressourcen (hellblau). Die Werte beziehen sich auf die vom USGS für 2011 publizierten Produktions- und Reservenangaben; für SE, Ta, Ge und In wurden andere Schätzungen verwendet [27].

der Rhodium- und 16 % der Nickelreserven [8]. Andere Metalle wie Indium und Germanium haben geringe Reichweiten, weil sie als Koppelprodukte nicht der Fokus von Rohstoffprospektion und Exploration sind und somit die Datenbasis der Reserven sehr schwach ist.

Berechnet man die Reichweiten von Rohstoffen aus historischen Produktionsdaten und zur jeweiligen Zeit verfügbaren Reservenabschätzungen, stellt man fest, dass sie über einen langen Zeitraum recht stabil bleiben. Ein klassisches Beispiel ist die Einschätzung des „Club of Rome“ aus dem Jahr 1972, dass die Erdölreserven in den 1990er Jahren aufgebraucht wären [9]. Seitdem betrug die Reichweite des Erdöls immer zwischen 30 und 50 Jahren [10]. Trotz eines signifikanten Anstiegs im Verbrauch und in der Jahresproduktion haben sich die theoretischen Reichweiten für Kupfer, Nickel, Kobalt und Indium nicht dramatisch verändert (Abbildung 9). Unter Experten besteht daher Einig-

keit, dass die „Reichweite“ keinen brauchbaren Indikator für die Kritikalität der Rohstoffversorgung darstellt, sondern eher als ein Hinweis zu verstehen ist, inwieweit sich die Industrie um die Aufsuchung neuer Reserven bemühen muss.

Der Bergbau in der Gegenwart und Vergangenheit führt zur Auserzung von gut erreichbaren und hochwertigen Lagerstätten, verbunden mit einer zunehmenden Verschlechterung der Qualität vieler Lagerstätten und einem größeren Aufwand ihrer Gewinnung. Dies betrifft abnehmende Erzgehalte, größere Abbauteufen, komplexere Erzzusammensetzungen, aber auch zunehmend Bergbau in entlegeneren oder ökologisch sensiblen Gebieten, verbunden mit höheren Kosten, größerem Energiebedarf und schlechteren Umweltbilanzen. Daher sind die Bemühungen um einen signifikanten Anteil der Rückgewinnung aus Schrotten, Altlasten und anderen Recyclingmaterialien ein wichtiger Beitrag zur Rohstoffversorgung und künftigen Versorgungssicherheit [6].

Indikatoren

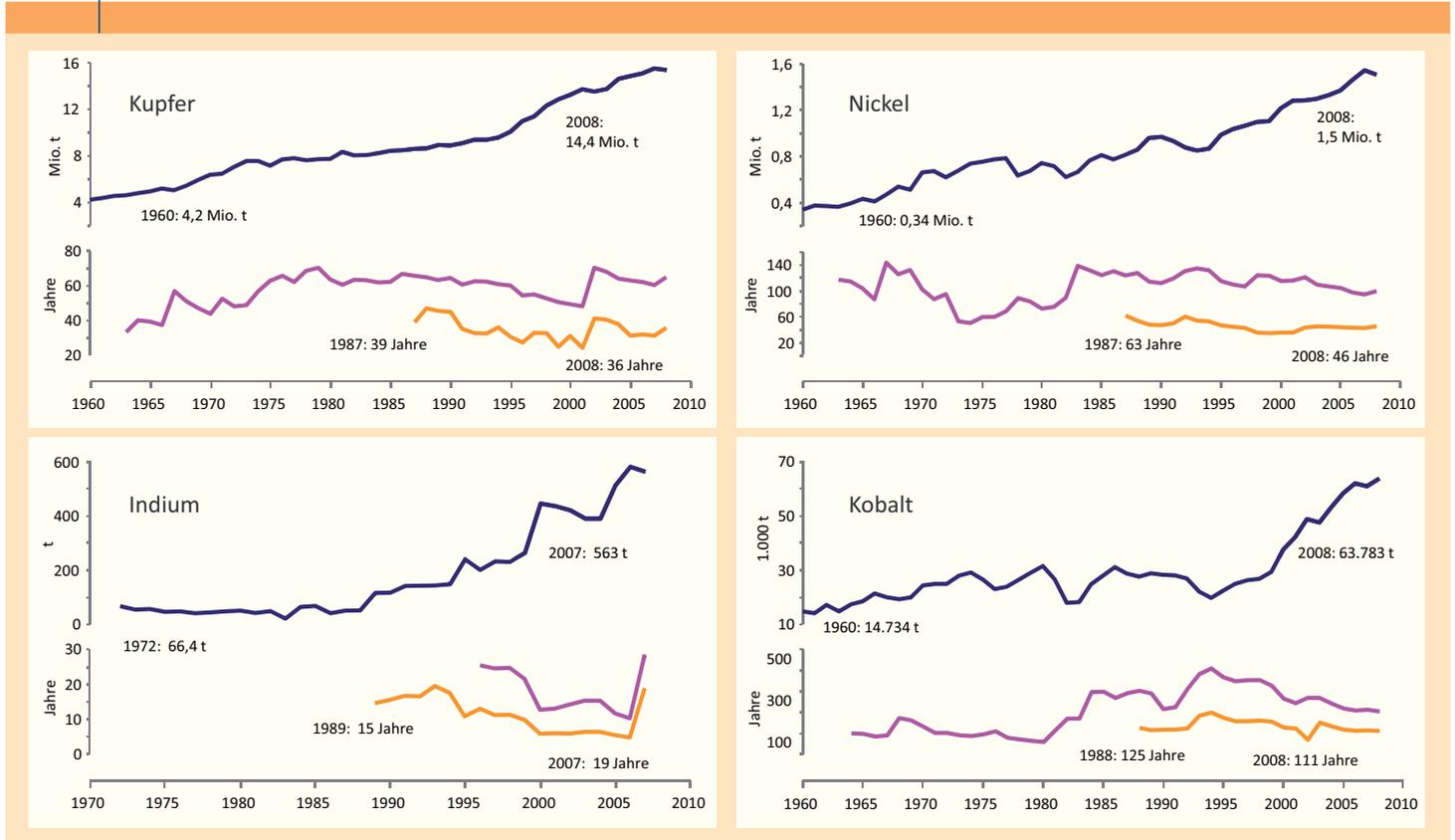
Die geologische Verfügbarkeit ist nur ein Parameter, der als Indikator für Versorgungs- und Lieferrisiken zu betrachten ist. Wir stellen hier beispielhaft ein System vor, in dem solche Risiken anhand der Betrachtung von sechs Parametern bewertet werden können (Abbildung 10):

1. Geologische Verfügbarkeit: bewertet werden können z.B. Reserven, Ressourcen, Reichweite der Vorräte oder Explorationsaufwand der Industrie
 2. Technische Verfügbarkeit: z.B. Angebots-/Nachfragesituation, Kapazitätsauslastung von Bergbau und Hütte, Transportinfrastruktur, Lagerbestände, Höhe der Produktionskosten
 3. Importabhängigkeit des Rohstoffs und Bedeutung für die Wertschöpfungskette
 4. Reaktionsvermögen der Nachfrage: Recycling, Substituierbarkeit, Materialeffizienz, eigene Rohstoffproduktion, Absicherungsstrategien
 5. Marktmacht: Länderkonzentration und Firmenkonzentration
 6. Geostrategische Risiken: Marktzugang und Länderrisiko, Angebotskonzentration, Umwelt und Sozialaspekte
- Für jeden Faktor können Grenzwerte (benchmarks) definiert werden, die das Risiko auf einer Skala von 1 bis 7 (von innen nach außen) in „entspannt“, „moderat“ oder „problematisch“ einteilen. Aus den Abschätzungen entsteht innerhalb des Hexagons ein Polygon, das die Kritikalität der Parameter explizit bewertet. Solche Indikatoren können für jeden Rohstoff, und beispielsweise für eine Firma oder für ein Land, modellhaft erstellt werden [11].

Seltene Erden: ein kritischer Rohstoff?

Alle Welt spricht von den Seltenen Erden (SE), von denen einige aus geologischer Sicht gar nicht so selten sind [12], denn die SE weisen die größten nachgewiesenen Vorräte und auch die höchste Verfügbarkeit aller Metalle auf (Ab-

ABB. 9 STATISCHE REICHWEITE VON METALLEN



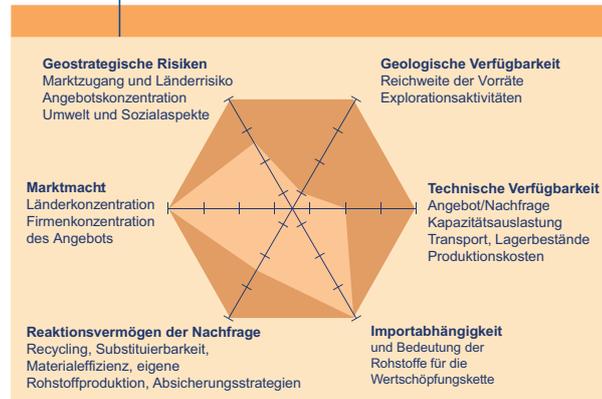
Die statische Reichweite einiger Metalle dargestellt über einen Zeitraum von 40–50 Jahren. Obwohl die Bergbauproduktion aller Metalle im untersuchten Zeitraum drastisch gestiegen ist (vervierfacht für Kupfer, Nickel, Kobalt; verachtstfacht für Indium), haben sich die Reichweiten – dargestellt bezogen auf die Reserven und die Reservenbasis – nicht wesentlich verändert. Blaue Kurven: Bergwerksförderung (Indium: Raffinadeproduktion); violett: statistische Lebensdauer der Reservenbasis; orange: statistische Lebensdauer der Reserven

bildung 8). Was macht sie so interessant? Die SE sind eine Gruppe von 15 Metallen mit den Ordnungszahlen 57 (Lanthan) bis 71 (Lutetium), die in vielen Produkten des täglichen Gebrauchs benötigt werden. Fallweise werden noch Yttrium (39) und Scandium (21) den SE zugerechnet. Die Gesamtjahresproduktion beträgt derzeit (2011) 130.000 Tonnen SE-Oxide (Abbildung 11). Die SE werden häufig als „grüne Metalle“ bezeichnet, denn etwa 40 % werden für Zukunftstechnologien wie Windkraftanlagen, Hybridfahrzeuge, E-Bikes, Katalysatoren und Energiesparlampen verwendet (Abbildung 12).

Die Konzentration der verschiedenen SE in Lagerstätten ist heterogen. In den meisten Fällen machen die „leichten SE“ (jene mit niedrigen Ordnungszahlen: Lanthan, Cer, Praseodym und Neodym) über 90 % aus. Die „schweren SE“ sind dagegen deutlich seltener: in der größten SE-Lagerstätte, Bayan Obo in China, liegt ihr Anteil nur bei 2,3 % [13]. Es sind aber gerade die schweren SE, die in „grünen“ Zukunftstechnologien zum Einsatz kommen werden, wie Dysprosium in Permanentmagneten für Windkraftanlagen, Wasserkraftwerke und Hybridmotoren, oder Gadolinium in FCKW-freien Kühlsystemen. Dysprosium macht am Ge-

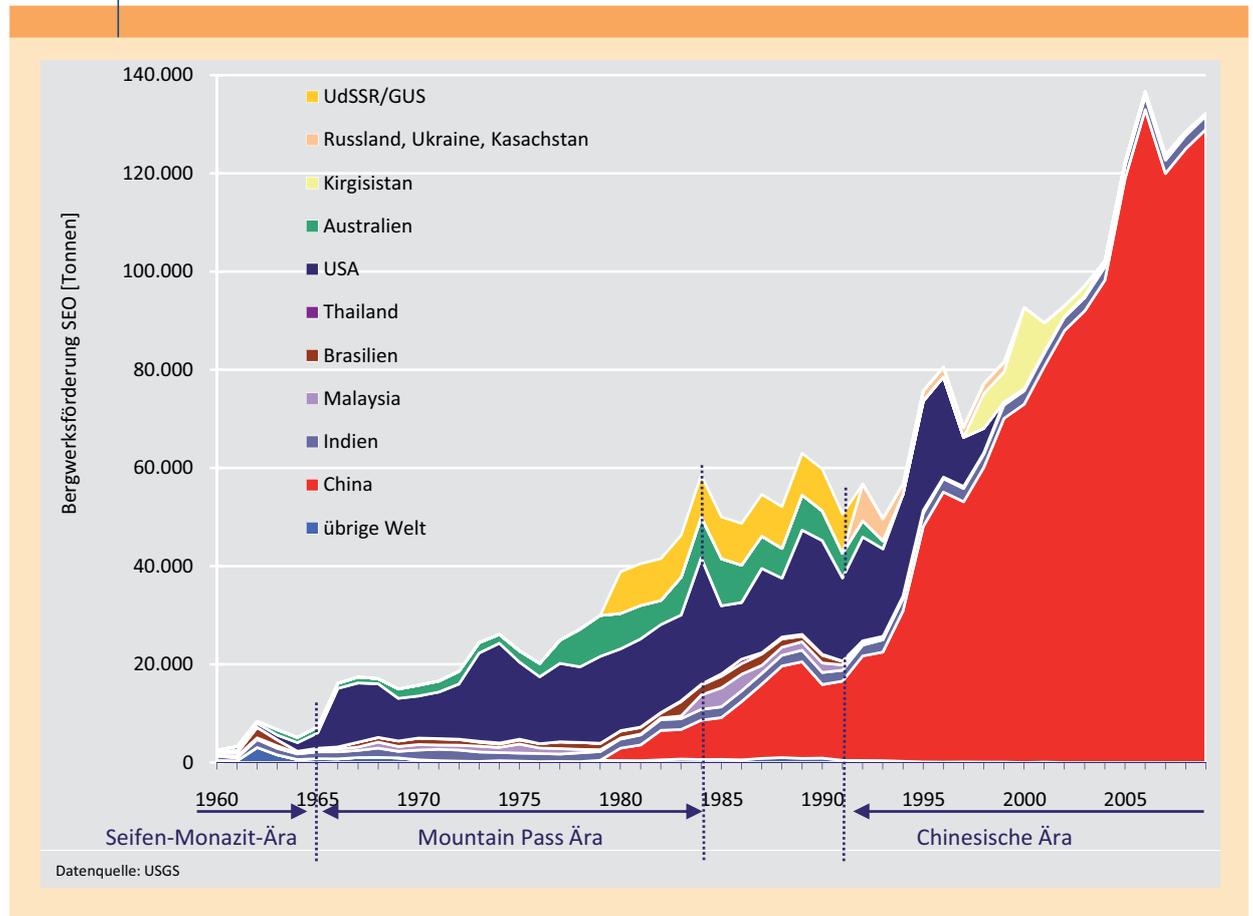
sambudget der SE in Lagerstätten oft nur einen kleinen Anteil aus, z.B. 0,1 % in der erwähnten Großlagerstätte Bayan Obo. Die prozentual reichsten Vorkommen der schweren SE sind die Ionenadsorptionstone in den südchinesischen

ABB. 10 VERSORUNGSSICHERHEIT



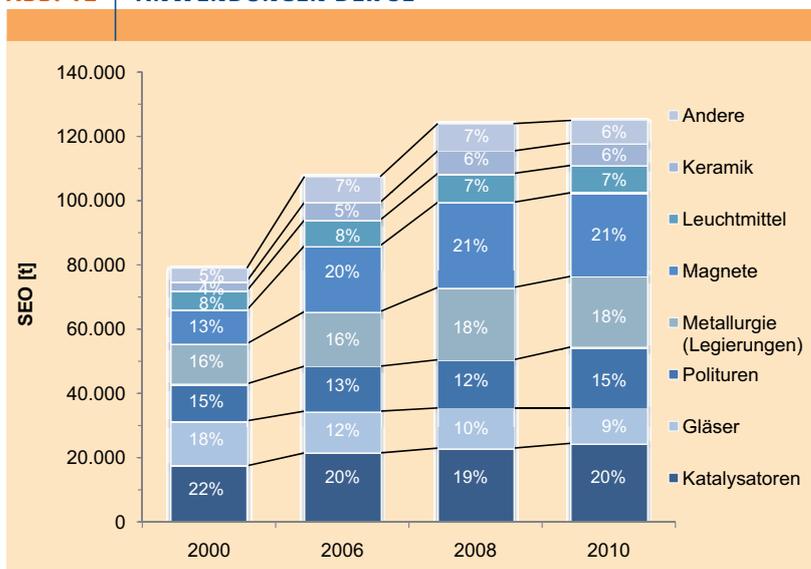
Die Abschätzung der Versorgungssicherheit kann mit Hilfe solcher Hexagramme anschaulich gemacht werden. Jede Achse bewertet einen rohstoffwirtschaftlichen Faktor.

ABB. 11 ENTWICKLUNG DER FÖRDERUNG BEI SELTENEN ERDEN



Die Bergwerksförderung der Seltenen Erden zeigt die Dominanz von China seit Mitte der 1990er Jahre. Vorher wurden signifikante Mengen auch außerhalb Chinas gefördert.

ABB. 12 ANWENDUNGEN DER SE



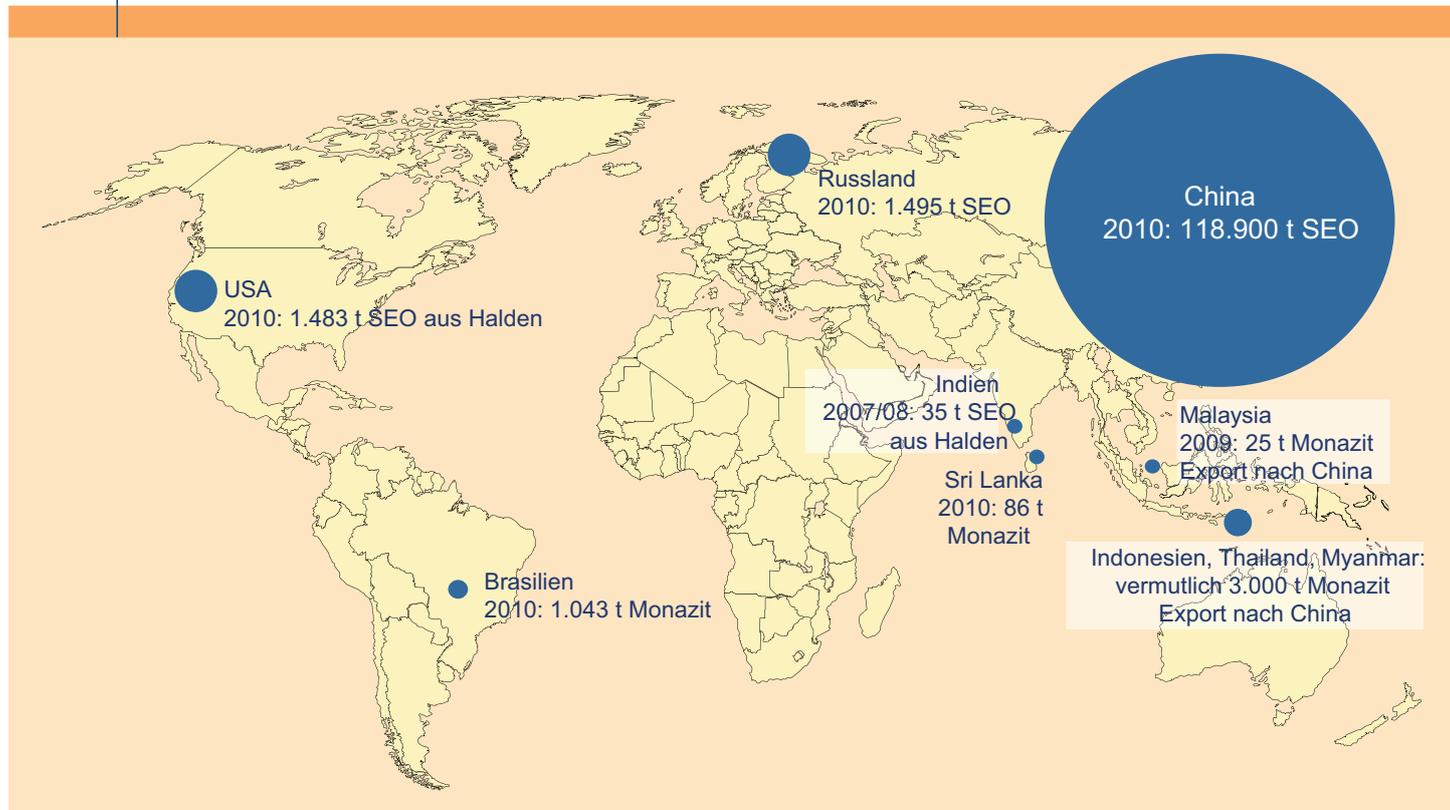
Die Seltenen Erden finden in vielen Technologien Verwendung. Die Grafik zeigt die Entwicklung in den Anwendungen seit 2000. Überproportionale Zuwachsraten finden sich vor allem im Bereich der Magnete.

Provinzen Jiangxi, Hunan, Fujian, Guangdong und Guangxi, die in ihrem SE-Budget bis zu 62 % Yttrium [14] und 7 % Dysprosium enthalten.

Der zukünftige Bedarf der SE wurde am Beispiel des Neodyms abgeschätzt: im Jahr 2030 werden etwa 27.900 Tonnen Neodym benötigt, was einer Steigerung der derzeitigen Jahresproduktion um 166 % (2006: 16.800 t) entspricht (vgl. Tabelle 3). Neodym ist unverzichtbarer Bestandteil in hochwirksamen Magneten wie sie in Kernspintomographen, Mikromotoren, Computerfestplatten und Dauermagnet-Rotoren, z.B. in permanent erregten Gleichstrommaschinen zum Antrieb von Elektro- und Hybridfahrzeugen, Verwendung finden (Abbildung 12). Neodymsalze und -oxide werden zudem zum Färben von Emaillen, Porzellan und Glas eingesetzt. Das Element ist weiterhin Bestandteil des industriell weitverbreiteten Neodym-dotierten Yttrium-Aluminium-Granat-Lasers zum Bohren, Schweißen und Schneiden von Metallen [12, 15].

Die beiden wichtigsten Minerale, aus denen Neodym und andere SE kommerziell gewonnen werden, sind das Phosphat Monazit (Ce,La,Nd,Th)[PO₄] und das Fluorcarbonat Bastnäsit (Ce,Y,La)(CO₃)F. Monazit wird akzessorisch (in

ABB. 13 | HEUTIGE BERGWERKSPRODUKTION VON SELTENEN ERDEN



Die Bergwerksproduktion an SE für 2010. China ist mit 97,5 % das bei weitem größte Bergbauland für SE, gefolgt von den USA, Russland und Indien.

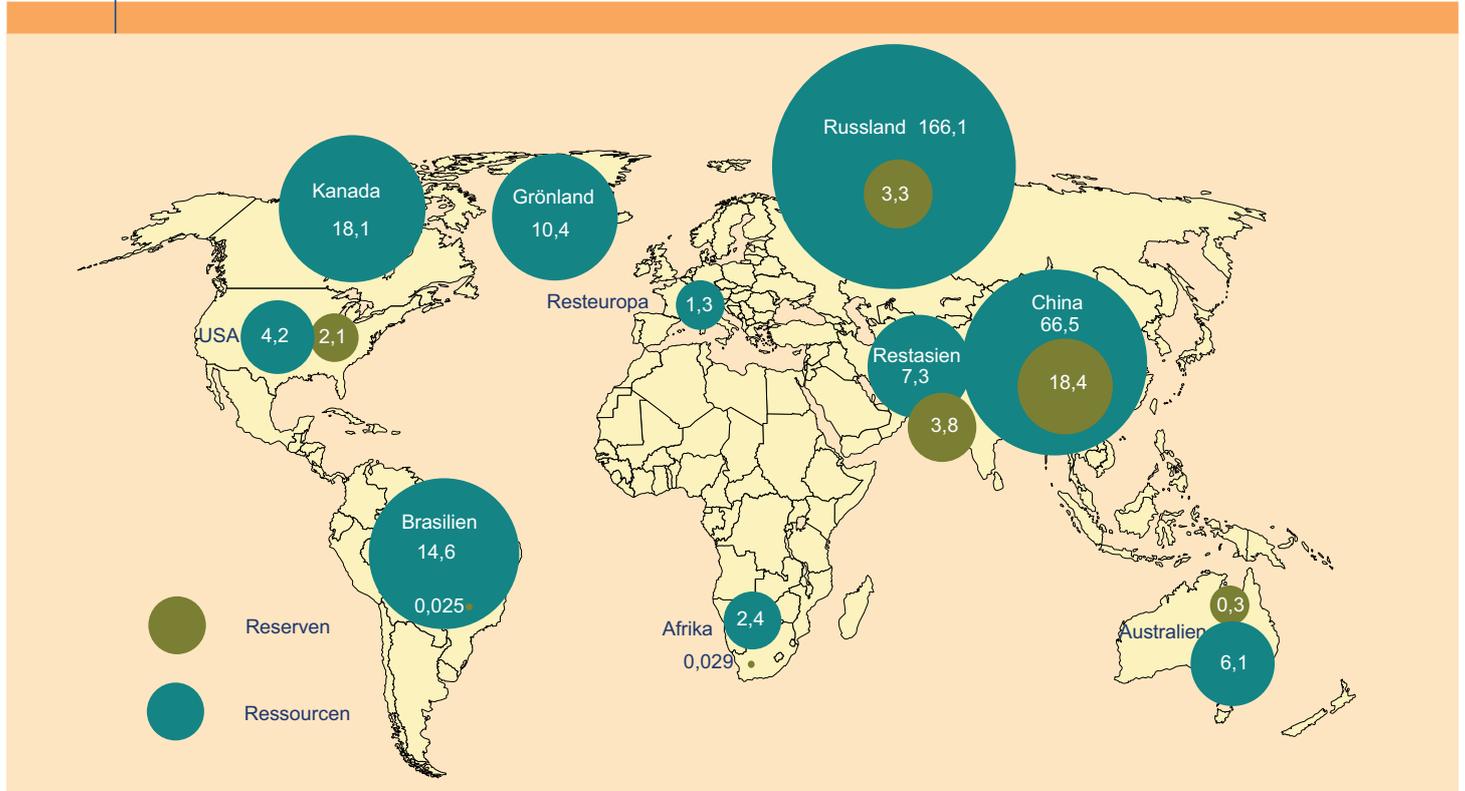
geringen Konzentrationen) und als kleine Körner (<1 mm) in vielen Gesteinen, beispielsweise in Graniten und metamorphen Gesteinen, gefunden. Anreicherungen von Monazit treten vor allem in Seifen [16] auf. Monazit ist radioaktiv, da er oft zwischen 1 und 27 % ThO₂ und bis zu 0,8 % UO₂ enthält [12]. Aufgrund der mit dieser Radioaktivität verbundenen Umweltproblematik wird Monazit seit vielen Jahren nicht mehr als wichtiges Wertmineral betrachtet und daher in fast allen Schwermineralgewinnungsbetrieben weltweit – mit Ausnahme Indiens, Malaysias und Brasiliens – aufgehaldet oder verworfen. Bastnäsit wird vor allem in carbonatreichen und alkalireichen magmatischen Gesteinen (sogenannten Karbonatiten und Alkaligesteinen) gebildet, die sich unter sehr extremen Bedingungen aus Schmelzen des Erdmantels ableiten lassen. Bastnäsit-führende Gesteine sind wesentlich seltener als Monazit-führende, und Seifenvorkommen existieren aufgrund der mechanischen Eigenschaften und chemischen Reaktivität des Minerals nicht. Bastnäsit wird daher durch Bergbau aus primären Vorkommen gewonnen.

Die SE werden seit 15 Jahren vor allem in China gefördert – man spricht von einer „chinesischen Ära“, die eine von 1965 bis 1985 andauernde „Mountain Pass-Ära“ ablöste (Abbildung 11). Bis in die 90er Jahre des vorigen Jahrhunderts lieferten die USA mit der Lagerstätte Mountain Pass, Russland (Lovozero) und Australien signifikante Mengen, aber heute produziert China 97 % der SE. Das hat na-

türlich geostrategische Auswirkungen, vor allem nachdem China aufgrund eines aufkommenden Umweltbewusstseins die Produktion gedrosselt und durch seinen Eigenbedarf Exportquoten auf SE-Produkte erlassen hat. Der Rest der heutigen Produktion kommt aus den USA, Russland und Indien (Abbildung 13). China hält auch 66,5 % der Reserven, aber nur 18 % der SE Ressourcen (Abbildung 14). Derzeit herrscht Hochkonjunktur im SE-Bergbausektor, und die ersten dieser Vorhaben werden in Kürze in Produktion gehen (Mount Weld/Australien, Wiederaufnahme Mountain Pass/USA) (Abbildung 15). Dies wird zu einer deutlichen Entspannung des Marktes für leichte SE beitragen und mittelfristig die dominante Stellung Chinas brechen. Unter Berücksichtigung der bekannten Projekte werden bis zum Jahr 2030 durch Bemühungen der Rohstoffgewinnenden Industrie zusätzlich maximal ca. 30.000 t Neodymoxid jährlich für den Weltmarkt zur Verfügung stehen. Durch den überproportional wachsenden Bedarf könnte das Angebot an schweren SE trotzdem noch unzureichend sein [13].

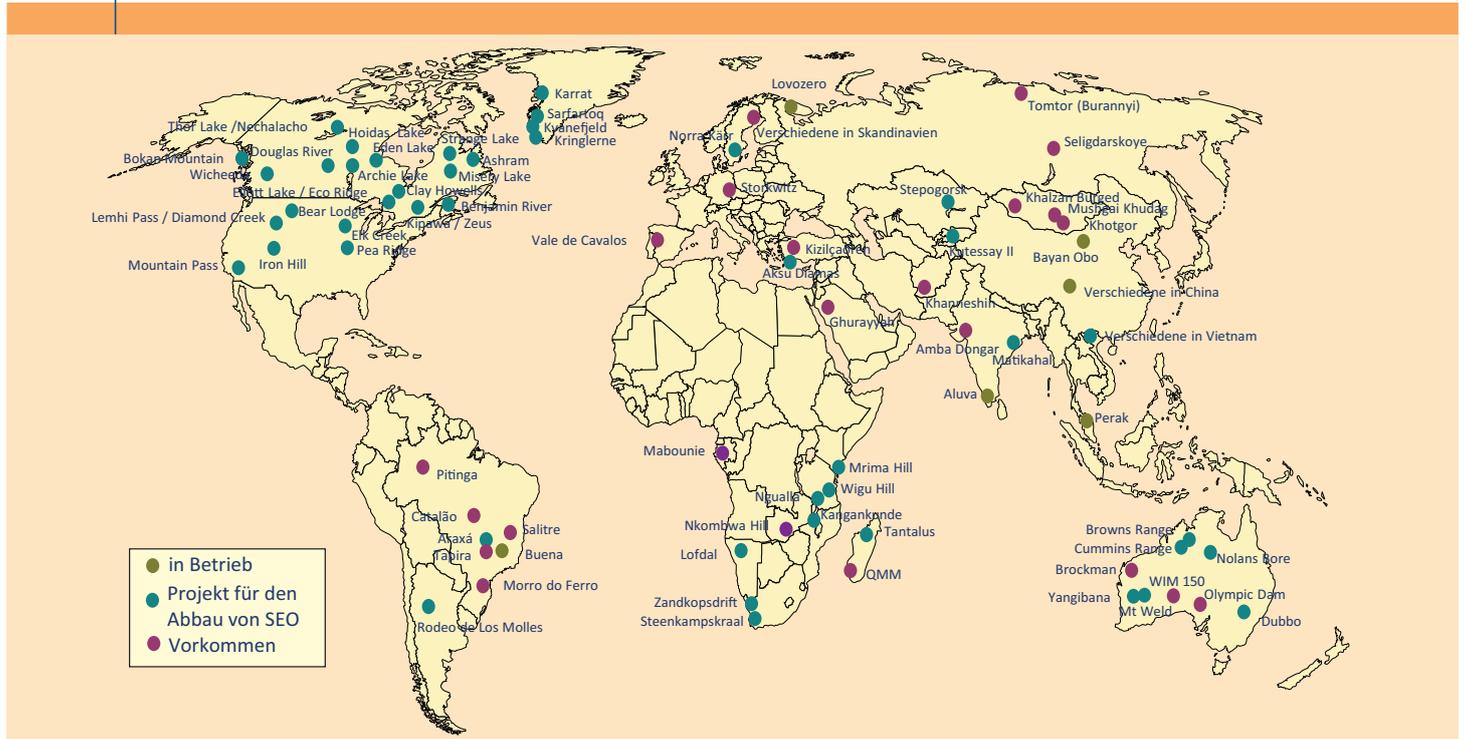
Wie sieht es mit dem Potenzial an SE in Europa aus? Derzeit werden nur aus der Niob-Tantal-Lagerstätte Lovozero auf der Kola-Halbinsel im nördlichen Russland SE gewonnen. Die Ausbeute liegt bei 1500 bis 1700 Tonnen SE-Carbonat pro Jahr. Mit Norra Kärr in Schweden wurde durch die kanadische Firma Tasman Metals ein Vorkommen exploriert, das reich an schweren SE ist. Die Vorräte betragen 327.000 Tonnen SE-Oxide, die Jahresförderung könnte

ABB. 14 | RESERVEN UND RESSOURCEN DER SELTENEN ERDEN



Die Situation der SE-Reserven und Ressourcen (Werte in Millionen Tonnen SE-Oxide; Stand: Mai 2012). Bei einer Jahresproduktion von 130.000 t SEO würden die Reserven fast 220 Jahre reichen.

ABB. 15 | PERSPEKTIVE DER PRODUKTION VON SELTENEN ERDEN



Auswahl von aktuellen Bergwerken, Projekten und Vorkommen von SE. Im Mai 2012 waren 429 Projekte in 37 Ländern bekannt, die durch 261 Firmen bearbeitet wurden.

bei 7000 Tonnen SE-Mischkonzentrat liegen. In der Nähe von Leipzig erkundet die Deutsche Rohstoff AG derzeit das schon aus DDR-Zeiten bekannte, tiefliegende Karbonatit-Vorkommen Storkwitz durch Bohrungen, das nach derzeitigem Wissen über 38.000 Tonnen SE sowie 8000 Tonnen Niob enthält. Bereits außerhalb Europas und recht abgelegen, dafür aber gigantisch groß, ist das Vorkommen von Kvanefjeld an der Westküste Grönlands mit einer Ressource von 6,55 Millionen Tonnen SE-Oxiden [17].

Germanium: ein typisches Koppelprodukt

Germanium (Ge) ist ein Halbmetall mit grauweißer, metallisch glänzender Farbe und Halbleitereigenschaften. Seine mittlere Krustenhäufigkeit ist sehr niedrig (etwa 1,4 ppm; Tabelle 1). Anreicherungsprozesse zu bauwürdigen Lagerstätten fanden in der Erdgeschichte nur sporadisch statt. So findet sich Germanium in polymetallischen (Zink-Blei ± Kupfer) Sulfidlagerstätten, meist substituiert im Gitter von Zink- und Kupfersulfiden, sowie in Kohlen, wo Germanium an die organische Substanz gebunden ist. Flugaschen aus der Kohleverbrennung enthalten teilweise wirtschaftlich interessante Germaniumkonzentrationen.

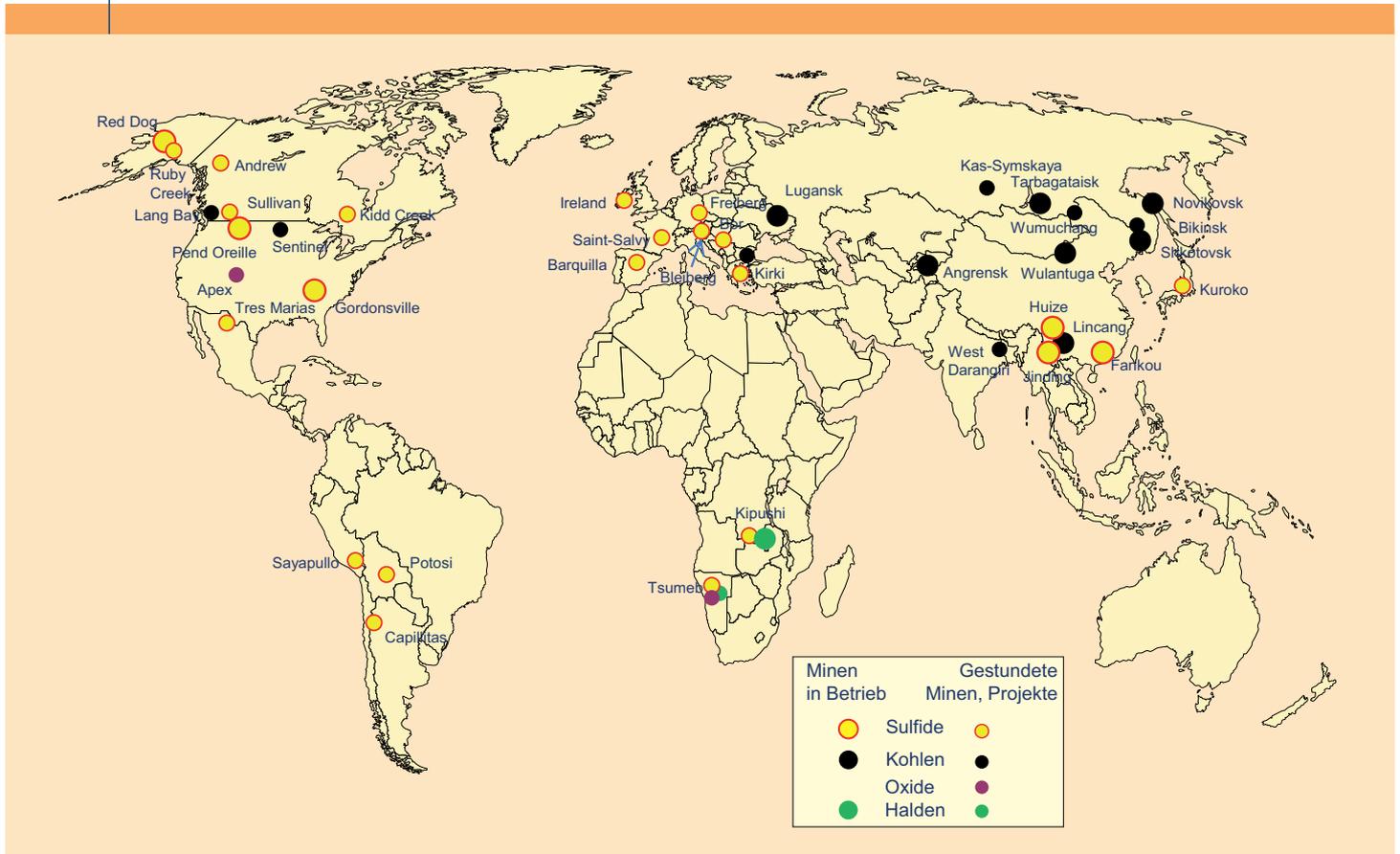
Auch bei Germanium führt China die Produktionsstatistik mit 71 % von jährlich etwa 140 Tonnen Raffinade-



Abb. 17 Der „Big Hill“ von Lubumbashi in Katanga (Demokratische Republik Kongo). Die Halde mit 15 Millionen Tonnen Inhalt ist eine potenzielle Germaniumquelle. Die Schlacken aus der Kupfer- und Zinkproduktion stammen aus der Verhüttung Ge-reicher Sulfiderze (z.B. der Lagerstätte Kipushi). Sie werden seit über 10 Jahren zur Gewinnung von Kobalt, Zink und Kupfer in der Fabrik der GTL (Groupement de Terril de Lubumbashi; rechtes Bild) genutzt.

produktion an und hat die größten ausgewiesenen Reserven (über 3000 Tonnen). 30 Prozent des primären Germaniums werden derzeit aus Kohlen in China, Sibirien und der Ukraine gewonnen. Allerdings ist nur wenig über die globale Reservensituation bekannt und es gibt kaum Prospektionsaktivitäten auf Germanium außerhalb Chinas (Abbildung 16) [18].

ABB. 16 | PRODUKTIONSSTÄTTEN VON GERMANIUM



Auswahl von aktuellen Bergwerken, Projekten und Vorkommen von Germanium.

Das Metall könnte allerdings aus vielen, auch Germanium-armen Sulfid-Lagerstätten als Beiprodukt gewonnen werden. In der Vergangenheit wurde Germanium bei der Verhüttung von Kupfer-Zink-Erzen in Schlacken angereichert. Mit 15 Millionen Tonnen Schlacken ist der „Big Hill“ von Lubumbashi in der Demokratischen Republik Kongo somit eine potenzielle Germaniumquelle: seit fast 10 Jahren werden hier bereits Kupfer, Kobalt und Zink extrahiert (Abbildung 17). Die Vorräte sind sehr groß; ähnliche Vorkommen gibt es zum Beispiel auch in Tsumeb/Namibia.

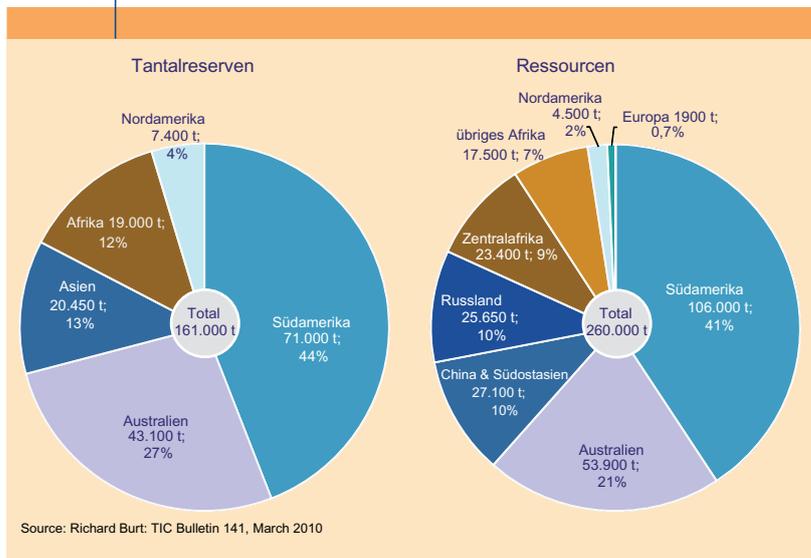
Germanium wird in einem komplexen mehrstufigen Prozess aus Konzentraten und Produktionsabfällen gewonnen. „End-of-life“-Recycling von Germanium findet derzeit kaum statt. Verschiedene Verbindungen und Qualitäten können in Endprodukten eingesetzt werden, allerdings ist die Endstufe (hochreines Einkristall-Germanium) am gefragtesten. Der Verbrauch konzentriert sich auf die glasfaseroptischen Systeme (30 %), Infrarotnachtsichtsysteme (25 %), Katalysatoren für die Kunststoffherstellung (PET, 25 %) und verschiedene Anwendungen in der Elektronikindustrie. Dort wird Germanium in Leuchtdioden und in Solarzellen als Substrat von komplexen Dünnschicht-Verbindungen benötigt (Tabelle 2).

Bis zum Jahr 2030 wird ein hoher Germaniumbedarf für Zukunftstechnologien mit jährlichen Steigerungsraten von 8,6 % prognostiziert [7]. Dies betrifft vor allem glasfaseroptische Systeme: im Jahr 2006 wurden 89 Millionen Kilometer Glasfaserkabel installiert, die etwa 0,3 Gramm Germaniumdioxid pro Kilometer Kabellänge enthalten. Dies ergibt einen Bedarf von fast 30 Tonnen Germanium oder 28 % der Weltproduktion; bis 2030 soll er auf 220 bis 540 Tonnen steigen, entsprechend 700 bis 1700 Millionen Kilometern neuerlegter Glasfaserkabeln (Tabelle 3) [7]. Dieser Bedarf könnte bei maximaler Auslastung aller Kapazitäten und Potenziale möglicherweise gerade noch abgedeckt werden [18].

Die aktuelle Situation der Bergbauproduktion in nur wenigen Ländern (im Wesentlichen China, USA, Ukraine und Russland) ist nicht befriedigend; es existiert ein erhöhtes Länder- und damit Lieferisiko. Zudem ist China an den US-amerikanischen Sulfid-Lagerstätten Red Dog und Pend Oreille finanziell beteiligt. Aufgrund dieser für den deutschen Markt nicht zufriedenstellenden Versorgungssituation könnte langfristig ein deutlicher Preisanstieg für Germanium drohen. Trotzdem ist die Versorgung mit Germanium mittelfristig und langfristig nicht gefährdet, da genügend Reserven außerhalb Chinas existieren und Zink als Hauptprodukt auch zukünftig in großen Mengen benötigt wird. Damit werden auch weiterhin Germanium-führende Vorkonzentrate zur Verfügung stehen, aus denen bei Ausbau der Hüttenkapazitäten entsprechend größere Mengen seltener Metalle produziert werden können.

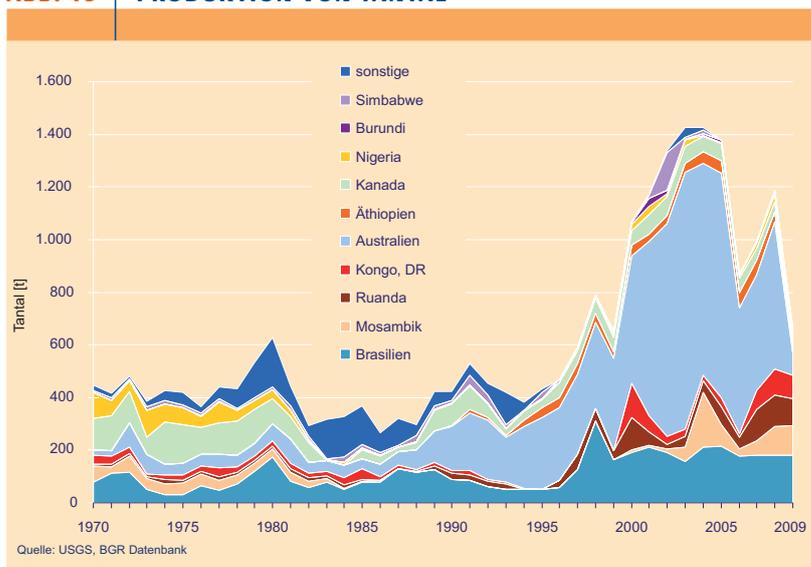
In Europa wird derzeit kein Germanium aus einheimischen Primärerzen erzeugt; allerdings ist die Gewinnung aus Produktionsabfällen bedeutend. In der Vergangenheit waren Frankreich, Österreich und Spanien bedeutende Lieferanten von Germaniumkonzentrat aus Sulfiderzen. Potenziale gibt es noch in Zink-Blei-Lagerstätten in Carbonatgesteinen, beispielsweise in den Ost- und Südalpen, sowie im Kupferschiefer Mitteleuropas. Die Gewinnung aus Kohle spielt in Europa derzeit, mit Ausnahme der Ukraine, keine Rolle.

ABB. 18 | TANTALVORKOMMEN



Die weltweiten Tantalreserven und -ressourcen [27]

ABB. 19 | PRODUKTION VON TANTAL



Die weltweite Bergwerksproduktion für Tantal (als Metall, in Tonnen) zeigt einen sprunghaften Verbrauch und einen markanten Anstieg Ende der 90er Jahre. Australien und Brasilien lieferten die Hauptmenge der Tantalkonzentrate. Seit 2009 hat sich die Produktion aus Australien und Kanada deutlich verringert, und afrikanische Lieferanten gewinnen an Einfluss.

Tantal: ein möglicher Konfliktrohstoff (geostrategisches Risiko)

Tantal (Ta) ist ein wichtiger Rohstoff für sehr kleine Kondensatoren mit hohen Kapazitäten, den Elektrolytkonden-

satoren (Elkos), die derzeit etwa 60 % des Tantalverbrauchs ausmachen. Elkos kommen in der Fahrzeugelektronik, Laptop-Computern, Mobiltelefonen und Digitalkameras zum Einsatz. In der Zukunft wird ein Zuwachs tantalbasierter Kondensatoren vor allem in der Raumfahrt- und Luftfahrtindustrie prognostiziert. Tantal-Pulver mit nanoskaligen Primärteilchen ermöglichen Kondensatoren, deren elektrisches Speichervermögen zwei- bis dreifach höher ist als das derzeitige erreichbare.

Ein erbitterter Kampf um Rohstoffpreise führte in jüngster Zeit zu erheblichen Anstrengungen, Tantal in der Kondensatorenherstellung zu substituieren; dabei sind Niob, Aluminium und keramikbasierte Produkte als potenzielle Ersatzstoffe zu nennen. Weitere Verwendung finden Tantalprodukte als Tantalcarbide in der chemischen und als Superlegierungen in der metallurgischen Industrie. Tantalpentoxid Ta_2O_5 wird zur Herstellung hochlichtbrechender Gläser und spezieller Kristallmaterialien verwendet. Da das Metall ungiftig und gegen Körperflüssigkeiten inert ist, wird es auch für Implantate eingesetzt.

Tantal ist ein duktiles, graphitgraues, glänzendes Übergangsmetall mit hohem Schmelzpunkt ($3017\text{ }^\circ\text{C}$). In der Erdkruste ist es ein seltenes Element ($<1\text{ ppm}$) und tritt in wirtschaftlich interessanten Konzentrationen (etwa $>0,02\text{ \% Ta}_2\text{O}_5$) in spezialisierten, Selten-Element-Graniten und deren grobkörnigen Restdifferenten, den Pegmatiten, sowie in manchen Alkaligesteinen und Karbonatiten auf. In diesen Gesteinen findet sich Tantal häufig gemeinsam mit Niob, Zinn, Scandium, Uran und Seltenen Erdelementen. Wichtigste Tantalminerale sind die Glieder der Columbit-Tantalitreihe $(\text{Fe,Mn})(\text{Nb,Ta})_2\text{O}_6$, gefolgt von Tapolit FeTa_2O_6 , Wodginit $(\text{Mn,Fe})(\text{Sn,Ti})(\text{Ta,Nb})_2\text{O}_8$ und Mikrolith $\text{Ca}_2\text{Ta}_2\text{O}_6(\text{O,OH,F})$.

Die größten Tantalpotenziale werden in Westaustralien, Brasilien und der DR Kongo vermutet (Abbildung 18). Die primäre Bergbauproduktion von etwa $1900\text{ t Ta}_2\text{O}_5$ wurde bis 2009 zu über 75 % durch Australien (50–60 %), Brasilien (20 %) und Kanada (5 %) gedeckt. Seit einem rapiden und unerwarteten Preisanstieg im Jahr 2000 stellen afrikanische Länder zunehmend größere Kontingente an tantalhaltigen Konzentraten zur Verfügung (Abbildung 19). Mit Abu Dabab und Nuweibi in Ägypten, Upper Fir in British Columbia (Kanada), Crevier (Quebec, Kanada) und Kanyika (Malawi) sollen bedeutende Tantal-Niob-Projekte in naher Zukunft in Produktion gehen [19]. Weitere fortgeschrittene Explorationsobjekte finden sich in Grönland, Saudi-Arabien, China, Brasilien und Mosambik. In Europa ist das Tantalpotenzial klein; derzeit wird Tantalkonzentrat nur aus dem Niob-Erz der Grube Lovozero in Russland erzeugt. Kleinere Vorkommen von Tantalergängen gibt es jedoch in vielen EU-Ländern, beispielsweise in Portugal, Spanien, und Finnland.

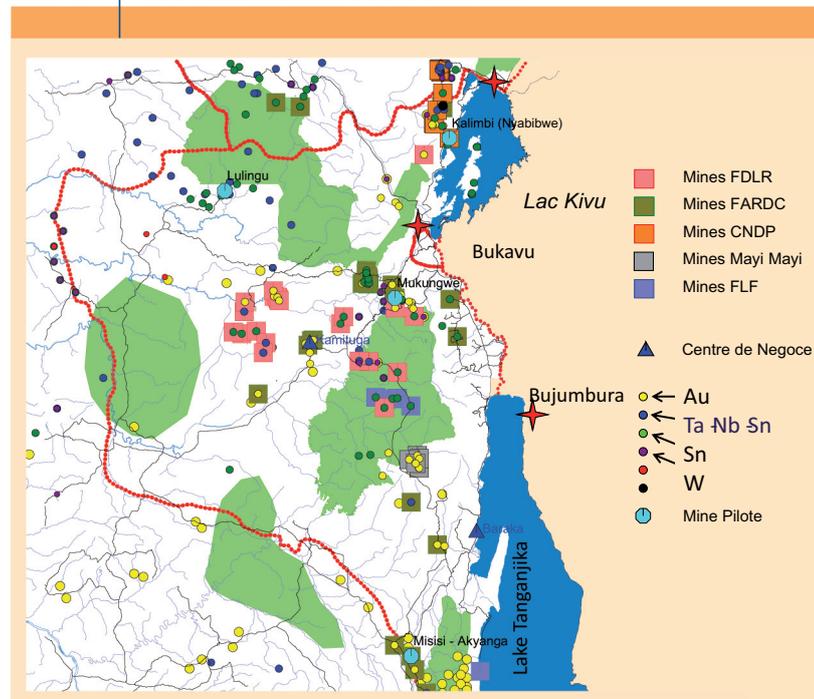
Weder die Reservensituation noch die Verfügbarkeit geben beim Tantal Anlass zur Sorge: hier ist es der hohe Anteil an Importen aus Zentral- und Ostafrika, im speziellen der DR Kongo, der in Verbindung mit dem 2010 in Kraft getretenen US-amerikanischen Dodd-Frank Act (Section 1502)

zu einem geostrategischen Risiko führt [20]. Bedingt durch den Rückzug mehrerer wichtiger Bergbauproduzenten in Kanada und Australien haben afrikanische Produzenten seit 2009 die Hauptmenge der Tantalergänge gewonnen (Abbildung 19). Ein wesentlicher Teil stammt aus artisanal betriebenen Minen im Kongo, unter anderem auch aus Konfliktgebieten in den Provinzen Süd- und Nord-Kivu im Osten des Landes (Abbildung 20). Dort herrschen bereits seit zwei Jahrzehnten Gewalt und Anarchie zwischen verschiedenen bewaffneten Gruppen, denen der kongolesische Staat bisher nicht wirkungsvoll entgegenzutreten konnte. Abgebaute Rohstoffe aus der Region werden hier z. T. für die Finanzierung der Konflikte verwendet („Konfliktrohstoffe“).

Trotz der Präsenz der UN (MONUSCO) und verschiedener staatlicher Maßnahmen bleibt die Region unsicher. Daher etablieren sich in der Region der Großen Seen derzeit verschiedene wirtschaftliche und politische Maßnahmen zur Rohstoffzertifizierung [21]. Eine wichtige Säule der regionalen Zertifizierung ist ein wirksamer und unbestechlicher Herkunftsnachweis für die Rohstoffe. Sowohl die Zivilgesellschaft, vertreten durch viele international tätige Organisationen (NGOs), als auch die Importeure und Verarbeiter von Erzkonzentraten und die Endverbraucher von raffinierten Metallen verlangen nach mehr Transparenz im afrikanischen Rohstoffsektor. Niemand möchte mehr mit

Artisanaler Bergbau ist manuell betriebener Kleinbergbau ohne gesicherte Standards, Umweltmanagement, oder sozialer Sicherheit.

ABB. 20 | TANTALMINEN IN DER DR KONGO



Die Karte der Provinz Süd-Kivu im Osten der DR Kongo zeigt die Lage einer Vielzahl von artisanal betriebenen Minen auf Gold, Ta, Nb, Sn und W (farbige Kreise). Viele der Minen wurden zum Zeitpunkt der Aufnahme der Karte von bewaffneten Gruppen kontrolliert, was durch farbige Quadrate signalisiert wird. Dargestellt sind auch die Lokalisationen der drei von der BGR und der kongolesischen Regierung auditierten Pilotminen, sowie der im Aufbau befindlichen Handelszentren für Rohstoffe („Centres de negoce“).

illegalem Bergbau, Kinderarbeit und Konfliktmineralen in Verbindung gebracht werden.

Die Bundesregierung ist über das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) mit den Durchführungsorganisationen der GIZ und der BGR in der Region vertreten. Es werden sowohl nationale als auch internationale Maßnahmen zur regionalen Rohstoffzertifizierung unterstützt. Die BGR hat beispielsweise einen analytischen Herkunftsnachweis für Tantal-, Zinn- und Wolframerze entwickelt [22]. Die Methode ermöglicht es, auf der Basis von an „Vaterproben“ bestimmten mineralogischen und chemischen Parametern (Spuren-

elementkonzentrationen, Bildungsalter), die Herkunft von gehandelten Erzkonzentraten zu überprüfen. Ziel ist es, illegal abgebaute oder gehandelte, sowie aus Konfliktregionen stammende Minerale vom Markt zu nehmen, den legalen Akteuren jedoch einen Marktzugang zu ermöglichen. Derzeit wird ein Labor zur Herkunftsbestimmung in der Region aufgebaut. Diese Maßnahme flankiert die Unterstützung eines regionalen Zertifizierungssystems für mineralische Rohstoffe in der Region der Großen Seen.

„Unkonventionelle Lagerstätten“

Viele kritische Rohstoffe könnten als Nebenelemente zukünftig aus submarinen Lagerstätten gewonnen werden. Beispielsweise enthalten Manganknollen, die in 3000–5000 m Wassertiefe im Pazifik und Indik vor allem entlang des Äquators liegen, Elemente wie Co, Ni, Cu, Zn, Ce, Mo, Li u.a. (Abbildung 21, 22). In marinen Massivsulfiden, die sich entlang der aktiven mittelozeanischen Rücken ständig neu bilden, sind nach Schätzungen konservativ 1 Milliarde bis (möglicherweise) 530 Milliarden Tonnen Kupfer und Zink enthalten, also bis zu 600 mal mehr als in landgebundenen Massivsulfid-Vorkommen [23].

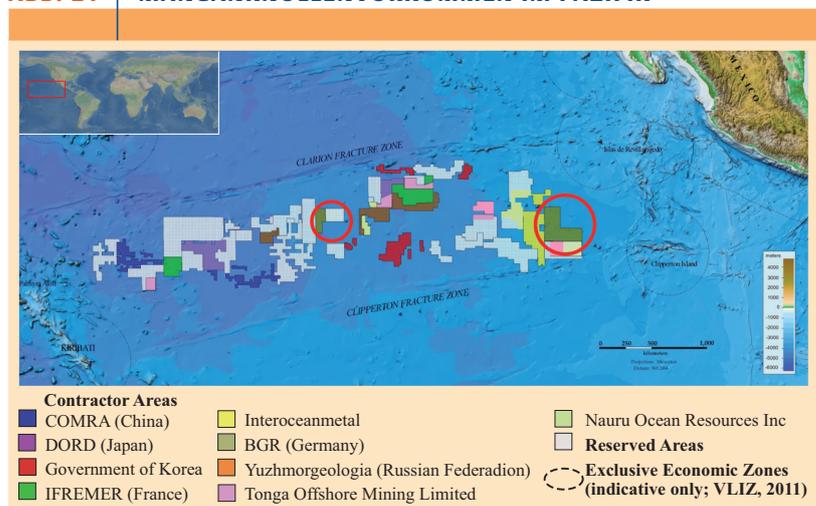
Die BGR erforscht derzeit im Auftrag der Bundesregierung und der internationalen Meeresbodenbehörde ein 75.000 km² großes Lizenzgebiet im zentralen Pazifik mit dem Ziel, Manganknollen in Zukunft wirtschaftlich abbauen zu können. Außerdem werden Areale im Indischen Ozean auf das Vorhandensein von Massivsulfiden mit Kupfer, Zink und anderen Metallen untersucht. Die ökologischen Auswirkungen der Rohstoffgewinnung aus marinen Lagerstätten müssen im Vorfeld detailliert untersucht und entsprechend minimiert werden.

Auch an Land gibt es „unkonventionelle Lagerstätten“, nämlich solche, die in Gesteinen angereichert sind, in denen sie gemeinhin nicht als Wertstoffe angesehen werden. Beispiele sind die oxidierten Platinerze der subtropischen und tropischen Klimazonen, oder Anreicherungen von Nickel, Kobalt, Platin und Palladium in Lateritböden. Für viele dieser Anreicherungen müssen neue oder verbesserte Aufbereitungstechnologien entwickelt werden, um die Vorkommen in kommerziell nutzbare Reserven umzuwandeln. Auch heiße (hydrothermale) Lösungen oder Solen können Hochtechnologie-Metalle enthalten, und sogar aus Meerwasser könnten Metalle extrahiert werden, sobald ökonomische Verfahren verfügbar sind.

Fazit

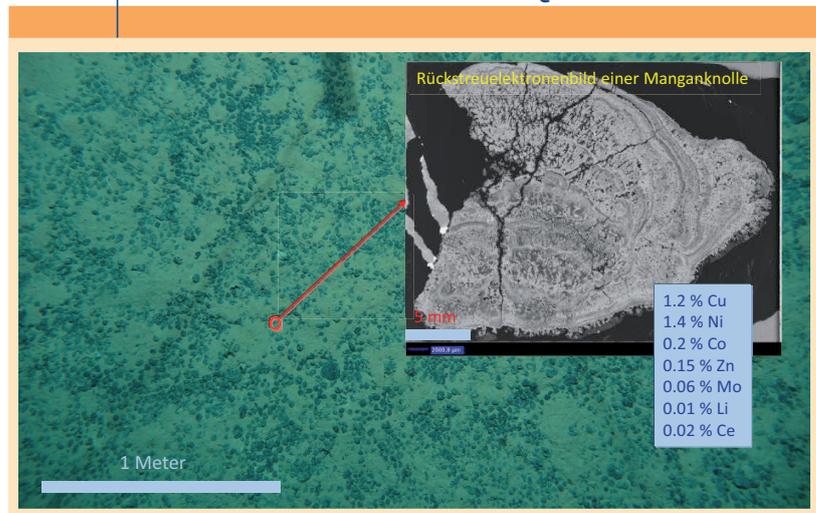
Für viele Zukunftstechnologien und „grüne“ Technologien werden seltene Metalle benötigt, die zum überwiegenden Teil aus mineralischen Rohstoffen gewonnen werden. Die Gewinnung als Koppelprodukt von häufigeren Rohstoffen (Kupfer, Zink, Aluminium) und komplexe Aufbereitungsprozesse bedingen Angebotsgrenzen für einige dieser Metalle. Bis auf die Edelmetalle (PGE) spielt das Recycling von Produkten, die Hochtechnologie-Metalle enthalten, derzeit nur eine untergeordnete Rolle. Hier besteht ein Nachhol-

ABB. 21 | MANGANKNOLLENVORKOMMEN IM PAZIFIK



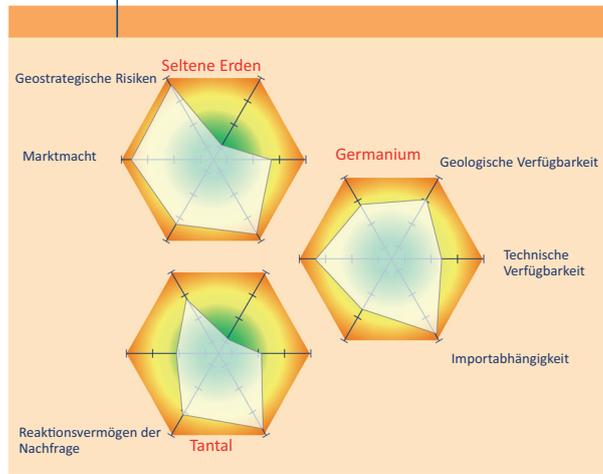
Der zentrale Pazifik mit den Gebieten der deutschen Manganknollenlizenz (rote Kreise), sowie den von China, Russland, Japan, Südkorea, Frankreich und anderen beanspruchten Gebieten.

ABB. 22 | MANGANKNOLLEN ALS ROHSTOFFQUELLE



Die Manganknollen belegen fast 25 % der Fläche des deutschen Lizenzgebietes im Ostpazifik. Die Gesamtmenge wird auf 150 Millionen Tonnen geschätzt. Die komplex aufgebauten Knollen bestehen zum überwiegenden Teil aus Mangan- und Eisen-Oxyhydroxiden, an die Nebenelemente wie Kupfer, Kobalt, Nickel, Molybdän und Lithium in signifikanten Konzentrationen gebunden sind.

ABB. 23 | INDIKATORENMODELLE



Hypothetische Indikatorenmodelle für SE, Germanium und Tantal, abgeschätzt am Beispiel eines typischen deutschen rohstoffverbrauchenden Betriebes.

und Forschungsbedarf, beispielsweise beim Aufbau eines Recycling-Programms von SE [24].

Deutschland ist bei der Versorgung mit Primärrohstoffen auf den Import angewiesen. Viele seltene Metalle werden aus geologischen, aber auch politischen, marktwirtschaftlichen und ökologischen Gründen nur in wenigen Ländern gewonnen. Für die hier behandelten Metalle sind dies China (Seltene Erden, Germanium), Brasilien (Tantal) und Zentralafrika (Tantal).

China hat sich durch den Rohstoffreichtum eine besondere wirtschaftliche Stellung erarbeitet – unter anderem ist es führend bei der Produktion von Antimon, Wolfram, Indium, Flussspat und Magnesit (Tabelle 2). Die Änderung der ökologischen und volkspolitischen Rahmenbedingungen führte jedoch zur Einführung von Exportquoten für bestimmte Rohstoffe, die daher in Zukunft aus anderen Quellen bezogen werden müssen.

Aus geologischen Gründen sind die Vorräte der seltenen Metalle groß genug, um den steigenden Bedarf der Industrie zu decken. Allerdings müssen die Verarbeitungskapazitäten angepasst werden. Ein Ausweichen der Produktion auf Entwicklungsländer, beispielsweise nach Zentralafrika, ist vor dem Hintergrund der mit dem überwiegend artisanalen Bergbau verbundenen sozialen, Umwelt- und Sicherheitssituation schwierig. Vor allem Konfliktregionen wie der Ostteil des Kongo werden von den Verbrauchern zunehmend als kritisch angesehen. Hier werden Systeme zur Transparenz im Rohstoffhandel unter Beteiligung von Politik, Industrie und Zivilgesellschaft entwickelt und durchgesetzt werden müssen.

Für die kritischen Rohstoffe Seltene Erden, Germanium und Tantal wurde beispielhaft für den Standort Deutschland eine Abschätzung der Risiken versucht (Abbildung 23). Es ist ersichtlich, dass geologische Risiken eine vergleichsweise geringe Rolle spielen. Vielmehr ist es das Wechsel-

spiel zwischen Marktsituation, Substituierbarkeit, geostrategischen Risiken, technischer Verfügbarkeit und Importabhängigkeit, welches für viele rohstoffimportierende Länder und Firmen kritisch ist. Die Frage lautet nicht: „Gibt es in Zukunft noch Rohstoffe?“, sondern „wie kann ich eine verlässliche und nachhaltige Rohstoffversorgung erreichen?“ Dazu geben Politik und Verbände Hilfestellungen; letztlich sind wirksame Absicherungsstrategien aber nur von den Firmen umsetzbar.

Schlagwörter

Hochtechnologie-Metalle, Seltene Erden, Germanium, Tantal, Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit, Reichweite

Zusammenfassung

Die deutsche Industrie ist in hohem Maße von einer sicheren Rohstoffversorgung abhängig. Vierzehn mineralische Rohstoffe werden von der Europäischen Union als kritisch bewertet. Obwohl die Rohstoffsicherung primär als Aufgabe der Industrie anzusehen ist, geben die Bundesregierung und die EU wesentliche Impulse für eine nachhaltige und zukunftsorientierte Rohstoffstrategie. Teil dieser Strategie ist die Gründung der DERA als zentrale deutsche Beratungsstelle für die Wirtschaft.

Die Reservensituation für die kritischen Rohstoffe ist in den allermeisten Fällen unbedenklich, und es gibt genügend Möglichkeiten, Rohstoffe aus bisher nicht genutzten Vorkommen zu gewinnen, zu substituieren oder zu recyceln. Es sind vielmehr Faktoren wie die technische Verfügbarkeit, geostrategische Risiken und Marktmacht, die bei allen diesen Metallen kritisch bewertet werden. Darauf müssen sich Firmen einstellen und reagieren. Ein wichtiger Punkt ist die Entwicklung der BRIC-Staaten, allen voran Chinas; zum einen haben diese Länder durch den Aufbau ihrer Wirtschaften einen sehr hohen Rohstoffbedarf, zum anderen entwickeln sie zunehmend Technologien zur Rohstoffveredelung im eigenen Land. Dies verringert – vor allem in einem sehr rohstoffreichen Land mit niedrigem Lohnniveau wie China – die Kapazitäten der für den Export vorgesehenen Rohstoffe, was sich wiederum in höheren Preisen auswirkt. Der Bedarf an Rohstoffen, die nicht aus Ländern mit hohem Eigenbedarf oder Exportquoten kommen, steigt. Dies führt wiederum dazu, dass die Rohstoffversorgung auch auf Länder zugreift, in denen keine gesicherten Standards im Bergbau, Umweltmanagement, oder sozialer Sicherheit gelten oder in denen der Rohstoffabbau mit der Finanzierung von Konflikten einhergeht. Zukünftig werden Weltwirtschaft und Verbraucher für diese artisanal geförderten Rohstoffe die Umsetzung von Mindeststandards verlangen.

Summary

It is vital to ensure that the German economy is supplied with the mineral resources that it needs. In 2010, the Ad-Hoc Working Group on defining critical raw materials of the European Commission has identified 14 materials as critical. Although the task of securing the supply of raw materials is

with the industry, both the German government and the European Union have defined strategies for future-oriented and sustainable raw materials supply. The establishment of the German Mineral Resources Agency (DERA) as a central information centre for the industry is part of the German Government's raw materials strategy.

The reserves of most critical raw materials are considered large enough to meet the demand of years to come. In addition, there are numerous options of substitution, recycling and of recovering metals from non-used deposits. However, it is a combination of factors such as the geological availability, geostrategic risks and market power that result in an assessment as a critical raw material. These factors have to be taken into account by the industry to be able to effectively react to changing market situations. In this respect, the future development of the BRIC countries, led by China, is considered most important. Due to the growing industrialization, their raw materials consumption increases; furthermore, technologies using critical raw materials for domestic production are being developed. In such resource-rich countries, export capacities of certain critical materials are being reduced and thus import prices tend to increase. Pressure on raw material producers outside of these countries is growing. Consequently, raw materials are increasingly sourced from regions that do not meet criteria of sustainable mining practice, environmental management and social security, as seen for example in many artisanal mining operations. Furthermore, in some countries mining is related to violent conflicts. In the future, both consumers and industry will increasingly ask for the implementation of minimum standards in artisanal mining and of transparency in mineral supply chains.

Danksagung

Die Autoren danken den Kollegen der BGR (U. Schwarz-Schampera, H. Elsner, T. Kuhn) und der DERA (M. Liedtke, P. Buchholz) für die Zuarbeiten, und Christian Hagelüken (Umicore) für den Review mit hilfreichen Kommentaren und Ergänzungen.

Literatur und Anmerkungen

- [1] Die Länderkonzentration wird durch den Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) ausgedrückt. Er bezeichnet die Summe aller quadrierten Marktanteile der Wettbewerber eines Marktes.
- [2] Die „Worldwide Governance“-Indikatoren sind: (1) Control of Corruption, (2) Voice and Accountability, (3) Political Stability and Absence of Violence, (4) Government Effectiveness, (5) Regulatory Quality, (6) Rule of Law.
- [3] Critical raw materials for the EU: report of the Ad-Hoc Working Group on defining critical raw materials. European Commission, Juni 2010.
- [4] a) M. A. Reuter, U. M. J. Boin, A. van Schaik, E. V. Verhoef, K. Heiskanen, Y. Yang, G. Georgalli, *The Metrics of Material and Metal Ecology, Harmonizing the Resource, Technology and Environmental Cycles*, Elsevier, Amsterdam, 2005. b) E. V. Verhoef, G. P. J. Dijkema, M. A. Reuter, Process knowledge, system dynamics and metal ecology. *Journal of Industrial Ecology* 2004, 8, 1-2, 23–43.
- [5] M. Liedtke, Verfügbarkeit von Metallrohstoffen für die Dünnschicht-Photovoltaik, *VIP-Journal* 2012, 24, 2–6.
- [6] a) C. Hagelüken, C.E.M. Meskers, Complex Life Cycles of Precious and Special Metals, *Strüningmann Forum Report, Linkages of Sustainability*, editiert von T.E. Graedel und E. van der Voet, 2010, 163–197, MIT Press; b) C. Hagelüken, Secondary Raw Material Sources for Precious and Special Metals, *Non-Renewable Resource Issues: Geoscientific and Societal Challenges*, International Year of Planet Earth, editiert von R. Sinding-Larsen und F.-W. Wellmer, 2012, 195–212.
- [7] G. Angerer, F. Marscheider-Weidemann, A. Lüllmann, L. Erdmann, M. Scharp, V. Handke, M. Marwede, *Rohstoffe für Zukunftstechnologien*. Studie des Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung IZT GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Karlsruhe, Berlin, 2009, 383.
- [8] A.J. Naldrett, *Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration* 2004, Springer.
- [9] a) D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W.W. Behrens, *The Limits to Growth*. Universe Books, 1972. b) Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Aus dem Amerikanischen von Hans-Dieter Heck. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1972.
- [10] J.P. Gerling, F.-W. Wellmer, Wie lange gibt es noch Erdöl und Erdgas? *Chem. Unserer Zeit* 2005, 39, 236–245.
- [11] D. Rosenau-Tornow, P. Buchholz, A. Riemann, M. Wagner, Assessing the long-term supply risks for raw materials – a combined evaluation of past and future trends, *Resources Policy* 2009, 34, 161–175.
- [12] Das Selten-Erd-Element Cer ist mit 65 ppm in der oberen kontinentalen Erdkruste beispielsweise viel häufiger als Kupfer mit 25 ppm. Die Häufigkeiten einiger der für die Zukunftstechnologien benötigten Elemente sind jedoch wesentlich niedriger. Vgl. a) A.R. Chakhmouradian, F. Wall, Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets (and More), *Elements* 2012, 8, 333–340; b) Oakdene Hollins, *Lanthanide Resources and Alternatives*, 2010, 66 S., Oakdene Hollins Research and Consulting (<http://www.oakdenehollins.co.uk>).
- [13] H. Elsner, Kritische Versorgungslage mit schweren Seltenen Erden – Entwicklung „grüner Technologien“ gefährdet? *Commodity Top News* 2011, 36, 8 S., BGR Hannover (<http://www.bgr.bund.de>).
- [14] Yttrium wird trotz seiner niedrigen Ordnungszahl von 39 zu den schweren SEE gezählt, weil es geochemisch dem Holmium (Ordnungszahl 67) ähnelt.
- [15] H. Elsner, F. Melcher, U. Schwarz-Schampera, P. Buchholz, Elektronikmetalle – zukünftig steigender Bedarf bei unzureichender Versorgungslage? *Commodity Top News* 2010, 33, 13 S., BGR Hannover (<http://www.bgr.bund.de>).
- [16] Anreicherung von Mineralen hoher Dichte – Schwermineralen – durch exogene Prozesse aus Ausgangsgesteinen mit geringen Konzentrationen dieser Minerale, beispielsweise in Flüssen (alluviale Seife), an Stränden (Strandseife) oder im verwitterten Gestein unmittelbar oberhalb der Lagerstätte (eluviale Seife).
- [17] M. Liedtke, H. Elsner, Seltene Erden, *Commodity Top News* 2009, 31, 6 S., BGR Hannover (<http://www.bgr.bund.de>).
- [18] F. Melcher, P. Buchholz, Germanium, in A.G. Gunn, *Critical Metals Handbook* 2013, Wiley-Blackwell.
- [19] Tantalum, *Mining Journal Supplement* 2010, www.miningjournal.com.
- [20] a) Der Dodd-Frank Act schreibt in Section 1502 vor, dass in den USA börsennotierte Firmen offenlegen müssen, wie sie verhindern, dass keine Rohstoffe aus Konfliktregionen in den Produkten eingesetzt werden; b) D. Huy, M. Liedtke, F. Melcher, T. Graupner, T., Rohstoff-Zertifizierung und Sorgfaltspflichten von Unternehmen in den Lieferketten von Konfliktmineralen, *Commodity Top News* 2011, 37, 5 S., BGR Hannover (<http://www.bgr.bund.de>).
- [21] Die Internationale Konferenz der Großen Seen-Region (englisch: ICGLR; französisch: CRGL) wurde 2000 von den Vereinten Nationen gegründet, um Frieden und Sicherheit in der Region der zentralafrikanischen Seen zu stärken. Der Konferenz mit Sitz des Sekretariats in Bujumbura (Burundi) gehören seit 2011 zwölf Staaten an (DR Kongo, Republik Kongo, Zentralafrikanische Republik, Süd-Sudan, Sudan, Kenia, Tansania, Uganda, Ruanda, Burundi, Sambia, Angola).
- [22] a) H.-E. Gäbler, F. Melcher, T. Graupner, A. Bahr, M. Sitnikova, F. Henjes-Kunst, T. Oberthür, H. Brätz, A. Gerdes, Speeding up the

analytical workflow for coltan fingerprinting by an integrated mineral liberation analysis/LA-ICP-MS approach, *Geostandards and Geoanalytical Research* **2011**, 35, 431–448. b) F. Melcher, M.A. Sitnikova, T. Graupner, N. Martin, T. Oberthür, F. Henjes-Kunst, H.-E. Gäbler, A. Gerdes, H. Brätz, D.W. Davis, S. Dewaele, Fingerprinting of conflict minerals: columbite-tantalite („coltan“) ores. *SGA News* **2008**, 22, 1–14. c) <http://www.bgr.bund.de>.

- [23] M. Hannington, *Mineralium Deposita* **2011**, 46, 659–663; M.L. Cathles, *Mineralium Deposita* **2011**, 46, 665–669.
- [24] a) Öko-Institut, *Hintergrundpapier Seltene Erden* **2011** (<http://www.oeko.de>); b) D. Schüler, M. Buchert, R. Liu, S. Dittrich, C. März, Study on Rare Earths and their Recycling, *Final Report for the Greens/EFA Group in the European Parliament* **2011**, Öko-Institut, 162 S.
- [25] M. Nestour, 2010. Material risk: Access to technology minerals. *Mining & Metals*, September **2010**.
- [26] R.L. Rudnick, S. Gao, Composition of the continental crust, in *Treatise on Geochemistry*, (Hrsg.: H.D. Holland, K.K. Turekian) Vol. 3, Elsevier, Amsterdam, **2004**, 1–64.
- [27] a) Berechnung der Reichweiten von Mangan, Bauxit, Eisenerz, Kobalt, Kupfer, Nickel, Gold, Blei und Zinn auf der Basis der Produktions- und Reservendaten (2011) des USGS, *Mineral Commodity Summaries*, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>; b) für SEE: BGR Datenbank; c) für PGE: G.M. Mudd, *Ore Geology Reviews* **2012**, doi:10.1016/j.oregeorev.2012.02.005; c) für Tantal: R. Burt, *TIC Bulletin* **2010**, 141; d) für Germanium: siehe [18]; e) für Indium: U. Schwarz-Schampera, *Indium*, in: G.A. Gunn, *Critical Metals Handbook* **2013**, Wiley-Blackwell.

Die Autoren



Dr. Frank Melcher ist an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover tätig. Er studierte Geologie, Mineralogie und Petrologie an den Universitäten Mainz, Innsbruck und Leoben (Österreich), und war sechs Jahre in Forschung und Lehre an der Montanuniversität Leoben tätig. An der BGR betreut er seit 2000 das Labor für Elektronenstrahlmikroanalyse und ist federführend bei Projekten zum analytischen Herkunftsnachweis von mineralischen Rohstoffen. An der Universität Hannover ist er als Dozent in die rohstoffkundliche Ausbildung eingebunden. Seine wissenschaftlichen Interessen liegen im Bereich der Lagerstätten von Hochtechnologie-Metallen und der ortsauflösenden mineralogischen und geochemischen Analytik.



Dr. Hildegard Wilken leitet als wissenschaftliche Direktorin in der BGR den Fachbereich „Geologie der mineralischen Rohstoffe“. In dieser Funktion hat sie auch die Deutsche Rohstoffagentur in der BGR maßgeblich mitentwickelt. Sie hat Chemie an der Universität Münster studiert. Nach verschiedenen Tätigkeiten in den Bereichen Consulting (Grundwasser- und Umweltmonitoring) und Forschungscoordination (Geotechnologien; Umweltgeologie) ist sie seit 2001 in der BGR in den Bereichen Entwicklungszusammenarbeit im Geosektor sowie Wirtschaftsgeologie der mineralischen Rohstoffe tätig.

Korrespondenz- adresse:

Dr. Frank Melcher
Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
30655 Hannover,
Germany
E-Mail:
F.Melcher@bgr.de