



Peter Kausch · Martin Bertau  
Jens Gutzmer · Jörg Matschullat *Hrsg.*

# Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge



Springer Spektrum

---

# Strategische Rohstoffe — Risikovorsorge



---

Peter Kausch • Martin Bertau • Jens Gutzmer  
Jörg Matschullat (Hrsg.)

# Strategische Rohstoffe — Risikovorsorge

*Herausgeber*

Peter Kausch  
Mühlenbach 90  
Brühl, Deutschland

Jens Gutzmer  
Helmholtz-Institut für Ressourcentechnologie  
Freiberg (Sachsen), Deutschland

Martin Bertau  
Institut für Technische Chemie  
TU Bergakademie Freiberg  
Freiberg (Sachsen), Deutschland

Jörg Matschullat  
Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum  
TU Bergakademie Freiberg  
Freiberg (Sachsen), Deutschland

ISBN 978-3-642-39703-5  
DOI 10.1007/978-3-642-39704-2

ISBN 978-3-642-39704-2 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

*Planung und Lektorat:* Merlet Behncke-Braunbeck, Christoph Iven, Carola Lerch

*Korrektur:* Christine Hoffmeister

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-spektrum.de](http://www.springer-spektrum.de)

# Geleitwort



Prof. Dr.  
Friedrich-W. Wellmer

Deutschland ist überraschend schnell aus der Wirtschafts- und Finanzkrise 2008/09 herausgekommen. Eine wesentliche Ursache der Erholung ist die starke Position des produzierenden Gewerbes in Deutschland, das immer noch (ohne Bauwirtschaft) einen Anteil von 26% an der Bruttowertschöpfung hält. Demgegenüber sind es im EU-Durchschnitt 19,5%. Bei den anderen größten EU-Ländern betragen die Werte in Italien ca. 19%, in Großbritannien 17% oder in Frankreich 13%. Deutschland ist nach China und den USA die drittgrößte Handelsnation der Welt. Die Exporterfolge Deutschlands beruhen auf technologischen Spitzenprodukten, die eine immer größere Anzahl von Rohstoffen erfordern. Als Beispiel diene die Computer-Chiptechnologie. Nach einer Untersuchung des US National Research Council waren in den 1980er-Jahren des letzten Jahrhunderts hierfür 12 Elemente des periodischen Systems erforderlich, in den 1990er-Jahren 16 und in den 2000er-Jahren bis zu 60 Elemente. Da heute kaum eine größere Maschine oder gar ein Auto ohne computerisierte Regel- und Steuerungstechnik auskommt, pflanzt sich die Rohstoffkomplexität in alle Produkte weiter fort. Ein Auto kann heute bis zu 150 Prozessoren mit bis zu 6.000 Halbleitern enthalten. Dieses Beispiel verdeutlicht die Komplexität der Sicherung der Rohstoffversorgung der deutschen Wirtschaft, die in einem großen Teil mittelständisch geprägt ist. Allein im Bereich der Stahl- und Nichteisenmetallindustrie gibt es ca. 740 Firmen mit ca. 200.000 Beschäftigten.

Nach unserem Verständnis ist die Sicherung der Rohstoffversorgung Aufgabe der Industrie. Der Staat unterstützt durch flankierende Maßnahmen und stellt eine technisch-ökonomische Infrastruktur zur Verfügung. Hierzu gehört z. B. die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mit ihrem Informationsangebot und ihrer angewandten Forschung im Vorfeld der Industrie. Als China zu Beginn dieses Jahrtausends eine beispiellose Aufholjagd in der Industrialisierung und damit beim Rohstoffverbrauch begann und die Rohstoffpreise ein ganz neues, wesentliches höheres Plateau erreichten – im Extremfall stieg für einige Seltenerdmetalle mit China als Monopolist der Preis um den Faktor 100 –, bekam Rohstoffpolitik wieder die Priorität, die sie in den 1970er Jahren des letzten Jahrhunderts gehabt hatte. Seither wurden flankierende Maßnahmen und die technisch-ökonomische Infrastruktur verbessert. So wurde im Jahre 2010 die Rohstoffstrategie der Bundesregierung verabschiedet und der „Interministerielle Ausschuss (IMA) Rohstoffe“ unter Federführung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie eingerichtet, der die Aktivitäten der Bundesregierung in der Rohstoffpolitik koordiniert und in dem die deutsche Industrie über den Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) aktiv mitarbeitet. Die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) wurde in Berlin als Sonderorganisation der BGR gegründet. Forschungsseitig wird in Zusammenarbeit mit der TU Bergakademie Freiberg das Helmholtz-Institut Freiberg für

Ressourcentechnologie aufgebaut. Die Industrie, initiiert durch den BDI, reagierte auf die Zuspitzung der Rohstoffversorgung mit der Gründung der Deutschen Rohstoffallianz, in der sich zwölf deutsche Firmen zusammengeschlossen haben, um direkte Maßnahmen zur Verbesserung der Versorgungssicherheit zu entwickeln.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) verkündete Ende 2012 innerhalb des Rahmenprogrammes Forschung für nachhaltige Entwicklungen FONA das Forschungs- und Entwicklungsprogramm für neue Rohstofftechnologien „Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland“. Unter wirtschaftsstrategischen Rohstoffen werden Metalle und Mineralien verstanden, deren Verfügbarkeit für Zukunftstechnologien gesichert werden muss und die eine große Hebelwirkung für die Wirtschaft haben.

Ein relativ geringer Mengeneinsatz dieser Rohstoffe trägt zu einer großen zusätzlichen Wertschöpfung in Hochtechnologiebereichen bei. Im Jahre 2010 betrug der Wert dieser Rohstoffgruppe weniger als 10% des Wertes aller Rohstoffimporte, die insgesamt etwa 0,5% des Wertes unseres Bruttoinlandsproduktes darstellten. Somit wird die große Hebelwirkung deutlich. Zu den wirtschaftsstrategischen Rohstoffen gehören aus augenblicklicher Sicht die Stahlveredler und Refraktärmetalle wie Nickel, Wolfram oder Tantal, Metalle für die Elektronikbranche wie Germanium, Gallium oder Indium sowie andere Hightech-Rohstoffe wie Seltene Erden oder Platingruppenelemente. Die Gruppe der wirtschaftsstrategischen Rohstoffe ist jedoch technologieoffen. Ein Rohstoff, der heute völlig unkritisch ist, kann morgen durch neue Technologieentwicklungen kritisch werden und damit zu den wirtschaftsstrategischen Rohstoffen zählen.

Außer Forschung und Beratung haben Universitäten und außeruniversitäre wissenschaftliche Institutionen noch eine weitere Aufgabe: im inter- und transdisziplinären Dialog mit der Industrie den Erkenntnisgewinn zu maximieren. Interdisziplinarität ist das Zusammenwirken verschiedener Disziplinen, Transdisziplinarität das Zusammenwirken verschiedener Lernprozesse, wie solcher in Academia oder in der Industrie, sodass alle aus den spezifischen Lernprozessen der anderen Nutzen ziehen können.

Im April 2012 wurden zwei derartige trans- und interdisziplinäre Rohstofftagungen zeitgleich in Deutschland und in Frankreich organisiert: in Freiberg/Sachsen ein alle zwei Jahre stattfindendes Symposium „Freiberger Innovationen“ zum Thema „Strategische Rohstoffe – Risikoversorge“, organisiert durch die TU Bergakademie Freiberg und das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, und in Orléans/Frankreich eine Veranstaltung beim LE STUDIUM Loire Valley Institute for Advanced Studies. Hier war eine Gastprofessur für „Sustainable Management of Natural Resources“ eingerichtet worden. Die Veranstaltung war eine gemischt deutsch-französische Tagung zum Thema: *„Life and innovation cycles in the field of raw materials supply and demand – a transdisciplinary approach“*.

Vorliegender Band enthält eine Auswahl von Beiträgen beider Tagungen, wobei die Beiträge die gesamte Wertschöpfungskette von der Exploration bis zum Recycling und zur Substitution abdecken und insbesondere Strategien der Risikoversorge vor allem bei den wirtschaftsstrategischen Rohstoffen vom Germanium über Lithium bis zu den Seltenerdmetallen behandelt werden.

Dieses Buch verdient eine große Leserschaft, auch außerhalb der Rohstoffgemeinde!

Glückauf!

*Friedrich-W. Wellmer*

Präsident a. D. der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und des früheren Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung (heute Teil des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie, LBEG)

# Vorwort der Herausgeber

Im Frühjahr 2012 erreichte der „Rohstoffhype“ seinen Höhepunkt. Ehemals unaussprechlich erscheinende Namen wie Dysprosium oder Praseodym wurden von beinahe jedermann wie selbstverständlich den Seltenen Erden zugeordnet, und wie keine andere Rohstoffklasse standen die Seltenerdmetalle synonym für die Besorgnisse der westlichen Industrienationen um ihre Versorgungssicherheit mit für die industrielle Produktion unverzichtbaren Rohstoffen. Zu präsent waren noch die Befürchtungen, welche die Ankündigung Chinas vom 11. August 2010, die Seltenerdmetallexporte im Vergleich zum Vorjahr um 40 % zu reduzieren, ausgelöst hatte. Völlig unvorbereitet sah sich der Westen einer Situation gegenüber, die durchaus vorhersehbar und die in Fachkreisen auch längst Gegenstand von Diskussionen war. In Politik und Wirtschaft war dies jedoch sehr unterschiedlich aufgenommen worden. So sahen sich Entscheidungsträger aus verschiedensten Bereichen auf einen Schlag gezwungen, den Ball aufzunehmen und sowohl das politische Handlungsumfeld als auch die Strategien der Industrie hinsichtlich der Sicherung ihrer Rohstoffbasis einer kritischen Bestandsaufnahme zu unterziehen.

In genau dieser Zeit, vom 19.–20. April 2012, fand an Deutschlands Ressourcenuniversität, der TU Bergakademie im sächsischen Freiberg das 4. Symposium Freiburger Innovationen statt, das dieses Mal unter dem Motto „Strategische Rohstoffe – Risikoversorge“ stand und

somit geeignet wie kein anderes war, im Lichte der damaligen Situation mit international hochrangigen Fachexperten aus Wissenschaft, Industrie und Politik die komplexe Lage zu analysieren und Lösungsmodelle zu entwerfen.

Unterteilt in die Themenblöcke Rohstoffmanagement, primäre Rohstoffe, Sekundärrohstoffe und Recycling sowie Verarbeitung und Produkte kamen die unterschiedlichsten Aspekte dieser Themenbereiche zur Sprache. Wie bereits bei der Vorgängerveranstaltung im Jahr 2010 beobachteten wir das mittlerweile zur Seltenheit gewordene Phänomen, wie die Tagung eine eigene Dynamik entwickelte und wie abseits aller Protokolle in einer ungewohnten Offenheit über die drängenden Fragen miteinander gesprochen und nach Lösungskonzepten gesucht wurde. So zeigte sich in den insgesamt 19 Vorträgen, wie unglaublich vielschichtig und komplex die Rohstoffversorgung in der heutigen Zeit ist. Neben politischen Gegebenheiten, wie sie z. B. bei der Lithiumgewinnung zum Tragen kommen, und den Auswirkungen finanzieller Interessen institutioneller Anleger auf die Rohstoffmärkte, wurden auch Strategien der Industrie zur Sicherung der Rohstoffbasis besprochen, die sich im Spannungsfeld einer zunehmenden Ökonomisierung bewegen.

Doch wie sichert sich eine Volkswirtschaft, die im Wesentlichen auf Rohstoffimporte angewiesen ist, ihre Rohstoffversorgung? Welchen Beitrag können Recyclingstrategien leisten?

Wo sind auf Seiten der primären Rohstoffe noch offene Flanken? Wie begegnen Industrie und Politik diesen Herausforderungen? All diese Fragen wurden kontrovers diskutiert und von verschiedenen Seiten beleuchtet. Darüber hinaus wurden auch neue wissenschaftliche Entwicklungen deutlich, die nun zunehmend Eingang in die industrielle Praxis finden. Sie beginnen mit verbesserten Modellen zur Bewertung von Rohstofflagerstätten und finden ihren Weg über neue Recyclingstrategien bis hin zu dem Ergebnis, dass der Chemie im 21. Jahrhundert in Form der Rohstoffchemie eine ganz neue, für die Volkswirtschaft elementare Bedeutung für die Rohstoffversorgung zukommt. Daraus ergeben sich wiederum völlig neue Potenziale für die Chemische Industrie, einem starken Motor der hiesigen Wirtschaft.

Mittlerweile ist ein gutes Jahr vergangen, und wie so viele medial überzeichnete Trends erfuhren auch das Rohstoffthema eine deutliche Abkühlung. Während die Politik zunächst rasch handelte und bedeutende Summen für die Entwicklung neuer Verfahren zur Sicherung der Rohstoffbasis freigab, ist die Entwicklung mittlerweile heterogen. Herrschte 2012 noch der unbedingte Wille vor, sich durch eigene Verfahrensentwicklungen unabhängiger von geopolitischen Unwägbarkeiten zu machen und einmal in die Volkswirtschaft eingebrachte Rohstoffe vermehrt im Kreislauf zu führen, erfuhren diese technologischen Entwicklungen vermehrt eine auf das Jetzt bezogene, rein ökonomische Betrachtungsweise, als sich die Rohstoffmärkte beruhigten und die Preise nachgaben. Im Ergebnis wurde argumentiert, dass sich angesichts der gegenwärtigen Preisniveaus ein Recycling nicht lohne – damit reagierte der Westen absolut vorhersehbar auf das Handeln fernöstlicher Rohstoffstrategen. In der Absicht, dem Primat der Wirtschaftlichkeit Folge zu leisten, wurden vielfach Entwicklungen zurückgefahren, die zumindest in eine geringere Abhängigkeit von den internationalen Rohstoffmärkten gemündet hätten. Auf diese Weise wurde Weitsicht auf dem Altar des Quartalsdenkens geopfert. Indem rohstoffexportierende Länder

ihre „*commodities*“ in Zeiten großer Nachfrage verbilligen, sobald sich abzeichnet, dass die Nachfrageunterdeckung zugleich auch Motor für technologische Neuentwicklungen ist, unterbinden sie letztlich genau diese in den hochindustrialisierten Ländern in Kenntnis der Kennzahlengläubigkeit westlicher Aktionäre, wohlwissend, dass sich unter den neuen Marktgegebenheiten kein neues Verfahren „rechnet“. Die Konsequenzen dieses Handelns und deren Folgen sind absehbar, ebenso das dann fehlende Verständnis für die dann nicht verfügbaren, doch zweifellos dringend benötigten Technologien.

Diese Entwicklung hat uns veranlasst, das Symposium von 2012 in Buchform der Allgemeinheit zugänglich zu machen. Ganz bewusst wurde eine Veranstaltung, die fast zeitgleich in Orléans unter der Leitung von Professor Wellmer stattfand, die deutsch-französische Tagung „*Life and innovation cycles in the field of raw materials supply and demand – a transdisciplinary approach*“ mit einbezogen (► Geleitwort). So sehr manche Entwicklungen wie die zuvor genannten berechtigten Anlass zur Sorge geben, zeigen die hier zusammengestellten Kapitel, dass wir uns mitnichten in einer ausweglosen Situation befinden. Sie zeigen vielmehr, was bisher geleistet wurde, zeugen aber auch von den Herausforderungen, die noch zu meistern sind. Vor allem aber zeigen sie, dass die Probleme erkannt und angepackt wurden; und sie mahnen, in diesem Streben nicht nachzulassen.

## Danksagung

Die „Freiberger Innovationen“ wären ohne das Vertrauen vieler Partner aus Industrie, Politik und Wissenschaft in die TU Bergakademie Freiberg, deren Mannschaft und die Verantwortlichen der Tagungsreihe nicht denkbar. Dies gilt in besonderem Maße für Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Friedrich-Wilhelm Wellmer. Wir können ihn in gewissem Sinne als *spiritus*

*rector* nicht allein dieser Veranstaltungsreihe bezeichnen, und er ist es, der uns immer wieder Mut gemacht hat, wenn in den vergangenen Dekaden das Thema Ressourcen in seiner Bedeutung infrage gestellt wurde. Dafür möchten wir uns an dieser Stelle ebenso bedanken wie bei der Hochschulleitung der TU Bergakademie Freiberg, uns wiederum die sehr angenehmen Räumlichkeiten der „Alten Mensa“ zur Verfügung gestellt zu haben. Leider sind viele gute Dinge heute kaum mehr ohne externe materielle Unterstützung zu verwirklichen – was zumindest bei Universitäten auch an der vergleichsweise äußerst bescheidenen Grundfinanzierung liegt. Deshalb sind wir umso mehr zu Dank verpflichtet einer Reihe von treuen Mäzenen, die mit ihrer finanziellen Unterstützung die Tagung möglich gemacht haben. Wir danken der Boston Consulting Group GmbH, der Daimler AG, der Robert Bosch GmbH, dem Verein der Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg e.V. sowie der Wissenschaftsförderung der Sparkassen-Finanzgruppe e.V. ganz herzlich für ihr Vertrauen. Ohne sie wären weder die Veranstaltung noch dieses Buch Wirklichkeit geworden.

Eine angenehme und anregende Tagungsatmosphäre ist ein wichtiger Baustein für eine erfolgreiche Konferenz. Ein ganz besonderer Dank gilt deshalb der Gruppe um Katja Horota, die in bewährter und äußerst professioneller

Weise mit ihrem Team, namentlich Andreas und Polina Klossek sowie Petya Atanasova, die gesamte Tagungsorganisation einschließlich des guten Caterings vollkommen unauffällig und erfolgreich durchgeführt und schon im Vorfeld viele Anfragen kompetent und hilfreich beantwortet haben.

Dieses Buch, das sich schon beim ersten Blättern als außergewöhnlich aufwendig gestaltet und ausgestattet empfiehlt, gäbe es nicht ohne das gewaltige Engagement von Anne Marie de Grosbois, die weit mehr als „nur“ Satz und Gestaltung übernommen hat und letztlich eine fünfte Herausgeberin ist, und ebenso wenig ohne das Vertrauen und die äußerst angenehme Zusammenarbeit mit dem Spektrum Verlag in Heidelberg und hier besonders Merlet Behncke-Braunbeck. Auch wenn wir Herausgeber uns „unterwegs“ ab und an gefragt haben, ob sich denn dieser Aufwand wirklich lohnt, sind wir doch mit dem Ergebnis sehr zufrieden und hoffen, dass es unseren Leser genauso gehen wird. Wir meinen, dass dieses Buch – in Ergänzung seiner Vorgänger – einen topaktuellen und letztlich alle wesentlichen Aspekte des Themas erfassenden tieferen Einblick hinter die Kulissen der Rohstoffversorgung und damit verbundenen Strategien gibt. Wer es aufmerksam und vorurteilsfrei liest, wird davon profitieren und Hilfestellung bei der Bewertung heutiger und zukünftiger Fragen zum Thema erhalten.

Freiberg, im September 2013

*Jörg Matschullat, Martin Bertau, Peter Kausch  
und Jens Gutzmer*



# Inhaltsverzeichnis

Geleitwort . . . . .	v
Vorwort der Herausgeber . . . . .	vii
Autorenverzeichnis . . . . .	xv

## Teil I Rohstoffwirtschaft 1

<b>1</b>	<b>Substitution von Rohstoffen – Rahmenbedingungen und Umsetzung . . .</b>	<b>3</b>
1.1	Einführung . . . . .	3
1.2	Typen von Substitution . . . . .	4
1.3	Wie erfolgt Substitution? . . . . .	6
1.4	Die Konsequenz: „Robuste Entscheidungsfindung“ . . . . .	8
1.5	Ein Anwendungsbeispiel – Flexifuel in Brasilien . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Thales: Strategische Rohstoffe . . . . .</b>	<b>13</b>
2.1	Wie Thales kritische Rohstoffe verwendet . . . . .	13
2.2	Fokus auf Gallium . . . . .	15
2.3	Kritische Metalle . . . . .	15
2.4	Einschätzung des Risikos von Versorgungsketten . . . . .	16
2.5	Wie Thales mit dem Risiko umgeht . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Zeit für Kooperation zwischen der EU und China in der Rohstoffpolitik . . .</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>Verfügbarkeit von Elementen für die Halbleiterindustrie . . . . .</b>	<b>31</b>
4.1	Materialbasis Erde . . . . .	31
4.2	Von Förderung über Recycling zu „smart-standardization“ . . . . .	32
4.3	Ressourcen der Halbleiterindustrie . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Marktpreisrisiken rohstoffintensiver Unternehmen – Identifikation und Management . . . . .</b>	<b>39</b>
5.1	Risikoidentifikation und Risikodimensionen bei Rohstoffunternehmen . . . . .	40
5.2	Wege zur Risikoabsicherung . . . . .	46
5.3	Umsetzung einer Absicherungsstrategie . . . . .	51
5.4	Fazit und Ausblick . . . . .	55





## Teil II Primäre Rohstoffe

59

<b>6</b>	<b>Die Versorgung mit wirtschaftskritischen Rohstoffen – Eine Ursachensuche und -analyse . . . . .</b>	<b>61</b>
6.1	Die Auslöser . . . . .	61
6.2	Identifizierung wirtschaftskritischer Rohstoffe . . . . .	62
6.3	Gruppe 1 – Die Volksrepublik China als dominante Quelle . . . . .	65
6.4	Gruppe 2 – Rohstoffbezug aus wenigen instabilen Ländern/Regionen . . . . .	65
6.5	Gruppe 3 – Fehlende Technologien . . . . .	66
6.6	Lösungsansätze . . . . .	69
6.7	Zusammenfassung . . . . .	71
<b>7</b>	<b>Lithiumgewinnung aus Primärrohstoffen – Stand und Perspektiven . . . . .</b>	<b>75</b>
7.1	Einleitung . . . . .	75
7.2	Bedarf, Reserven und Ressourcen . . . . .	75
7.3	Rohstofftypen und Grundprinzipien der Gewinnung . . . . .	77
7.4	Lithiumgewinnungsprojekte . . . . .	82
7.5	Projekte an den Salzseen Nordchiles und Argentinien . . . . .	83
7.6	Bolivien . . . . .	85
7.7	Salzseen in China . . . . .	88
7.8	Kanada . . . . .	90
7.9	Europa und Türkei . . . . .	90
7.10	Einheimisches Lithium . . . . .	92
7.11	Zusammenfassung . . . . .	92
<b>8</b>	<b>Der globale Markt der Seltenen Erden – Ein Balanceakt . . . . .</b>	<b>97</b>
8.1	Die Seltenen Erden . . . . .	97
8.2	Die Dimensionen des globalen Seltenerdmarktes . . . . .	100
8.3	Globale Seltenerdressourcen . . . . .	100
8.4	Globales Angebot zu und globale Nachfrage nach Seltenen Erden . . . . .	104
8.5	Angebot und Nachfrage zu einzelnen Seltenerdelementen . . . . .	108
8.6	China . . . . .	109
8.7	Japan . . . . .	113
8.8	Preise für Seltene Erden . . . . .	114
8.9	Ein Seltenerdprojekt entwickeln . . . . .	115
<b>9</b>	<b>Lagerstätten Seltener Erden in Namibia . . . . .</b>	<b>123</b>
9.1	Namibia als Bergbauland . . . . .	123
9.2	Die Lagerstätten Seltener Erden Namibias – Ein Überblick . . . . .	124
9.3	Ausgesuchte SEE-Lagerstätten in Namibia . . . . .	126
9.4	Entwicklung einer SEE-Lagerstätte zu einem Bergwerksprojekt in einem Entwicklungsland . . . . .	138
9.5	Zusammenfassung . . . . .	145

**10 Neue Technologien in Exploration und Lagerstättenentdeckung – Mit Fokus auf Aktivitäten in Europa . . . . . 149**

10.1 Einleitung . . . . . 149

10.2 Explorationskosten . . . . . 149

10.3 Die Entdeckungsrate . . . . . 149

10.4 Technologische Unzulänglichkeiten bei der Exploration . . . . . 151

10.5 Erhöhen der Datenakquise aus Bohrlöchern . . . . . 153

10.6 Geochemie . . . . . 154

10.7 Geophysik . . . . . 155

10.8 Explorationskonzepte und ihre Grenzen . . . . . 155

10.9 Schlussfolgerungen . . . . . 156

**Teil III Sekundäre Rohstoffe und Recycling 159**

**11 Technologiemetalle – Systemische Voraussetzungen entlang der Recyclingkette . . . . . 161**

11.1 Bedeutung der Technologiemetalle . . . . . 161

11.2 Recycling – Chancen und Herausforderungen . . . . . 164

11.3 Voraussetzungen für den Recyclerfolg . . . . . 168

**12 Integrierte Wiederverwendung von Hightech- und Greentech-Abfällen . . . . . 173**

12.1 Abfall als Rohstoffe . . . . . 173

12.2 Siliziumzellen-Abfall aus der PV-Industrie – ein 100 %iger Sekundärrohstoff . . . . 174

12.3 Ein universelles nasschemisches Recyclingverfahren für Dünnschicht-Photovoltaik-Abfall . . . . . 176

12.4 Anwendung auf SEE-haltige Abfälle . . . . . 179

**13 Von der Klärschlammasche zum Phosphordünger – RecoPhos P38 im Spannungsfeld von Abfall-, Düngemittel- und Bodenschutzrecht . . . . . 183**

13.1 Einführung . . . . . 183

13.2 Phosphorrückgewinnung – Motivation und Fortschritte . . . . . 184

13.2 Rechtliche Rahmenbedingungen für die Erzeugung und Anwendung von Sekundärphosphordünger aus Klärschlammasche . . . . . 185

13.4 Der RecoPhos-Prozess . . . . . 187

13.5 RecoPhos P38 und das Ende des Abfalls . . . . . 187

13.6 Potenzialbetrachtung . . . . . 192

13.7 Bodenschutzrechtliche Implikationen der Düngung mit RecoPhos P38 . . . . . 193

13.8 Schlussfolgerungen . . . . . 194



## Teil IV Verarbeitung und Produkte

199

<b>14</b>	<b>Aufbereitung und Verarbeitung von Seltenerdmetallen . . . . .</b>	<b>201</b>
14.1	Einführung . . . . .	201
14.2	Rohstoffpotenzial . . . . .	202
14.3	Verarbeitung . . . . .	207
14.4	Anwendungen für Seltenerdmetalle . . . . .	210
<b>15</b>	<b>Aufbereitung mineralischer Rohstoffe – Chancen und Herausforderungen . . . . .</b>	<b>219</b>
15.1	Einleitung . . . . .	219
15.2	Wasser . . . . .	220
15.3	Energie . . . . .	225
15.4	Modellierung . . . . .	226
15.5	Automatisierte Mineralogie . . . . .	228
15.6	Kritische Materialien . . . . .	228
<b>16</b>	<b>Konsequenzen der modernen Germaniumchemie . . . . .</b>	<b>233</b>
16.1	Geschichte . . . . .	233
16.2	Eigenschaften des Germaniums . . . . .	233
16.3	Verwendung von Germanium . . . . .	235
16.4	Rohstoffchemie des Germaniums . . . . .	237
16.5	Die Chemie des Germaniums . . . . .	240
16.6	Anwendungen des Germaniums . . . . .	247
16.7	Versorgungslage mit Germanium-Rohstoffen . . . . .	255
<b>17</b>	<b>Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge. Ein Rück- und Ausblick mit einer Prise Phantasie... . . . .</b>	<b>261</b>
17.1	Die Herausforderung . . . . .	261
17.2	Eine Nachlese . . . . .	262
17.3	Was haben wir gelernt und wo stehen wir? . . . . .	265
17.4	Neue Wege in die Zukunft von Bergbau? . . . . .	267

<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>271</b>
----------------------------------	------------

# Autorenverzeichnis

Becker, Beatrix F., M.Sc.

Technische Universität Darmstadt  
Institut IWAR  
Fachgebiet Industrielle Stoffkreisläufe  
Petersenstraße 13  
D-64287 Darmstadt  
b.becker@iwar.tu-darmstadt.de

Demotes-Mainard, Bertrand

Vice-President, Hardware technologies, Thales  
45, rue de Villiers  
F-92526 Neuilly sur Seine, France  
bertrand.demotes-mainard@thalesgroup.com

Bertau, Prof. Dr. Martin

Direktor des Instituts für Technische Chemie  
Technische Universität Bergakademie Freiberg  
Leipziger Straße 29  
D-09599 Freiberg  
martin.bertau@chemie.tu-freiberg.de

Gutzmer, Prof. Dr. Jens

Direktor Helmholtz-Institut Freiberg für  
Ressourcentechnologie, Helmholtz-Zentrum  
Dresden-Rossendorf (HZDR)  
Halsbrücker Straße 34  
D-09599 Freiberg  
j.gutzmer@hzdr.de

Professur für Lagerstättenlehre und  
Petrologie, Institut für Mineralogie  
Technische Universität Bergakademie Freiberg  
Brennhausgasse 14  
D-09596 Freiberg  
jens.gutzmer@mineral.tu-freiberg.de

Bütikofer, Reinhard

Industriepolitischer Sprecher der Fraktion  
Grünen/EFA,  
Stellvertretendes Mitglied der EU-China De-  
legation im Europäischen Parlament,  
Ko-Vorsitzender der Europäischen Grünen  
Partei (EG),  
Europäisches Parlament  
60, rue Wiertz  
B-1047 Brüssel, Belgien  
reinhard.buetikofer@europarl.europa.eu

Hagelüken, Dr. Christian

Director EU Government Affairs  
Umicore AG & Co. KG, Hanau  
Rodenbacher Chaussee 4,  
D-63457 Hanau-Wolfgang  
christian.hagelueken@eu.umicore.co

- Kausch, Prof. Dr. Peter  
Honorarprofessor für Umwelt- und  
Ressourcenmanagement  
Technische Universität Bergakademie Freiberg  
D-09599 Freiberg  
peter@kausch-net.de
- Kennedy, David, C.Eng., MIMMM  
former Chief Executive Officer, Rareco  
Rare Earth Extraction Co. Ltd  
South Africa  
  
former Managing Director, Metals and Alloys,  
Great Western Minerals Group Ltd.  
Saskatoon, Canada  
dave\_kennedy@btinternet.com
- Kingsnorth, Prof. Dudley John  
Critical Materials Initiative  
Curtin Graduate School of Business  
78 Murray Street,  
Perth, Western Australia 6000  
dudley.kingsnorth@curtin.edu.au
- Klossek, Dr. Andreas  
Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcen-  
technologie, HZDR  
Halsbrücker Straße 34  
D-09599 Freiberg  
a.klossek@hzdr.de
- Large, Dr. Duncan, C.Eng, Ph.D.  
Consulting Economic Geologist  
Paracelsusstraße 40  
D-38116 Braunschweig  
duncan@exploregeo.eu
- Loser, Ulrich  
Geschäftsführer (CEO) von  
Loser Chemie GmbH  
Bahnhofstraße 10  
D-08134 Langenweißbach
- Matschullat, Prof. Dr. Jörg  
Direktor Interdisziplinäres Ökologisches  
Zentrum (IÖZ)  
  
Professur für Geochemie und Geoökologie  
Institut für Mineralogie  
Technische Universität Bergakademie Freiberg  
Brennhausgasse 14  
D-09596 Freiberg  
joerg.matschullat@ioez.tu-freiberg.de
- Mauss, Roland, lic. oec. HSG  
Finanzvorstand  
KMR Stainless AG  
Rheinstraße 97  
D-45478 Mülheim an der Ruhr  
mauss@oryxstainless.com
- Mischo, Prof. Dr.-Ing. Helmut, Pr. Eng.  
Professur für Rohstoffabbau und  
Spezialverfahren unter Tage  
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau  
Technische Universität Bergakademie Freiberg  
Fuchsmühlenweg 9  
D-09596 Freiberg  
Helmut.Mischo@mabb.tu-freiberg.de
- Palitzsch, Dr. Wolfram  
Prokurist / Technischer Leiter (CTO) von  
Loser Chemie GmbH  
Bahnhofstraße 10  
D-08134 Langenweißbach  
wolfram.palitzsch@loserchemie.de
- Posch, Prof. Dr. Peter N.  
Institut für Finanzwirtschaft, Universität Ulm  
Helmholtzstraße 18  
D-89081 Ulm  
peter.posch@uni-ulm.de  
  
Geschäftsführender Partner Mecore GmbH,  
Rindermarkt 7  
D-80333 München  
posch@mecore.com

Roewer, Prof. Dr. Gerhard  
Institut für Anorganische Chemie  
Technische Universität Bergakademie Freiberg  
Clemens-Winkler-Bau  
Leipziger Straße 29  
D-09596 Freiberg  
Gerhard.Roewer@chemie.tu-freiberg.de

Schebek, Prof. Dr. Liselotte  
Technische Universität Darmstadt  
Institut IWAR  
Fachgebiet Industrielle Stoffkreisläufe  
Petersenstr. 13  
D-64287 Darmstadt  
l.schebek@iwar.tu-darmstadt.de

Taylor, Dr. Patrick R.  
George S. Ansell Chair, Distinguished Professor  
of Chemical Metallurgy  
  
Director of Kroll Institute for Extractive  
Metallurgy  
George S. Ansell Department of Metallurgical  
and Materials Engineering  
Colorado School of Mines  
1500 Illinois Street  
Golden, Colorado 80401, USA  
prtaylor@mines.edu

Voigt, Prof. Dr. Wolfgang  
Professur für Anorganische Chemie  
Institut für Anorganische Chemie  
Technische Universität Bergakademie Freiberg  
Leipziger Straße 29  
D-09596 Freiberg  
Wolfgang.Voigt@chemie.tu-freiberg.de

Wellmer, Prof. Dr.-Ing. Friedrich-W.  
Präsident a. D. der Bundesanstalt für  
Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)  
Neue Sachlichkeit 32  
D-30655 Hannover  
fwellmer@t-online.de

Präsident a.D. des früheren Niedersächsischen  
Landesamtes für Bodenforschung (heute  
Teil des Landesamtes für Bergbau, Energie  
und Geologie, LBEG)

Wieck, Prof. Dr. Andreas Dirk  
Lehrstuhl für Angewandte Festkörperphysik  
Institut für Experimentalphysik  
Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstr. 150  
D-44780 Bochum  
andreas.wieck@rub.de

Weigand, Prof. Dr. Harald  
Technische Hochschule Mittelhessen  
University of Applied Sciences  
ZEuUS Kompetenzzentrum für Energie-  
und Umweltsystemtechnik  
Wiesenstraße 14  
D-35390 Gießen  
harald.weigand@zeuus.thm.de



# Teil 1

## Rohstoffwirtschaft



Bildquellen der vorangehenden Seite

*Großes Bild oben:* Ein Blick in den Tagebau der Phoenix Mine in Zypern; hier wird seit über 2000 Jahren Kupfer abgebaut. Foto: © Clemens Reimann

*Untere Bildreihe:* Szenen von Bergarbeitern vor Ort in Polymetallminen im Bundesland Minas Gerais, Brasilien. Fotos: © Jörg Matschullat



# 1 Substitution von Rohstoffen – Rahmenbedingungen und Umsetzung

*Liselotte Schebek und Beatrix F. Becker*

## 1.1 Einführung

Die Versorgung der Wirtschaft mit Rohstoffen, insbesondere mit technologisch bedeutenden Metallen, steht in den letzten Jahren wieder im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses. Schon in den 1970er Jahren wurde durch die berühmte Studie des Club of Rome „Grenzen des Wachstums“ (Meadows et al. 1972) die erste breite gesellschaftliche Diskussion über die Endlichkeit von Rohstoffen ausgelöst. Die damaligen Studienergebnisse wurden im öffentlichen Diskurs häufig dahingehend interpretiert, dass die Vorkommen von Metallen wie Nickel (Ni) oder Gold (Au) im Zeithorizont von 30 bis 50 Jahren zu Ende gehen würden. Die Tatsache, dass dies nicht eintrat, ist auch der missverständlichen Interpretation des Begriffes der statischen Reichweite zuzuschreiben: Dieser Begriff beruht auf den zu einem jeweiligen Zeitpunkt bekannten und wirtschaftlich zu fördernden Rohstoffvorkommen, die in Bezug zum aktuellen Verbrauch gesetzt werden (BMW 2006). Diese Begriffsdefinition berücksichtigt nicht, dass durch die Exploration neuer Vorkommen und durch die Entwicklung neuer kostengünstigerer Fördertechnologie die wirtschaftlich zu gewinnenden Rohstoffvorkommen laufend zunehmen. Heute nimmt man nur für einen einzigen Rohstoff an, dass die absolut auf der Erde vorhandenen Mengen überhaupt bekannt sind: Unter dem Schlagwort „Peak Oil“

(Hubbert 1956) wurden Untersuchungsergebnisse publiziert, die aufgrund der Ergebnisse der weltweiten Exploration möglicher geologischer Öllagerstätten die Gesamtmenge des verfügbaren Erdöls abschätzen und daraus die Schlussfolgerung ziehen, dass die Menschheit die Hälfte dieser Vorkommen bereits verbraucht habe oder dieser „Peak“ in den nächsten Jahren erreicht werden würde (IEA 2010).

Die Annahme, in 20 Jahren seien keine Rohstoffe mehr vorhanden, ist also offensichtlich nicht richtig. Ebenso falsch ist allerdings das Gegenteil, nämlich, dass die Sorge um Rohstoffsicherheit unbegründet sei. Die Gründe liegen aber weniger in der absoluten Verfügbarkeit von Rohstoffen auf der Erde. Die aktuellen Sorgen um die Rohstoffe speisen sich aus einer Reihe unterschiedlicher Motive. So werden u. a. immer mehr spezifische Metalle für Hochtechnologien benötigt. Diese spezifischen Metalle – ein prominentes Beispiel ist das Metall Indium (In), das für die Flüssigkristall-Produktion benötigt wird – werden häufig nur in geringer Menge gewonnen. Oft sind Vorkommen und/oder Produktion auf wenige Länder konzentriert. Daraus leitet sich die Besorgnis ab, dass bei Instabilität dieser Länder oder aus politischen Interessen ihrer Regierungen die Weltmarktversorgung abrupt gefährdet sein könnte. Auch ohne solche abrupten Versorgungsprobleme werden jedoch alleine vor dem Hintergrund steigender Nachfrage steigende Preise erwartet, die entsprechende Auswirkungen auf

1

die herstellende Industrie der Produkte mit solchen Rohstoffen haben werden. Über die ökonomische Betrachtung hinaus wird heute auch politisch die Frage gestellt, wie nachhaltig der Verbrauch nicht erneuerbarer Rohstoffe ist. Medienberichte weisen immer wieder darauf hin, dass Abbau vieler Rohstoffe unter inakzeptablen ökologischen, aber auch sozialen Randbedingungen erfolgt. Auch wenn dies von spezifischen Standorten und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen abhängig ist, so gibt es doch auch einen generellen Aspekt der Nachhaltigkeit, der Anlass zur Besorgnis gibt: Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen sind in den meisten Fällen energieintensiv und tragen so indirekt auch zum globalen Umweltproblem des Klimawandels bei.

Vor diesem Hintergrund hat sich heute eine neue Diskussion um Strategien für eine Rohstoffsicherung unter Beachtung von Grundsätzen der Nachhaltigkeit entwickelt. Zu diesen Strategien gehört auch die sogenannte Substitution von Rohstoffen. So formuliert die Bundesregierung in ihrer Rohstoffstrategie: *„Substitution trägt langfristig zur Flexibilisierung des Materialeinsatzes in den Verarbeitungsstufen der Wertschöpfungskette bei, und sie ermöglicht es, Knappheiten und physischen Versorgungsstörungen entgegenzuwirken sowie die Nachhaltigkeit durch Einsatz ökonomisch und ökologisch vorteilhafter Materialien zu fördern...“* (BMW 2010). Schon dieses Zitat lässt erahnen, dass die Strategie der Substitution von Rohstoffen eine Vielzahl möglicher Maßnahmen und unterschiedliche Ziele umfasst. Diese sollen im folgenden Beitrag herausgearbeitet und damit der Begriff der Substitution präzisiert werden.

## 1.2 Typen von Substitution

Der Begriff Substituieren wird im Duden erläutert als „an die Stelle von jemandem, etwas setzen, gegen etwas austauschen, ersetzen“.

Im Zusammenhang mit der Verwendung des Begriffs Substitution als Strategie der Rohstoffsicherung finden sich in der Literatur verschiedene Vorschläge einer Strukturierung. Ein Beispiel ist dazu in Abbildung 1.1 gezeigt: fünf Typen von Substitution im Kontext der Suffizienz- und Effizienzstrategie.

Zunächst ist die Materialsubstitution zu nennen, die sich dadurch auszeichnet, dass ein Material durch ein anderes ersetzt wird. Dabei kann es sich um ein bestimmtes Material an sich oder auch nur um einen chemischen Bestandteil eines Materials handeln. Ein Beispiel ist dazu im Wohnungsbau zu finden. Dort werden immer häufiger Kupferrohrleitungen (z. B. in der Fußbodentechnik) durch Rohre aus Kunststoff ersetzt (Angerer et al. 2009).

Die technologische Substitution betrachtet nicht nur einzelne Materialien, sondern zielt darauf ab, den gesamten Materialverbrauch innerhalb eines Herstellungsprozesses zu senken. Dies kann durch einen technologischen Fortschritt im Produkt oder eine Optimierung des Produktionsprozess erfolgen. Sicherergestellt werden muss dabei eine gleichbleibende Funktionalität des Produktes. Als Beispiel kann das Zuschneiden von Textil-Rohlingen durch Laser betrachtet werden. Werden die Schnittmuster optimiert und ineinandergelagt, so kann Material durch die Reduktion von Resten eingespart werden.

Bei einer funktionalen Substitution liegt der Fokus, wie der Name verdeutlicht, auf einer gleichbleibenden Funktion; unabhängig vom Produkt. Dabei wird ein existierendes Produkt durch die Einführung eines materialeffizienteren neuen Produktes ersetzt, das andersartig sein kann, aber dennoch die gleiche Funktionalität gewährleistet. Als Beispiel sind die sogenannten E-Book-Reader zu nennen. Durch die Möglichkeit der Digitalisierung von Büchern wird im Prinzip der Bücherschrank mit den vielen „Papierbüchern“ ersetzt. Gleichwohl sieht man an diesem Beispiel aber auch, wie problematisch die Definition zu sehen ist, da unter Umständen

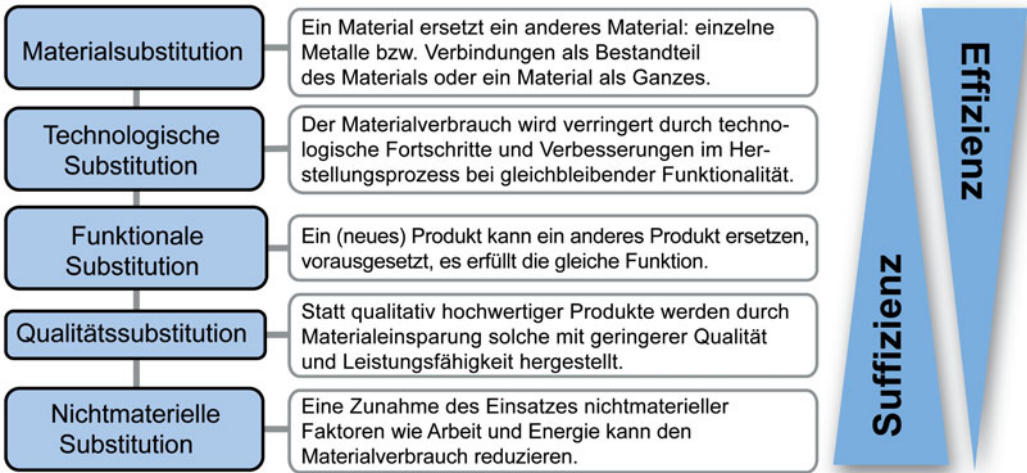


Abb. 1.1 Typen der Substitution (nach Ziemann u. Schebek 2010, nach Tilton 1983) und ihr Bezug zu Effizienz- und Suffizienzstrategie

gar kein vollständiger Ersatz aller Bücher stattfindet.

Ein weiterer Typ von Substitution ist die Qualitätssubstitution. Bei dieser Art von Substitution werden qualitativ hochwertige Produkte durch solche ersetzt, die durch Materialeinsparung qualitativ und leistungsfähig minderwertige Produkte sind. Dies wird vor allem in solchen Fällen angewandt, in denen aufgrund schneller Produktzyklen die Nutzungsdauer bei den Konsumenten kurz ist. Dies wird z.B. bei „Pappmöbeln“ deutlich. In einem anderen Kontext kann man auch folgendes Beispiel für eine Qualitätssubstitution nennen: So kann Niob (Nb) z.B. durch Molybdän (Mo) und Vanadium (V) in Stählen; durch Tantal (Ta) in Kondensatoren; Mo, Ta und Wolfram (W) durch Keramik in Hochtemperaturanwendungen substituiert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Substitute meist nicht an die Eigenschaften von Nb heranreichen (Angerer et al. 2009).

Im Gegensatz zu den ersten vier Arten der Substitution handelt es sich bei dem letzten Typ, der nichtmateriellen Substitution, um die

Reduzierung des Materialverbrauchs durch die Beeinflussung nichtmaterieller Komponenten wie Arbeitseinsatz oder Energieverbrauch.

Interessanterweise lassen sich die unterschiedlichen Typen der Substitution in der Anordnung nach Tilton (1983) in eine allgemeine Kategorisierung von Strategien einer nachhaltigen Entwicklung einordnen. Dieses sind die Strategien der Effizienz und Suffizienz. Während die Erstere darauf hinausläuft, bei unveränderter gesellschaftlicher Nachfrage Produkte möglichst effizient, d.h. mit wenig Rohstoff- und Energieverbrauch, bereitzustellen, liegt bei der Suffizienzstrategie der Schwerpunkt auf veränderten Verhaltensweisen und dem Ersatz materieller Produkte durch immaterielle Produkte oder auch immaterielle Werte. Während Material- und technologische Substitution klar auf Effizienz orientiert sind, lässt insbesondere die nichtmaterielle Substitution auch sehr viel weitergehende Überlegungen hinsichtlich eines veränderten Verhaltens im Umgang mit Produkten zu.

## 1.3 Wie erfolgt Substitution?

Wenn über Substitution als Maßnahme einer Rohstoffstrategie nachgedacht wird, so sollten zunächst vor allem drei zentrale Fragen beantwortet werden (Abb. 1.2). Warum, d. h. mit welchen Motiven oder mit welchen Zielsetzungen, soll überhaupt eine Substitution erfolgen? Wann, d. h. in welchem Zeithorizont, soll die Substitution umgesetzt werden? Zuletzt muss der Frage nachgegangen werden, wodurch eine Substitution erreicht werden kann.

Die Motivation für eine Substitution ist vielschichtig und wurde schon eingangs erläutert. Die Priorität dieser Motive muss geklärt werden, wenn beispielsweise im Unternehmen Entwicklungsvorhaben für eine Substitution initiiert werden sollen. Sollen Lieferabhängigkeiten vermieden werden? Soll von einem teuren auf ein preiswerteres Material umgestellt werden? Sollen Umweltauswirkungen, die bei der Rohstoffgewinnung, dem Herstellungsverfahren und dem Recycling des eingesetzten Materials entstehen, vermieden werden? Und spielen weitere Nachhaltigkeitsaspekte eine

Rolle für die Notwendigkeit einer Substitution?

Der (richtige) *Zeitpunkt* für den Beschluss einer Maßnahme zur Substitution kann nicht einheitlich festgelegt werden, vielmehr sind der Beginn und die Dauer eines Substitutionsprozesses abhängig von dem jeweiligen Produktlebenszyklus und der Dynamik am Markt. Zudem gilt es hierbei zu beachten, dass insbesondere die Vorlaufzeiten für die Umsetzung von Forschungsergebnissen aus der Materialforschung sehr lange sind, und dass dadurch teilweise Produktzyklen kürzer als die jeweiligen Werkstoffentwicklungsprojekte sein könnten. Die Vorlaufzeiten von der „Idee“ bis zur realen Markteinführung einer Innovation schwanken dabei zwischen Monaten und Jahren. Beispielsweise dauert eine Innovationsumsetzung für ein Mobiltelefon zwischen vier und sechs Monaten, für ein Auto muss ein Entwicklungszeitraum von zwei Jahren und bei einem Flugzeug zwischen sechs und neun Jahren kalkuliert werden (Behnke 2010).

Betrachtet man die Frage, *wodurch* ein Rohstoff substituiert werden kann und sollte, so müssen dazu die verschiedenen Arten von Rohstoffen sowie die einzelnen Restriktionen des Substituts betrachtet werden. Grundsätzlich kann hierbei der Ersatz primärer durch sekundäre Rohstoffe, nicht erneuerbare durch erneuerbare Rohstoffe und die Substitution von knappen hin zu weniger knappen Rohstoffen unterschieden werden (Tabelle 1.1). Jede dieser Möglichkeiten bietet spezifische Vorteile, besitzt aber auch Restriktionen hinsichtlich ihrer praktischen Umsetzbarkeit.

Bei primären Rohstoffen handelt es sich um Rohstoffe, die direkt aus der Natur gewonnen werden. Sekundärrohstoffe sind hingegen Rohstoffe, die aus Abfällen und durch Recycling gewonnen werden. Klassischerweise sind insbesondere Metalle gut recycelbar. Ein Beispiel für eine „Substitution durch Recycling“ (Schubert 2005) ist im Bausektor zu finden. Aus diesem kann beispielsweise Baustahl beim Abbruch von Gebäuden praktisch vollständig erfasst und rückgeführt werden. Allerdings

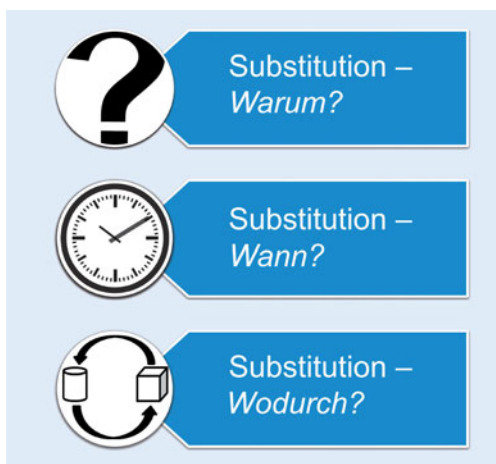



Abb. 1.2 Die drei Fragen nach Substitution

zeigen viele andere Beispiele, dass ein wesentlicher Schwachpunkt in der Erfassung von Altprodukten liegt. So geht man davon aus, dass in der EU durchschnittlich nur 2 % aller Alt-Handys erfasst werden und damit die überwiegende Menge der in Mobiltelefonen enthaltenen Rohstoffe überhaupt nicht einem Rohstoffkreislauf zugeführt wird (Wittmer 2012). Ein weiterer Aspekt, der bei der Substitution durch sekundäre Rohstoffe betrachtet werden muss, ist die Qualität der jeweiligen Sekundärmaterialien. So kann in Kreisläufen häufig ein bestimmter Anteil an Sekundärmaterialien aus qualitativen Anforderungen nicht überschritten werden. Beispielsweise ist bei der Herstellung hochwertiger Papiere der Anteil von Altpapier begrenzt. Beachtet werden muss bei der Substitution durch sekundäre Rohstoffe auch der ökonomische und ökologische Aufwand. Müssen bei der Rückgewinnung beispielsweise stark umweltbelastende Hilfsmaterialien wie Säuren oder ein hohes Maß an Energie eingesetzt werden, so kann eine Substitution den gegenteiligen Effekt bewirken; sie entlastet dann

zwar die Umwelt, indem Rohstoffe der Erde nicht entzogen werden, bewirkt aber gleichzeitig erhebliche ökologische Nachteile durch einen hohen umweltbelastenden Prozess. Ein Beispiel ist die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm oder Schlacken (z. B. Pinnekamp et al. 2011; ► Kap. 13).

Eine andere Zielsetzung ist die Substitution von nicht erneuerbaren Rohstoffen durch die sogenannten erneuerbaren Rohstoffe. Dies spielt insbesondere für Energieträger als Handlungsstrategie gegen den Klimawandel eine Rolle. Als Beispiel dazu kann der Ersatz von fossilen Kraftstoffen durch Bioethanol bzw. Biodiesel betrachtet werden. Gerade die aktuelle Diskussion um Biokraftstoffe zeigt aber eine zentrale Restriktion dieser Strategie: Nachwachsende Rohstoffe benötigen fruchtbares Land als Ressource. Diese Anbauflächen sind begrenzt; werden sie bereitgestellt, indem tropischer Regenwald mit Torfböden in landwirtschaftliche Flächen oder Plantagen umgewandelt wird, so werden im Gegenteil mehr Treibhausgasemissionen freigesetzt als durch

Tabelle 1.1 Substitution und Restriktionen

Substitut			Restriktionen
	Primäre Rohstoffe	Sekundäre Rohstoffe	Logistik der Erfassung von Abfällen
			Qualität von Sekundärmaterialien
			Ökonomischer und ökologischer Aufwand der Rückgewinnung
	Nicht erneuerbare Rohstoffe	Erneuerbare Rohstoffe	Verfügbare Landfläche
			Ökonomischer und ökologischer Aufwand der Produktion
	„Knappe“ Rohstoffe	„Weniger knappe“ Rohstoffe	Verfügbarkeit „weniger knapper“ Rohstoffe bei steigender Nachfrage
			Ökonomischer und ökologischer Aufwand der Produktion und Nutzung



1

Ersatz fossiler Treibstoffe eingespart werden (Heißenhuber 2011; Pastowski et al. 2007). Daneben müssen der ökonomische und ökologische Aufwand für Landwirtschaft, (Einsatz von Dünger, Pestiziden und Herbiziden sowie die ökologischen Auswirkungen des Maschineneinsatzes) und des Herstellungsprozesses der Produkte berücksichtigt werden. So ist die Herstellung von biobasierten Kunststoffen im Allgemeinen mit der Einsparung von Treibhausgasen verbunden, diese fallen allerdings unterschiedlich hoch aus, und im Fall von PHA (Polyhydroxyalkanoaten) wird sogar ein negativer Effekt diskutiert (Crank et al. 2005).

Als Letztes wird die Substitution von sogenannten „knappen“ Rohstoffen durch „weniger knappe“ Rohstoffe betrachtet. In dieser Motivation spiegelt sich auch die eingangs beschriebene Befürchtung abrupter oder langfristiger Verknappung durch politische Randbindungen als auch die Beobachtung steigender Nachfrage wider (► Kap. 6). Die Einordnung in „knappe“ Rohstoffe hängt grundsätzlich von beiden, sowohl von der Nachfrage als auch von der Verfügbarkeit des Rohstoffes ab. Die Nachfrage von Rohstoffen wird unter anderem von der Wirtschaftsleistung und dem -wachstum bestimmt. Besonders betroffen davon sind „Massenrohstoffe“ wie Eisen, Stahl, Kupfer etc. (Angerer et al. 2009). Dahingegen wird die Nachfrage nach „Spezialitäten“ wie Gallium (Ga), Indium (In), Neodym (Nd) etc. vorwiegend durch technologische Entwicklungen bestimmt (Angerer et al. 2009). Insbesondere die Nachfrage nach Platinmetallen (PGE), Silber (Ag), Tantal (Ta) etc. hängt sowohl vom Wirtschaftswachstum als auch von der technologischen Entwicklung ab (Angerer et al. 2009). Eine Substitution knapper Rohstoffe durch „weniger knappe Rohstoffe“ ist naturgemäß nur dann als sinnvoll zu erachten, wenn die Verfügbarkeit der „weniger knappen Rohstoffe“ auch bei wachsender Nachfrage sichergestellt ist. Diese Frage ist natürlich schwierig zu beantworten. Als Beispiel kann Ga genannt werden, das in Dünnschicht-Photovoltaikmodulen, in integrierten Schaltkrei-

sen und weißen Leuchtdioden eingesetzt wird (► Kap. 4). Durch die technologische Entwicklung dieser Innovationen wird der Ga-Bedarf im Jahr 2030 6-mal so hoch sein wie die Weltproduktionsmenge im Jahr 2009 (Angerer et al. 2009). Somit wächst die Ga-Nachfrage erheblich und könnte zukünftig als mögliches Substitut infrage gestellt werden. Neben der wachsenden Nachfrage und der Verfügbarkeit stellen auch bei dieser Substitution ökonomische und ökologische Aspekte mögliche Restriktionen für eine Substitutionsentscheidung dar. Sind die Kosten des Substituts nicht geringer oder steigen in absehbaren Zeitraum, so wird unter ökonomischen Betrachtungspunkten die Substitution unrentabel und somit zwecklos. Weiterhin müssen auch hier die ökologischen Auswirkungen der jeweiligen Rohstoffgewinnung betrachtet werden. Dazu werden die Eingriffe in die Natur durch den Rohstoffabbau, die Verhüttung und die Weiterverarbeitung zu den jeweiligen Werkstoffen/Vorprodukten des eingesetzten Materials dem Substitut gegenübergestellt und eine Substitutionsentscheidung dahingehend bewertet. Betrachtet man beispielsweise die Herstellung von 1 kg Ag, so ist der Beitrag zum Klimawandel deutlich höher als bei der Herstellung der gleichen Menge Blei (Ecoinvent 2007). In Tabelle 1.1 sind die verschiedenen Substitutionen sowie die zu betrachteten Restriktionen zusammenfassend aufgeführt.

## 1.4 Die Konsequenz: „Robuste Entscheidungsfindung“

Vor dem Hintergrund der geschilderten komplexen Problematik muss Substitution als strategische Entscheidungsfindung gesehen werden. Dies folgt schon aus den langen Vorlaufzeiten bis zur Umsetzung von Substitutionsmaßnahmen und der Markteinführung neuer

Produkte. Weiterhin ist die Systembetrachtung, der im letzten Abschnitt geschilderten Randbedingungen, sowie der Notwendigkeit einer multikriteriellen Betrachtung des Problems miteinzubeziehen. Zielführend für eine erfolgreiche Substitution ist daher eine „robuste Entscheidung“, die am Ende eines strukturierten Entscheidungsfindungsprozesses steht.

Unter einer robusten Entscheidung wird dabei eine solche verstanden, „die eine hohe Elastizität auf dem Weg zum Ziel ermöglicht“ (Popp u. Schüll 2009). Derartige Entscheidungen sind auch noch dann „tragfähig und können nachjustiert werden, wenn einzelne Aspekte neu auftauchen oder neu bewertet werden“ (Popp u. Schüll 2009). Es ist dabei leicht nachzuvollziehen, dass die Entscheidung umso schwieriger wird, je weiter sie in die Zukunft weist (Popp u. Schüll 2009).

Was kann eine „robuste Entscheidung“ hinsichtlich einer Substitutionsmaßnahme bedeuten? Grundsätzlich muss der Entscheidungsprozess sowohl die „Materialebene“ als auch die „Produktebene“ umfassen, um einen Überblick über alle Einflussgrößen für eine Substitution zu erlangen und im Ergebnis eine bestmögliche und „durchdringende“ Wirkung von Substitutionsmaßnahmen im Hinblick auf die angestrebten Ziele erreichen zu können. Hierzu bieten sich Methoden der Systemanalyse als zusätzliches Hilfsmittel an, die Informationen zu Stoffstromsystemen von Rohstoffen und zur Verortung von Umwelt und Kosten im Produktlebenszyklus ermöglichen.

Zunächst müssen die langfristigen Trends der Verfügbarkeit sowohl von Primärmaterialien als auch von Sekundärmaterialien betrachtet werden. Dazu ist eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung der Materialien unerlässlich. Materialflussanalysen dienen der Information über alle Materialflüsse und Lager innerhalb eines bestimmten Systems. Es handelt sich dabei um die systematische Bewertung bestimmter Materialien innerhalb eines Systems, welches räumlich und zeitlich definiert ist. Durch Bilanzierung von Input

(Materialflüsse, die in das System fließen) und Output (Materialflüsse, die aus dem System ausscheiden), können Abfälle und Umweltbelastungen sichtbar gemacht werden und die jeweilige Quelle, aber auch Potenziale der einzelnen Materialien identifiziert werden (Brunner u. Rechberger 2004).

Im Hinblick auf eine detaillierte Produktbetrachtung muss eine Analyse der vollständigen Prozesskette, d.h. „von der Wiege bis zur Bahre“ – also eine ganzheitliche Betrachtung, durchgeführt werden. Diese beinhaltet die Rohstoff- und Energieträgergewinnung, die Herstellung der Zwischenprodukte, die Herstellung des Endproduktes, die Gebrauchs- bzw. Verbrauchs-/Nutzungsphase, die Beseitigung und Verwertung sowie alle dazwischenliegenden Transportschritte des materiellen Produktes (Klopfer u. Grahl 2009). Dafür können Lebenszyklusanalysen (*Life Cycle Assessment*, Ökobilanz) herangezogen werden. Die Methodik der Lebenszyklusanalyse ist in der DIN EN 14040 und 14044 definiert und dient dazu, Umweltaspekte und -wirkungen von Produktsystemen zu analysieren. Dabei werden für die Erstellung einer Lebenszyklusanalyse vier Schritte durchlaufen: Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung. Dadurch werden verschiedene Einflussgrößen deutlich. Dazu gehören die gesamtgesellschaftlich wichtigen Aspekte der Nachhaltigkeit, die Auswirkungen auf die Umwelt hinsichtlich des Energieverbrauches und den Auswirkungen auf das Klima, die Landnutzung sowie Effekte auf regionale Ökosysteme. Aufbauend darauf kann die Durchführung einer Lebenszyklusanalyse Aspekte über die ökonomische und soziale Entwicklung (*Life Cycle Costing*, *Social Life Cycle Assessment*) im Hinblick auf einer Inter-/Intragenerationengerechtigkeit liefern.

Durch die Sichtbarmachung verschiedener Einflussfaktoren ist es daher möglich, verschiedene Entwicklungsmöglichkeiten zu betrachten, die dann zu einer „robusten Entscheidungsfindung“ für eine Substitution führen.

## 1.5 Ein Anwendungsbeispiel – Flexifuel in Brasilien

Im Hinblick auf die oben beschriebenen Anforderungen an eine robuste Entscheidung, „die eine hohe Elastizität auf dem Weg zum Ziel ermöglicht“ und nachjustierungsfähig ist (Popp u. Schüll 2009), soll im Folgenden die Technologie der „Flexible Fuel Vehicles“ in Brasilien beschrieben werden.

Mit dem Programm „Proálcool“ fördert Brasilien seit den früheren 1980er-Jahren den Einsatz von Bioethanol mit dem Ziel, dieses als Substitut für fossile Treibstoffe zu nutzen. Dabei wird als Rohstoff für den „neuen“ Kraftstoff Zuckerrohr verwendet, das in ausreichenden Mengen im eigenen Land angebaut wird. Durch staatliche Fördermaßnahmen und die hohen Preise für Rohöl fand das Substitut eine hohe Akzeptanz, und ein Anstieg des Verkaufes von (reinen) Ethanol-Autos konnte beobachtet werden (Abb. 1.3). Die Technologie dieser Kraftfahrzeuge ließ dabei ausschließlich reines Bioethanol als Treibstoff zu. Dies führte Ende 1980er-/Anfang 1990er-Jahre zu schwerwiegenden Konsequenzen. Die weltweit fallenden Rohölpreise und der gleichzeitigen Anstieg der Weltmarktpreise für Zucker

führten zu einem sinkenden Ethanol-Angebot im Land und zu einer entsprechenden Preiserhöhung für den substituierten Rohstoff. Der Verkauf reiner Ethanol-Autos fiel drastisch, sodass bis Ende der 1990er-Jahre lediglich 1 % der Neuzulassungen in Brasilien Ethanol-Autos waren. Mit dem wiederkehrenden Anstieg der Rohölpreise ab 2000 fielen gleichzeitig die Ethanol-Produktionskosten, sodass das Bioethanol in Brasilien wieder an Attraktivität gewann.

Es wurde deutlich, dass trotz Substitution von fossilen Treibstoffen eine Abhängigkeit von Rohöl bzw. den Rohölpreisen existierte. Die Substitution war zu „starr“ und ungenügend für eine vollständige Unabhängigkeit von fossilen Rohstoffen.

Als „robuste Lösung“ wurde 2003 die neue Technologie des kraftstoffflexiblen Fahrzeugs eingeführt. Diese Technologie erlaubt es, Fahrzeuge sowohl mit dem fossilen Treibstoff (Benzin) als auch mit und Ethanol zu betreiben. Dadurch konnte eine Flexibilität gegenüber weltweitem Angebot und Nachfrage der verschiedenen Treibstoffarten und aktuellen Rohstoffpreisen erreicht werden. Im Jahre 2010 machten diese „Flexible Fuel Vehicles“ einen Neuzulassungsanteil von über 95 % in Brasilien aus (Abb. 1.3).

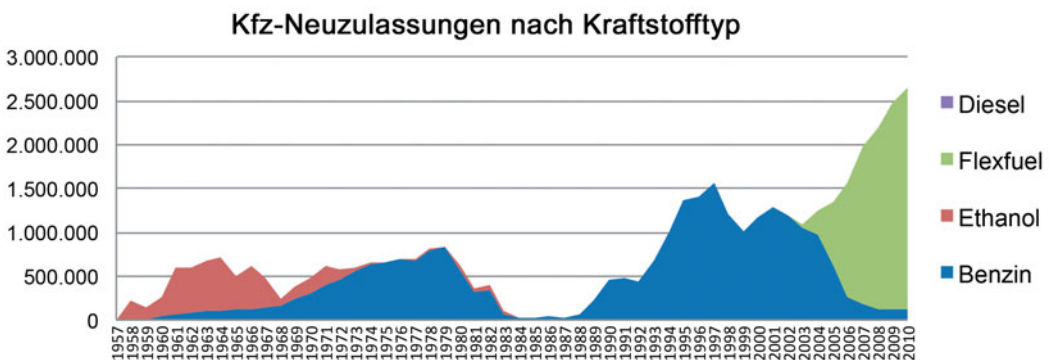


Abb. 1.3 Registrierung von neuen Automobilen nach Kraftstoffart in Brasilien (nach Anfavea 2011)



Der Grundgedanke, fossile Kraftstoffe zu substituieren, erwies sich per se als richtig. Jedoch wurde deutlich, dass diese Entscheidung „nachjustiert“ werden musste, als das Problem der fallenden Rohölpreise auftauchte. Wenn man den Zusammenhang zwischen den einzelnen Rohstoffen schon vor der Einführung des „reinen Ethanol-Substituts“ aufgeführt hätte, so wäre es gar nicht erst zu dieser Substitutionsentscheidung gekommen. Vielmehr hätte man bereits am Anfang erkennen können, dass die Substitution durch eine flexiblere Technik unterstützt werden müsste.

Hinsichtlich einer Nachhaltigkeitsbewertung ergaben Ökobilanzen, dass aufgrund der guten klimatischen Bedingungen gerade Ethanol aus Zuckerrohr besonders günstig hinsichtlich der Einsparung von Treibhausgasen ist (Zah et al. 2007). Allerdings muss für eine nachhaltige Nutzung sichergestellt sein, dass keine indirekten Landnutzungsänderungen auftreten. Die weitergehende Umsetzung und insbesondere eine Rolle von Brasilien als Akteur ist daher unter diesem Vorbehalt zu sehen.

## Quellenverzeichnis

- Anfavea (2011) Brazilian Automotive Industry Yearbook 2011
- Angerer G, Lorenz E, Marscheider-Weidemann F, Scharp M, Lüllmann A, Handke V, Marwede M (2009) Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI. Fraunhofer IRB Verlag; Stuttgart
- Behnke E (2010) Innovationsmanagement in Netzwerken: Analyse und Handlungskonzept zur kollektiven Innovationsgenerierung. Peter Lang Internationaler Verlag der Wissenschaften; Frankfurt
- BMW (2006) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Arbeitsgruppe Energierohstoffe. Abteilung II. Kurzbericht zur Verfügbarkeit und Versorgung mit Energierohstoffen
- BMW (2010) Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie Oktober 2010; Berlin
- Brunner PH, Rechberger H (2004) Practical handbook of material flow analysis. Lewis Publishers; United States of America
- Crank M, Patel M, Marscheider-Weidemann F, Schleich J, Hüsing B, Angerer G, Wolf O (eds; 2005) Techno-economic feasibility of large-scale production of bio-based polymers in Europe. Institute for Prospective Technological Studies (IPTS)
- Ecoinvent (2007) Ecoinvent Report Nr. 10. Live Cycle Inventories of Metals. Dübendorf
- Heißenhuber A (2011) Biobrennstoffe und grüne Energie. In: Kausch P, Bertau M, Gutzmer J, Matschullat J (Hrsg) Energie und Rohstoffe. Gestaltung unserer nachhaltigen Zukunft. 10: 119–133. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Hubbert MK (1956) Nuclear energy and the fossil fuels. Shell Development Company, Houston, Texas
- IEA (2010) International Energy Agency: World Energy Outlook 2010. p. 127
- Klöpfer W, Grahl B (2009) Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Wiley-VCH Verlag, Weinheim
- Meadows DH, Meadows DL, Randers J, Behrens WW (1972) Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Aus dem Amerikanischen von Hans-Dieter Heck. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart
- Pastrowski A, Fishedick M, Arnold K, Biege K, von Geibler K, Merten F, Schüwer D, Reinhardt G, Gärtner SO, Münch J, Rettenmaier N, Kadelbach S, Barthel D (2007) Sozial-ökologische Bewertung der stationären energetischen Nutzung von importierten Biokraftstoffen am Beispiel von Palmöl. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Wuppertal

1

- Pinnekamp J, Everding W, Gethke K, Montag D, Weinfurter K, Sartorius C (2011). Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland. Aachen: Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen
- Popp R, Schüll E (2009) Zukunftsforschung und Zukunftsgestaltung. Beiträge aus Wissenschaft und Praxis. Springer Verlag, Heidelberg
- Schubert T (2005) Geostandpunkt Rohstoffe. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Geozentrum Hannover
- Tilton JE (1983) Material substitution: lessons from tin-using industries. Resources for the Future; Washington, D. C.
- Wittmer D (2012) Potenziale für Elektroschrott in der EU – ein Ausblick. Vortrag im Rahmen der IWAR-Vortragsreihe am 19.11.2012, TU Darmstadt
- Zah R, Böni H, Gauch M, Hirsch R, Lehmann M, Wäger P (2007) Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen. Empa Abteilung Technologie und Gesellschaft, St. Gallen, Schweiz
- Ziemann S, Schebek L (2010) Substitution knapper Metalle – ein Ausweg aus der Rohstoffknappheit? Chemie Ingenieur Technik 11: 1965–1975; Wiley-VCH Verlag

## Kernaussagen

- Der Verfügbarkeit von Hightech-Metallen muss mehr Beachtung geschenkt werden.
- Strategien zur Rohstoffsicherung beinhalten auch die Substitution von Rohstoffen.
- Substitution bedeutet: Ersatz primärer durch sekundäre, nicht erneuerbare durch erneuerbare und knappe durch weniger knappe Rohstoffe.
- Die Substitution muss als eine strategische Entscheidungsfindung mit längeren Vorlaufzeiten gesehen werden. Deswegen sind robuste Entscheidungsfindungen sinnvoll.
- Materialflussanalysen und die vollständige Analyse der gesamten Prozesskette helfen, die verschiedenen Einflussfaktoren sichtbar zu machen und entsprechende Maßnahmen durchzuführen.

# 2 Thales: Strategische Rohstoffe

*Bertrand Demotes-Mainard*

Das Geschäft mit technischen Produkten hängt zunehmend von Rohstoffen wie Gallium (Ga), Lanthan (La) und Neodym (Nd) ab. Die Verfügbarkeit dieser oder anderer Schlüsselmetalle beruht jedoch auf komplexen und häufig störanfälligen Versorgungsketten. Dieser Beitrag diskutiert die wesentliche Rolle von kritischen Rohstoffen. Er legt dar, wie Versorgungsrisiken bewertet werden und wie engere Kooperation einem Unternehmen hilft, Risiken zu minimieren und Chancen zu maximieren.

Strategische Rohstoffe haben eine grundlegende Bedeutung in vielen heute innovativen Techniken, so z.B. bei Hochleistungs-LED-Beleuchtung, Windkraftanlagen, Hybrid-Fahrzeugen und Smartphones. Der langfristige Bedarf an strategischen Rohstoffen aller Art wächst kontinuierlich. Dazu zählen nicht nur Seltene Erden (SEE) mit den Lanthaniden, Yttrium (Y) und Scandium (Sc), sondern auch eine Anzahl von vergleichsweise seltenen Elementen, die weit über das periodische System der Elemente verteilt sind, wie Gallium (Ga), Germanium (Ge) und Indium (In) – Abb. 2.1.

Der größte Teil dieser strategischen Rohstoffe wird in der Produktion von Konsumgütern für die Bereiche Elektrotechnik, Telekommunikation, Elektrofahrzeuge und erneuerbare Energie eingesetzt. Sie spielen jedoch auch eine wichtige Rolle bei Produkten für die Sicherheit und besonders im Bereich der Verteidigung sowie der Luft- und Raumfahrt.

## 2.1 Wie Thales kritische Rohstoffe verwendet

Thales ist ein weltweiter Technologieführer und liefert Produkte, Lösungsvorschläge und Dienstleistungen für Luft- und Raumfahrt, Verteidigung, Sicherheit, Weltraum und Transport. Die Gesellschaft beschäftigt weltweit mehr als 67.000 Mitarbeiter und hat Betriebe in 56 Ländern. Die Erlöse lagen 2012 über 14 Milliarden Euro.

Seltene Erden und andere kritische Rohstoffe sind wichtige Bestandteile in vielen elektronischen Produkten und Systemen, die von Thales hergestellt werden. Im Verteidigungsbereich sind Komponenten, die kritische Metalle wie Gallium (Ga) enthalten, unerlässlich für die Produktion fortschrittlicher Abtast- und Auswertetechniken, mit denen die Streitkräfte unterstützt werden. Galliumarsenide (GaAs) und zunehmend Galliumnitrid (GaN) werden in zentralen elektronischen Anwendungen eingesetzt. Dazu vier Beispiele:

- Kritische Metalle sind ein wesentlicher Bestandteil der hochauflösenden Kameras von Thales, die mit Quantentopf-Infrarot-Photodetektor (QWIP) arbeiten, um eine verbesserte Fernüberwachung auf große Entfernungen und bei einem Umfeld mit harten Bedingungen zu erreichen. Diese Kameras ermöglichen es dem

## 2

Personal, nicht nur Bilder in der Dunkelheit aufzunehmen, sondern auch durch Hindernisse wie Rauch, Vegetation und Sichtschutz hindurchzusehen.

- Thales Echolotsysteme sind auf Bauteile angewiesen, die kritische Rohstoffe enthalten. Diese Komponenten können das breite Spektrum von Frequenzen erzeugen, die notwendig sind, um Bedrohungen – wie Minen oder Unterseeboote – schnell zu erkennen, und das bei hoher Treffsicherheit. Thales innovative Echolotsysteme werden weltweit von der Schifffahrt, insbesondere der Marine, intensiv genutzt.
- Im Flugzeugbau liefert Thales die komplette Elektronik für das Kampfflugzeug Dassault Rafale, einschließlich des RBE2 Radarsystems, das dem neuesten Stand der Technik entspricht. Hier wird die „Active Phased Array Radar“-Technik (AESA) eingesetzt; ein Radarsystem mit aktiver Strahlschwenkung. Dies steigert die Effektivität und beseitigt die Notwendigkeit, energieverbrauchende bewegte Teile einzusetzen. Auch diese technische Lösung wurde durch den Einsatz strategischer Rohstoffe ermöglicht.
- Kritische Rohstoffe sind ebenfalls für die Raumfahrt zwingend notwendig. Dabei erfordern starke Temperaturschwankungen und hohe elektromagnetische Strahlung den Einsatz elektronischer und optischer Komponenten mit nachgewiesener Belastbarkeit. Die Pléiades-Beobachtungssatelliten, die in 700 km Entfernung von der Erde im Orbit kreisen, verwenden höchstauflösende bildgebende Instrumente (VHR), die von Thales Alenia Space gebaut wurden. In einem solchen Satelliten enthält jedes Bauteil kritische oder semikritische Rohstoffe – von Präzisionsspiegeln über optische Geräte bis hin zu den Batterien, die für die notwendige Energie an Bord sorgen.

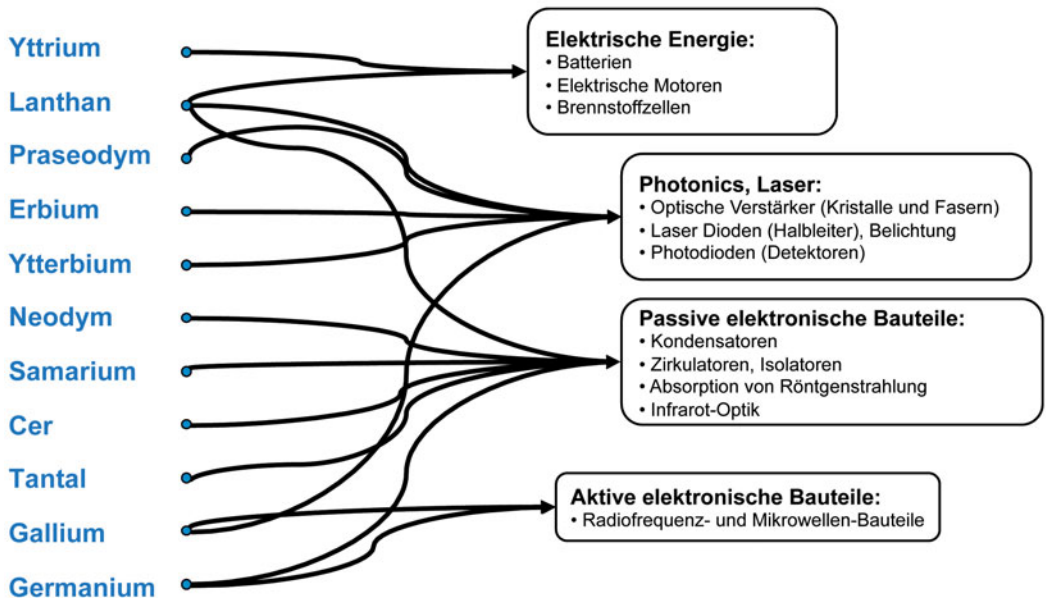


Abb. 2.1 Seltene Erden und ihre Anwendungen. Quelle: © Thales all rights reserved

## 2.2 Fokus auf Gallium

Alle elektronischen Produkte oder Lösungskonzepte, die von Thales entworfen und gebaut wurden und werden, können viele Jahre zu ihrer Entwicklung benötigen. Wenn sie jedoch eingesetzt werden, müssen sie den Test für eine lange Nutzungsdauer auch unter härtesten Einsatzbedingungen bestehen. Die Auswahl der richtigen Materialien ist entscheidend, da viele Systeme einen Lebenszyklus von 25 und mehr Jahren haben; im Gegensatz zu Verbrauchsgartikeln wie z. B. Mobiltelefonen mit einem Lebenszyklus von ca. 18 Monaten.

Galliumarsenid (GaAs) ist eines dieser Materialien, das die Anforderungen nach hoher Effizienz und langen Standzeiten erfüllt. Es kann auf eine über 50-jährige Erfolgsgeschichte in der elektronischen Anwendung verweisen (Lowen u. Rediker 1960). Komponenten und Verbindungshalbleiter, die aus GaAs hergestellt wurden, zeigen die gewünschten elektronischen und physikalischen Eigenschaften:

1. Komponenten und integrierte Schaltkreise aus GaAs sind schneller als ihre Siliziumbasierten Konkurrenzprodukte; und damit bestens geeignet für Hochfrequenz-Schaltungen. Der Rauschpegel ist niedrig, d. h., GaAs-Komponenten sind besonders dort gut einzusetzen, wo schwache Signale verstärkt werden müssen.
2. Gallium (Ga) hat sehr wertvolle optoelektronische Eigenschaften; verbunden damit, Licht zu erkennen und auszusenden. GaAs kann also gut eingesetzt werden, um Laser, Licht emittierende Dioden (LEDs) und hocheffiziente Solar-Kollektoren zu bauen. GaAs ist auch hoch widerstandsfähig gegen Strahlung; und damit auch für Weltraumeinsätze geeignet.

Obwohl Gallium (Ga) in der Natur häufig vorkommt, ist es dennoch ein seltenes Element. Wie andere strategische Rohstoffe auch, tritt Ga meist nur in Konzentrationen von

30–100 mg kg<sup>-1</sup> auf, sodass ein Bergbau allein auf Ga nicht wirtschaftlich ist (► Kap. 6). Der größte Anteil des produzierten Galliums stammt als Nebenprodukt aus der Aluminiumerzeugung. Rund 200 t werden jährlich produziert, vorwiegend in China.

Mehr als 95 % des im Markt angebotenen Galliums werden für die Produktion von Halbleitern und anderen Komponenten gebraucht; dennoch haben die Firmen keinen direkten Zugang zum elementaren Gallium. Das für die Komponentenherstellung benutzte GaAs wird synthetisch aus elementarem Gallium (Ga) und Arsen (As) von spezialisierten Firmen hergestellt. Diejenigen Betriebe, die elektronische Komponenten selbst herstellen, kaufen GaAs normalerweise direkt als Barren und nicht das reine Element Ga.

Gallium ist nur ein Beispiel für ein Element, das generell als kritisch bezeichnet wird. Welches sind nun die Kriterien, die uns ein Metall als kritisch einstufen lassen, und wer entscheidet das?

## 2.3 Kritische Metalle

In den letzten sechs Jahren erfolgte eine deutliche Neubewertung der Versorgungsrisiken für alle Rohstoffe. Ereignisse wie z. B. die Ölpreisspitze von 2008, oder die 2009 erfolgte Ankündigung Chinas, die Exporte für Seltene Erden zu drosseln (Levkowitz u. Beauchamp-Mustafaga 2010; ► Kap. 3 u. 8), führten dazu, dass die Versorgungssicherheit zu einer fundamentalen politischen Frage in Europa und anderen Teilen der Welt wurde. Steigende Nachfrage nach Seltenen Erden und anderen seltenen Rohstoffen haben den Fokus auf die Versorgungssituation verstärkt.

„Kritisch“ bedeutet für jeden etwas anderes. Es ist zumindest im nationalen Rahmen eine subjektive Beurteilung, spezifische Metalle als kritisch einzustufen. Es gibt keine internationale Übereinstimmung darüber, welche Metalle kritisch sind, und ebenso sind Bewertungen der

## 2

Kritikalität notwendigerweise landesspezifisch. Regierungsangaben basieren normalerweise auf geopolitischen und makroökonomischen Betrachtungen. Hierin eingeschlossen sind politische und ökonomische Stabilität der Lieferanten, Mangel oder Engpass bei Ersatzstoffen, geringe Recyclingquoten und nur zu einem geringeren Anteil die physische Knappheit.

In der Europäischen Union werden nicht-energetische Rohstoffe als kritisch bezeichnet, wenn das Risiko eines Mangels und daraus folgende Auswirkungen auf die Wirtschaft oder einen spezifischen Sektor höher sind, als es bei den meisten Rohstoffen üblich ist (EC 2010). Die Europäische Kommission benennt folgende Rohstoffe als kritisch: Antimon (Sb), Beryllium (Be), Cobalt (Co), Flussspat ( $\text{CaF}_2$ ), Gallium (Ga), Germanium (Ge), Graphit (C), Indium (In), Magnesium (Mg), Niob (Nb), Tantal (Ta) und Wolfram (W). All diese Rohstoffe werden fast ausschließlich außerhalb Europas produziert. Die sogenannten PGEs (Platingruppenelemente) und die SEE (Seltenerdelemente) gehören ebenfalls dazu (Tabelle 2.1), womit die Gesamtzahl der kritischen Rohstoffe auf 35 ansteigt.

**Tabelle 2.1** Elemente der Platingruppe und der Seltenen Erden mit erhöhtem Versorgungsrisiko

Platingruppen- elemente (PGE)	Seltenerdelemente (SEE)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Platin (Pt)</li> <li>• Palladium (Pd)</li> <li>• Iridium (Ir)</li> <li>• Rhodium (Rh)</li> <li>• Ruthenium (Ru)</li> <li>• Osmium (Os)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yttrium (Y)</li> <li>• Scandium (Sc)</li> <li>• Lanthaniden: Lanthan (La) Cer (Ce) Gadolinium (Gd) Terbium (Tb) Dysprosium (Dy) Holmium (Ho) Erbium (Er) Thulium (Tm) Ytterbium (Yb) Lutetium (Lu)</li> </ul>

In den USA führte die Entscheidung, saubere Energietechniken als Teil des Konjunkturprogramms zu behandeln, zu einer ähnlichen Bewertung der kritischen Metalle: die sogenannten grünen Energietechniken (Windkraftanlagen, Solarmodule, bis hin zu Niedrigenergie-Leuchtmitteln) sind von Seltenen Erden abhängig. Vierzehn Metalle werden von dem US Department of Energy (DOE) als kritisch eingestuft; sechs davon werden als kurzfristig kritisch betrachtet (DOE 2011): Neodym (Nd), Dysprosium (Dy), Yttrium (Y), Europium (Eu), Indium (In) und Terbium (Tb).

Einige Organisationen haben eine umfassendere Sichtweise auf die potenziell Rohstoffe betreffenden Risiken. Die Liste des Geologischen Dienstes von Großbritannien (BGS) bewertet mehr als 40 Rohstoffe mit einem relativen Versorgungsrisiko – einschließlich allerdings von strategischen Massenmetallen wie Eisenerz, Aluminium (Al), Zink (Zn) und Kupfer (Cu); diese letztgenannten Metalle werden jedoch derzeit mit einem geringen Risiko eingestuft (BGS 2012).

## 2.4 Einschätzung des Risikos von Versorgungsketten

Industrielle Nutzer kritischer Metalle erwarten zwei besondere Herausforderungen: 1. und am wichtigsten die Verfügbarkeit und 2. der Preis. Verfügbarkeit und Preise werden von ökonomischen, regulatorischen und technischen Kenngrößen bestimmt, die letztlich alle miteinander verbunden sind; und jede einzelne dieser Größen kann die Versorgungskette kräftig stören.

Kritische Sachverhalte können sich sehr schnell entwickeln, z. B., wenn Exportstaaten die Lieferströme verändern (Verminderung bis zu Ausfall), Spekulationen die Preise treiben, oder technische Veränderungen zu Marktengpässen führen (BRGM 2012). Da nur kleine Mengen der kritischen Rohstoffe produziert werden und die Anzahl der Produzenten gering ist, reagiert der Markt rasch auch auf plötzliche und erhebliche Veränderungen.



Risiken werden ferner durch die Länge und die Komplexität der Versorgungskette verursacht. Typische Störungsverursacher können Bergbau, Rohstoffhändler, Verarbeiter von Konzentraten, Schmelzhütten, Hersteller von speziellen Produkten wie Barren, Halbleiterscheiben, Kristallen, Halbleitern und Endprodukthersteller sein. Versorgungsketten sind nur so stark wie das schwächste Glied der Kette, deshalb ist ein konstantes Beobachten zwingend notwendig (Abb. 2.2).

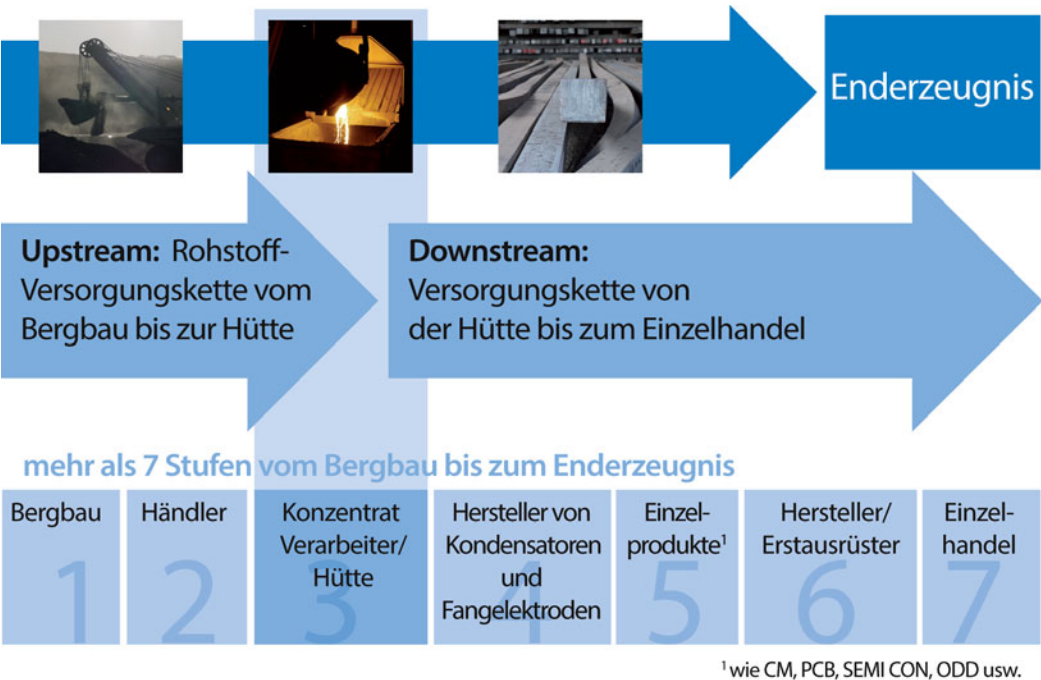
### Geopolitische Hemmnisse

Bergbau und Produktion strategischer Rohstoffe sind auf wenige Orte weltweit konzentriert. China z. B. produziert mehr als 90 % aller Seltenen Erden; und etwa die Hälfte davon wird

an einem Ort, Bayan Obu, im Norden des Landes produziert. Trotz jüngster Erleichterungen bleiben die Seltenen Erden mit Exportquoten belegt (► Kap. 3 und 8; Abb. 2.3).

### Marktbegrenzungen

Der Markt der Seltenen Erden und auch der anderer strategischer Metalle ist nicht transparent (EC 2011). Während Massenmetalle wie Kupfer (Cu), Blei (Pb) und Aluminium (Al) öffentlich und nachvollziehbar gehandelt werden, gilt dies nicht für seltene Metalle. Es gibt hier kein Pendant zur Londoner Metallbörse (LME) für Elemente wie Gallium (Ga) und Germanium (Ge). Damit stehen keine der Mechanismen des Risikomanagements zur Verfügung, wie sie üblicherweise von Käufern angewendet werden,



**Abb. 2.2** Eine vielschichtige Versorgungskette. Jede Veränderung kann Leistung und/oder Sicherheit des Systems beeinflussen. Daher müssen Veränderungen stetig überwacht werden. Zudem ist eine Requalifizierung zwingend notwendig, wenn Material oder Prozesse verändert werden. Fotos: © Jörg Matschullat

2

so die Möglichkeit, Futures oder Optionen zu erwerben oder Verträge gegen ungünstige Preisentwicklungen abzuschließen (Abb. 2.3).

### Die Auswirkungen der Lagerhaltung

Die Verfügbarkeit und das Preisgefüge werden durch Lagerhaltung von Firmen oder im Auftrage des Staates beeinflusst, um wirtschaftliche und sicherheitsrelevante Ziele zu verfolgen. Diese Lagerhaltung ist zu gleichen Teilen Ursache und Folge der Knappheit und der Preisschwankungen. Eine solche Lagerhaltung wird von China, Japan, den USA und Südkorea durchgeführt. Verlässliche Angaben über die genaue Zusammensetzung, Größe und Freigabebestimmungen für nationale Lager sind begrenzt (Abb. 2.3).

### Asynchrone Investitionszyklen

Wie bei allen Rohstoffen reagiert die Produktion kritischer Metalle sehr sensibel auf Preisschwankungen. Hohe Preise führen zu hohen Investitionen und Überschussproduktion, was wiederum zu Preisverfall und möglichen Verlusten für Produzenten und Verarbeiter führt und damit zu einer verminderten Produktion. Dieses Grundprinzip wird zusätzlich durch makroökonomische Faktoren verstärkt und durch die Tatsache, dass es Jahre dauern kann, bis neue Kapazitäten für Bergbau und Verarbeitung in Betrieb gehen (Abb. 2.3).

### Einfluss von Regulierungen

Staatliche Regulierungen erzeugen Unsicherheiten. Gesundheits-, Umwelt- und Energiegesetzgebung beeinflussen die gesamte Versorgungskette, von der Bergbauproduktion bis zum Verbrauchsprodukt und dem eventuellen

Recycling. Auch zwischen den Zielen der Politik gibt es Spannungen. So ist z. B. eine Energiepolitik, die den Einsatz erneuerbarer Energien vorschreibt, uneins mit einer Gesundheits- und Umweltgesetzgebung, die den Einsatz kritischer Metalle, die für diese Techniken notwendig sind, eingrenzt. Obendrein behindern nationale Export- und Importkontrollen den internationalen Verkauf von bestimmten kritischen Metallen und Produkten. Diese Regeln werden kontinuierlich ergänzt (Abb. 2.3).

### Störende Innovationen

Laufend entstehen neue Anwendungen für Seltene Erden und andere kritische Rohstoffe. Dies ist eine Herausforderung, da eine anscheinend stabile Nachfrage zu schnellen Marktstörungen führen kann. Die Veränderung des Massenmarktes von Ressourcen bleibt eine Kernfrage für den unbeständigen Markt kritischer Materialien.

## 2.5 Wie Thales mit dem Risiko umgeht

Die Fähigkeit einer einzelnen Firma, einen bedeutenden Einfluss auf lange und komplexe Versorgungsketten auszuüben, ist eindeutig begrenzt. Dies gilt ganz besonders für die Luftfahrt- und die Verteidigungsindustrie. Im Vergleich zu Gesellschaften, die schnelllebige Verbrauchsartikel erzeugen wie Smartphones und Elektrofahrzeuge, verbraucht die Produktion von Verteidigungsgütern nur geringe Mengen kritischer Rohstoffe – und damit ist ihr Einfluss auf den freien Markt sehr gering.

Um die Risiken zu verringern und die Chancen zu vergrößern, die mit den kritischen Metallen eng verbunden sind, bildet



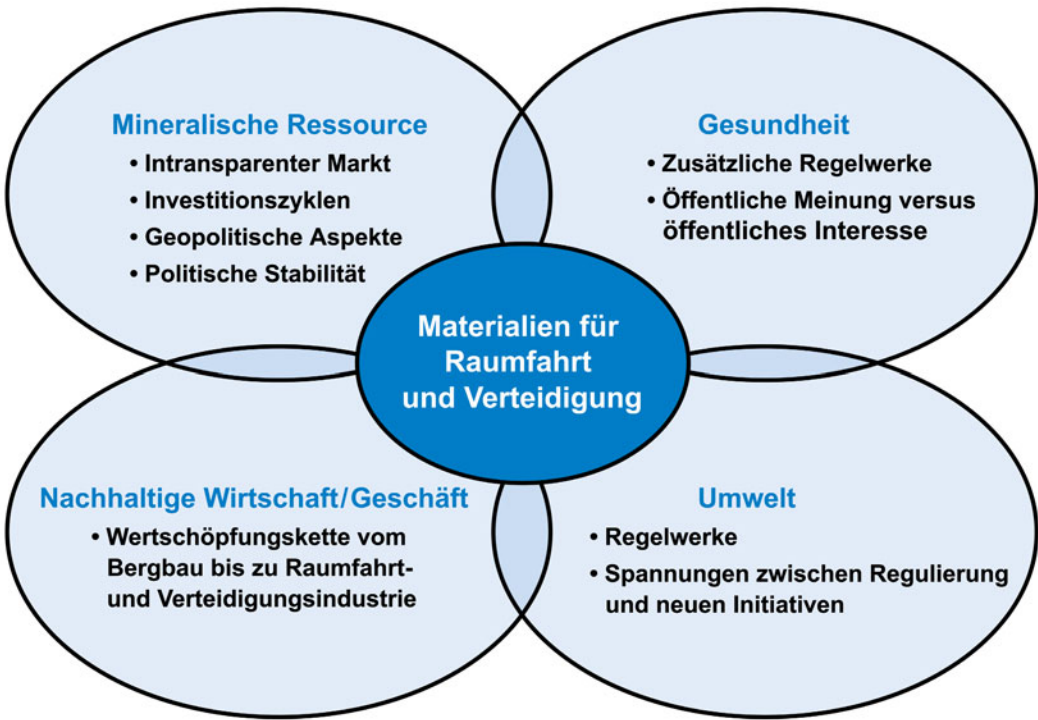


Abb. 2.3 Parallele Trends, welche die Materialversorgung beeinflussen. Hauptziel: langfristige Stabilität und Unabhängigkeit. Quelle: © Thales all rights reserved

Thales strategische Partnerschaften, die dazu beitragen, mit anderen Partnern Synergien zu maximieren; diese Partner werden nicht nur im Bereich Luft- und Raumfahrt, sondern auch in der übrigen Industrie und der Forschung gesucht. Das schließt auch die gemeinsame Forschung und Entwicklung ein, die den Weg für die industrielle Anwendung neuer Techniken eröffnet.

Die Fähigkeit, selber zu forschen, zu entwickeln, zu bauen und Schlüsselkomponenten zu verkaufen – statt alles von Dritten kaufen zu müssen –, verstärkt die vertikale Integration und erhöht die Elastizität in der Downstream-Versorgungskette. Dies vermindert nicht nur das Risiko für Thales, sondern gewährt auch den Kunden eine größere Sicherheit, gute Produkte verlässlich zu bekommen.

## Clevere Forschung und Entwicklung

Das im Jahre 2004 gegründete III-V-Lab verdeutlicht, wie eine kooperative Herangehensweise die Methode, Forschung und Entwicklung zu betreiben, verändern kann. Das III-V-Lab ist ein *Joint Venture* zwischen Thales, Alcatel-Lucent und der französischen Forschungs- und Technologie-Organisation CEA-Leti. Wie der Name bereits andeutet, betreibt dieses Labor Forschung und Entwicklung für III-V-Halbleiter. Diese werden auf der Basis von Verbindungen von Elementen hergestellt, die im periodischen System in den Gruppen III und V zu finden sind, wie Galliumarsenide (GaAs), Galliumnitride (GaN) und Indiumphosphide (InP). Die metallischen Elemente in

2

diesen Verbindungen – Gallium und Indium – sind von der EU als kritische Metalle eingestuft worden.

Das III-V-Lab liegt in Marcoussis, 25 km südlich von Paris. Es hat einen Stab von ca. 130 Mitarbeitern und widmet sich Grundlagenforschung und Entwicklung. Hier werden die gemeinsamen Grundlagen erarbeitet, von denen aus die Firmen Thales und Alcatel-Lucent ihre eigenen Techniken für ihre unterschiedlichen Märkte entwickeln. Diese Märkte schließen Verteidigung, Sicherheit, Luft- und Raumfahrt sowie Telekommunikation ein. Zusätzlich zu diesen Forschungsaktivitäten produziert und verkauft das III-V-Lab Komponenten wie Module und epitaxiale Halbleiterscheiben, die für die Herstellung komplexer integrierter Schaltsysteme gebraucht werden. Die Komponenten werden typischerweise in kleinen Mengen verkauft. Diese Kapazität für die Produktion geringer Stückzahlen ist besonders wertvoll, weil sie es den Partnern in dem sich schnell bewegenden Markt ermöglicht, rasch einen Zugriff auf Komponenten zu erhalten, ohne Zeitverlust und ohne Risiken sowie Kosten tragen zu müssen, die mit der Vorbereitung (z. B. Werkzeugherstellung) einer großen Serienproduktion verbunden sind.

### Intelligentes Produzieren

Die Fähigkeit, Innovationen in größerem Maßstab industriell zu gestalten, ist eine wichtige Vision von Thales. Um diese Vision zu realisieren, hat Thales zusammen mit EADS Deutschland GmbH im Jahr 1996 eine *Joint Venture* Gesellschaft – United Monolithic Semiconductors (UMS) – gegründet. Heute ist UMS eine von Europas führenden Anbietern metallurgischer Dienstleistungen für die Halbleiterfertigung. Die Gesellschaft hat Betriebsstätten sowohl in Frankreich als auch in Deutschland, mit Verkaufsbüros in USA und China. UMS hat 2011 rund 8 Millionen Produkte verkauft und beschäftigt mehr als 250 Personen.

UMS beliefert Thales und EADS mit kritischen Komponenten – Teile, die sonst außerhalb von Europa eingekauft werden müssten. Zusätzliche werden technisch aktuelle Funkfrequenzen, Mikro- und Millimeterwellenkomponenten sowie integrierte Schaltkreise produziert und vermarktet, um damit die Bedürfnisse von Kunden in der gesamten Industrie zu befriedigen. Die von UMS bedienten Marktsegmente umfassen das gesamte Technologiespektrum und schließen Telekommunikation, Raumfahrt, Verteidigung und Sicherheit sowie den Fahrzeug- und ISM-Markt mit ein (ISM: Industrie, Wissenschaft und Medizin). Das Produktportfolio der Gesellschaft umfasst GaAs-Chips, die zur digitalen Aufbereitung und zum Frequenzmanagement des zuvor beschriebenen Dassault Rafale Fighters benötigt werden. UMS ist ein Marktführer im Bereich des Nahbereichsradars (*short range radar* SRR), einer Technik, die es Fahrzeugen ermöglicht, Hindernisse zu erkennen. Diese Technik ist ein Herzstück von Unfall-Verhinderungs-Systemen und ebnet den Weg für zukünftige intelligente Transport-Netzwerke.

### Wissen ist Macht

Die Risiken und die Komplexität, die mit kritischen Rohstoffen verbunden sind, können weiter reduziert und damit neue Möglichkeiten geschaffen werden, indem die Beteiligten mit besseren Informationen versorgt werden. Thales nutzt hierfür TCIS – *Thales' Component Information System* (Abb. 2.4). Dies ist ein „Datenlager“, in dem alle technischen und regulatorischen Daten gespeichert werden, welche die elektronischen Komponenten betreffen, die in Forschung, Planung und Produktion von Produkten im Gesamtsystem benutzt werden. Diese Datenbasis enthält z. Zt. rund 1,5 Millionen Referenzen und schließt Informationen ein, die extern gekaufte wie auch bei Thales produzierte Komponenten betreffen; die Daten umfassen auch Angaben zu bevorzugten

Produkten und Produzenten. Auch Gebrauchsartikel haben eine begrenzte Lebensdauer und so ist es wichtig, die Konstrukteure mit entsprechendem Vorlauf über Veränderungen zu informieren.

TCIS ist sehr wichtig, da alle von Thales entwickelten Produkte und Systeme eine sehr große Anzahl elektronischer Bauteile enthalten. Zusätzlich zu den technischen Daten speichert TCIS auch regulatorische, wirtschaftliche und umweltrelevante Daten sowie gesundheitliche Aspekte für jedes einzelne Bauteil; hierzu gehören auch Angaben zu den Anforderungen, die von RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*) und REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of Chemical substances*) gestellt werden.

Ebenso wie es passgerechte Werkzeuge liefert, hilft TCIS bei der Entwicklung „grüner“ Produkte und Systeme. Da das System Daten über die Zusammensetzung jedes einzelnen

Teils enthält, einschließlich der Seltenen Erden und anderer kritischer Metalle, können Thales Konstrukteure bereits im Entwurfsstadium das *End-of-Life-Recycling* optimieren. Dies ist eine immer stärker werdende Forderung der Kunden. Indem die Daten über die gesamte Lebenszeit der Bauteile gespeichert werden, kann TCIS auch Kunden mit in Gebrauch befindlichen Systemen helfen, bessere Entscheidungen darüber zu fällen, wie Material zurückgewonnen werden kann, wenn diese Systeme sich dem Ende ihrer Einsatzzeit nähern. Auf diese Weise kann ein größerer Anteil leichter identifiziert und durch Recycling wiedergewonnen werden.

Weiterhin werden genaue Informationen über Materialien und Komponenten an Angestellte und Kunden geliefert. Auch ist es wichtig, sicherzustellen, dass die Produkte den Exportbestimmungen entsprechen. Diese sind erlassen worden, um die nationale Sicherheit

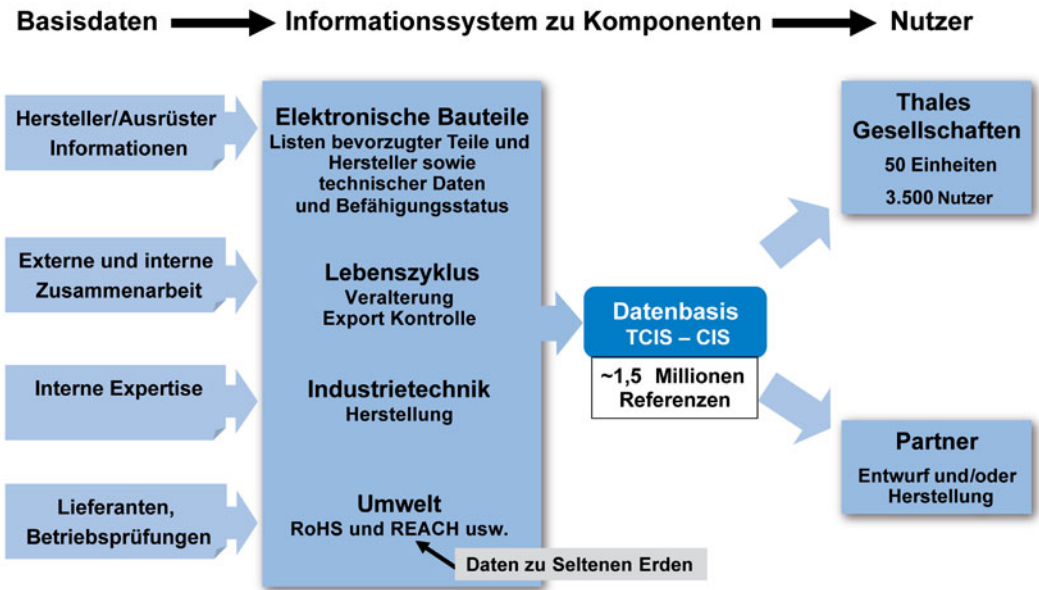


Abb. 2.4 Komplexität mit Informationssystemen handhaben. **RoHS** Diese EU-Richtlinie regelt die Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in elektrischen und elektronischen Geräten. **REACH** Diese Verordnung der EC regelt das Inverkehrbringen und Verwenden aller Stoffe und deren Zubereitung, die auf dem europäischen Markt sind. Quelle: © Thales all rights reserved

2

im Auge zu behalten, indem der Export beobachtet und kontrolliert wird. Exportbeschränkungen gelten auch für bestimmte Produkte, die sowohl militärisch als auch zivil genutzt werden können. Strategische Produkte unterliegen häufig sowohl Export- als auch Importkontrollen. Zudem ändern sich die staatlichen Vorgaben häufig.

TCIS ist nicht nur für alle Geschäftsbereiche von Thales zugänglich, sondern auch für Thales-Partner; damit wird eine bessere Transparenz für die Downstream-Versorgungskette erreicht.

## Quellenverzeichnis

- BGS (2012) Risk List 2012, Minerals UK, Centre for Sustainable Development. <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/riskList.html>. Letzter Zugriff 30.03.2013
- BRGM (2012) BRGM response to “Public consultation on the preparation of a new communication on raw materials”, page 4. [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/pc-contributions/org-059-brgm\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/pc-contributions/org-059-brgm_en.pdf). Letzter Zugriff 30.03.2013
- DOE (2011) Critical Materials Strategy (US Department of Energy), Dezember 2011. [http://energy.gov/sites/prod/files/DOE\\_CMS2011\\_FINAL\\_Full.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf). Letzter Zugriff 30.03.2013
- EC (2010) Critical raw materials for the EU Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. European Commission, 30 July 2010. [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf). Letzter Zugriff 30.03.2013
- EC (2011) Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the committee of the regions tackling the challenges in commodity markets and on raw materials. 2. Februar 2011. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0025:FIN:en:PDF>. Letzter Zugriff 30.03.2013
- Levkowitz L, Beauchamp-Mustafaga N (2010) China's rare earths industry and its role in the international market, U.S.-China Economic and Security Review Commission Staff Backgrounder; November 2010. <http://www.uscc.gov/Research/china's-rare-earths-industry-and-its-role-international-market>. Letzter Zugriff 30.03.2013
- Lowen J, Rediker RH (1960) Gallium-Arsenide diffused diodes. *Journal of the Electrochemical Society* 107, 1: 26–29. <http://jes.ecsdl.org/content/107/1/26.abstract>. Letzter Zugriff 30.03.2013

## Kernaussagen

- Thales sucht strategische Lösungen, um die eigene Abhängigkeit von störanfälligen Versorgungsketten für kritische Rohstoffe zu minimieren.
- Die Definition von kritisch ist vielschichtig, in jedem Fall stehen Verfügbarkeit und Preis im Vordergrund; hinzu kommen geopolitische Risiken.
- Lagerhaltung von Rohstoffen ist zugleich Ursache und Folge von Knappheit und Preisschwankungen.
- Thales bildet strategische Partnerschaften, um Synergien zu maximieren und Risiken in den Versorgungsketten zu minimieren.
- Diese strategischen Partnerschaften schließen Grundlagenforschung ein und die gemeinsame Nutzung eines „Datenlagers“ TCIS (*Thales Component Information System*), das alle technischen und regulatorischen Information speichert. TCIS hat sich in der Praxis sehr bewährt.

# 3 Zeit für Kooperation zwischen der EU und China in der Rohstoffpolitik

*Reinhard Bütikofer*

„Mögest Du interessante Zeiten erleben“, das ist im Chinesischen kein besonders freundlicher Wunsch. Interessante Zeiten sind unruhige, ja gefährliche Zeiten. Aber ob wir es uns gewünscht haben oder nicht, wir leben in „interessanten“ Zeiten. Die internationalen Kräfteverhältnisse verschieben sich. Asien ist im Aufschwung und Europa büßt an Relevanz ein, jedenfalls relativ; in der gegenwärtigen Krise sogar ganz massiv und offenkundig.

Die Ressourcenpolitik eignet sich durchaus als ein Musterbeispiel für diese Verschiebungen, denen wir uns stellen müssen. Während der Westen noch vor einigen Jahrzehnten das Spielfeld dominierte, sind es nun die Schwellenländer, allen voran die Volksrepublik China. Laut dem Britischen Geologischen Dienst sind Schwellen- und Entwicklungsländer bei 52 der wichtigsten Rohstoffe für über 80 Prozent der globalen Produktion verantwortlich. China alleine ist größter Weltproduzent bei 22 dieser Rohstoffe (Abb. 3.1).

Auch in einer Studie der EU-Kommission zu kritischen Rohstoffen sticht die Volksrepublik heraus. Bei den 14 kritischen Rohstoffen, welche von der Studie identifiziert werden, ist China bei 10 ein relevanter Produzent (Abb. 3.2).

Der internationale Rohstoffmarkt erlebt dementsprechend neue Konstellationen. Das heißt auch, dass die Zeit vorbei ist, in der sich Europa durch sein wirtschaftliches und politisches Gewicht ganz selbstverständlich einen günstigen Zugang zu Rohstoffen sichern konnte.

Das ist eine harte Realität angesichts der Tatsache, dass Europa – pro Kopf gerechnet – weltweit die höchsten Einfuhren von Rohstoffen hat.

Die neuen wirtschaftlichen und machtpolitischen Verhältnisse beeinflussen und strapazieren auch das Verhältnis zwischen der Europäischen Union und China. Im Gegensatz zur Vergangenheit ist das Reich der Mitte immer weniger bereit, seine Bodenschätze zu günstigen Preisen zu exportieren und versucht stattdessen, sie durch Exportrestriktionen im Land zu halten, um eigene wertvolle Wertschöpfungsketten aufzubauen. China hat auch schon versucht, ausländische Unternehmen mit dem Lockmittel eines sicheren Rohstoffzuges dazu zu bewegen, ihre Aktivitäten teilweise nach China zu verlegen. Die EU, die zum Beispiel bei den berühmten Seltenen Erden stark auf chinesische Rohstoffe angewiesen ist, tut sich damit natürlich schwer.

Die rohstoffpolitische Auseinandersetzung zwischen Europa und China hat sich in den letzten Jahren intensiviert. Damit haben beide aber auch Zeit verloren, die für den Aufbau von kluger Kooperation gebraucht würde.

Die EU hat 2012 zusammen mit den USA und Mexiko bei der Welthandelsorganisation (WTO) in zweiter Instanz erfolgreich gegen chinesische Exportrestriktionen für neun Rohstoffe geklagt. Kurz danach wurde gemeinsam mit den USA und Japan eine zweite Klage gegen China, diesmal zu Seltenen Erden (SEE) sowie



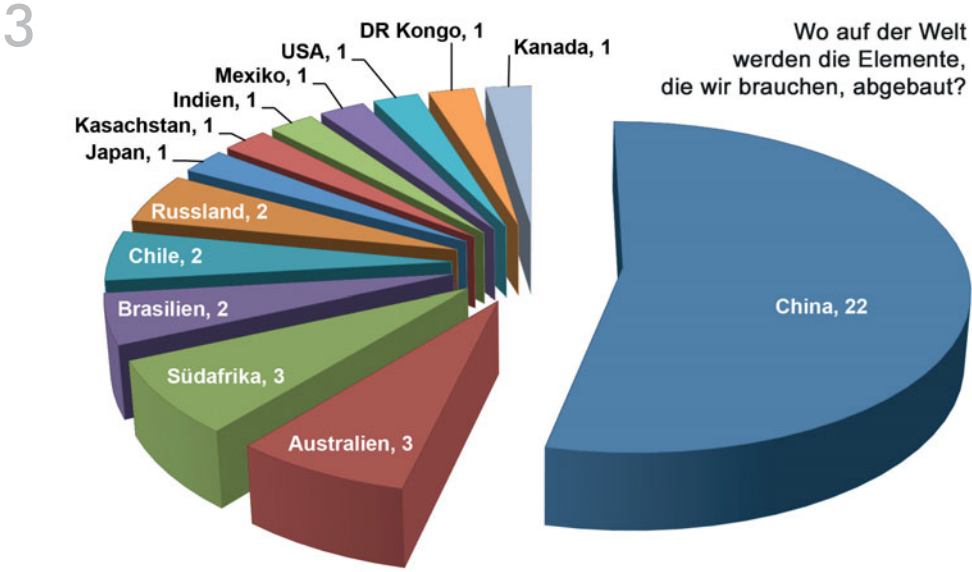


Abb. 3.1 Verteilung der geographischen Herkunft von Elementen bzw. Elementgruppen wirtschaftlicher Bedeutung. Quelle: modifiziert nach © British Geological Survey (2012)



Abb. 3.2 Die Produktionskonzentration von kritischen Rohstoffen nach Herkunftsland. Quelle: modifiziert nach Raw Materials Supply Group (2010). Weltkarte von Wikipedia Commons

zu Wolfram (Wo) und Molybdän (Mo) bei der WTO eingereicht.

Es ist jedoch keineswegs sicher, dass sich diese Klage-Strategie am Ende wirklich auszahlt. Die Beschwerde vor der Welthandelsorganisation (WTO) gegen chinesische Exportbeschränkungen bei SEE und anderen kritischen Rohstoffen mag berechtigt sein und verspricht doch bestenfalls einen Pyrrhussieg.

Zum einen besteht derzeit kein aktueller Handlungszwang. Die SEE-Preise sind seit einiger Zeit auf breiter Front wieder deutlich zurückgegangen, und die offizielle Exportquote Chinas wurde de facto nicht ausgeschöpft. Gründe dafür liegen in einem verringerten Verbrauch, einer größeren Nutzung von bestehenden Vorräten der Industrie, größeren Substitutionsanstrengungen, sowie dem illegalen Export von SEE aus China.

Man kann sich übrigens, das zum Zweiten, gar nicht wünschen, dass China den Weltmarkt wieder so mit billigen Seltenen Erden flutet, wie es das lange getan hatte. Das würde, dies ist die Ironie der Angelegenheit, sämtlichen gerade betriebenen Investitionen in Abbau und Verarbeitung von SEE außerhalb Chinas die ökonomische Basis entziehen. Eine Entwöhnung von der fatalen China-Abhängigkeit würde damit gerade erschwert. Chinas Vorräte an SEE aber werden noch nicht einmal ausreichen, um den Bedarf des Landes selbst zu decken (Stanway 2011). Dies wird weniger wahrgenommen, ist aber eine wichtige Tatsache. Sie zwingt Europa, sich stärker nach anderen Quellen umzusehen. Je später der Westen daraus Konsequenzen zieht, desto bitterer wird es. Diversifizierung der Bezugsquellen, Ressourceneffizienz, Recycling, Substitution – das sind die Überschriften für wirksames Handeln.

Drittens hat die EU erst im Januar 2012 zusammen mit den USA und Mexiko das WTO-Verfahren gegen China wegen Exportbeschränkungen bei Rohstoffen klar gewonnen. Kurz danach erneut zur Attacke zu blasen, heißt, China gar nicht erst die Zeit einzuräumen, um aus dieser Niederlage Konsequenzen zu ziehen. Warum hat man den Schwung des

WTO-Erfolges nicht genutzt, um China ein Angebot zur Kooperation bei Seltenen Erden zu machen?

Darüber hinaus hat China Möglichkeiten, WTO-kompatible Exportbeschränkungen zu praktizieren. Das Land arbeitet daran. Während die Exportrestriktionen Chinas dieses Jahr im Vergleich zu den letzten Jahren relativ gleich geblieben sind, hat China für 2013 die vorläufigen Produktionsquoten um fast die Hälfte gekürzt (Yuan 2013). Produktionsquoten sind, vor allem wenn mit umweltpolitischen Überlegungen begründet, WTO-kompatibel. Die Struktur der chinesischen SEE-Industrie ist im Wandel. Konzerne werden fusioniert und Großkonzerne gefördert. Unter solchen Restrukturierungen können neue vertikale Konzerne entstehen oder Langzeitverträge zwischen chinesischen Produzenten und Konsumenten geschlossen werden (► Kap. 8). Damit wäre Europa auch kein Gefallen getan. Gut vorstellbar, dass wir am Ende mit leeren Händen dastehen, selbst wenn wir bei der WTO obsiegen.

Klar ist: Auf beiden Seiten ist die Industrie auf Rohstoffzugänge angewiesen. Diese Abhängigkeit hat bisher eher zu einem konfliktgeladenen Null-Summen-Spiel geführt. Strategisch ist dies allerdings nicht zielführend. Konflikt statt Kooperation ist nicht clever. Stattdessen sollte die Basis für eine systematischere Zusammenarbeit geschaffen werden. Schließlich besteht ein gemeinsames Interesse an einer stabilen Rohstoffversorgung. Bei den Energierohstoffen findet solch eine Zusammenarbeit ansatzweise bereits statt. Unter dem Dach des EU-China-Energiedialogs kooperieren beide Akteure als Partner bei erneuerbaren Energien, Energieeffizienz sowie bei der Kohlenstoff-Abscheidung und -Speicherung. Im Jahre 2010 wurde in diesem Rahmen auch das „EU-China Clean Energy Centre“ gegründet.

Warum sollten die EU und China diese Art von Kooperation nicht auch bei anderen Rohstoffen wie Metallen angehen, um zusammen ihre Rohstoffsicherheit zu stärken? Eine Zusammenarbeit im Bereich der Forschung

## 3

und Entwicklung mit Schwerpunkt beim umweltfreundlichen Abbau könnte zum Beispiel für Beijing von Interesse sein, da der Abbau von SEE besonders schädlich für die Umwelt sein kann. Die EU könnte auch helfen, ein Zertifizierungssystem gegen den illegalen Schmuggel von Rohstoffen in China aufzubauen.

In den afrikanischen Ländern, in denen es einen starken Rohstoffwettbewerb zwischen der EU und China gibt, sollte die EU der Afrikanischen Union ein Partnerschaftsmodell anbieten, das sich von dem chinesischen unterscheidet. Solch ein Modell sollte den gegenseitigen Vorteil betonen, beim Bau lokaler Wertschöpfungsketten helfen, Recyclingpartnerschaften fördern, Technologie- und Wissenstransfer anbieten, Transparenz schaffen und durch Einbeziehung der Zivilgesellschaft dafür sorgen, dass der Rohstoffreichtum stärker den Bürgerinnen und Bürgern in den Ländern zugute kommt. In diesen Bereich gibt es derzeit noch besonderen Verbesserungsbedarf. Die EU-Mitgliedsländer sträuben sich seit mehreren Monaten, den USA zu folgen und die revidierte EU-Transparenzrichtlinie so auszurichten, dass Rohstoffunternehmen ihre projektbezogenen Zahlungen an Regierungen veröffentlichen müssen, um so die Korruption einzudämmen. Darüber hinaus müssen sich die Europäische Union und ihre Mitgliedsstaaten besser bei den Rohstoffpartnerschaften koordinieren. Es kann nicht sein, dass der Europäische Industriekommissar, Herr Tajani, eine rohstoffpolitische Absichtserklärung mit Peru, Mexiko und Grönland verabschiedet, während die EU-Mitgliedstaaten völlig losgelöst davon um Rohstoffpartnerschaften buhlen. Die deutschen Rohstoffpartnerschaften mit Kasachstan und der Mongolei sind übrigens zwei Beispiele dafür, was man in diesem Bereich besser machen sollte (Krajewski 2012).

Das internationale Wettrennen um Rohstoffe läuft, und es wird sich nicht durch bilaterale Partnerschaften gewinnen lassen. Deshalb muss daran gearbeitet werden, ein multilaterales Regime zu schaffen. Europa und China sollten sich gemeinsam für bessere internati-

onale Governancestrukturen einsetzen und eine Global-Governance-Agenda für die Rohstoffpolitik vorantreiben. Auch hier kann man vom Bereich der Energierohstoffe lernen, denn dort gibt es bereits viele internationale Governancestrukturen um Transparenz, Vertrauen und Marktsicherheit zu fördern. Es gibt unter anderem die Internationale Energie Agentur (IEA), welche jedes Jahr einen Welt-Energie-Ausblick, *World Energy Outlook* (WEO), mit Statistiken veröffentlicht, die Joint Oil Data Initiative (JODI), die International Renewable Energy Agency (IRENA) sowie das Internationale Energie Forum (IEF), welches einen Dialog zwischen Produzenten und Konsumenten herstellt. Für Industrierohstoffe gibt es, mit der Ausnahme einiger relativ kleiner internationaler Metall-Gruppen zu einzelnen Rohstoffen wie zum Beispiel Kupfer (Cu) und Zink (Zn), keine vergleichbaren Strukturen. Diese sind aber dringend nötig, um internationale Zusammenarbeit und Vertrauen zu fördern. Ein Vorschlag, der kürzlich vom britischen Think Tank Chatham House verbreitet wurde, wäre die Etablierung einer „Resource 30“ – eine internationale Gruppierung, welche die 30 systemrelevantesten Produzenten und Konsumenten zusammenbringen würde, um Preisschwankungen bei Rohstoffen einzudämmen und die Markttransparenz zu fördern (Lee et al. 2012).

Gemäß einem chinesischen Sprichwort sollte Europa allerdings „auf zwei Beinen gehen“. Parallel zu einer internationalen Kooperations- und Partnerschaftsstrategie sollte die EU den Herausforderungen im Rohstoffbereich durch einheimische Innovation begegnen. Mit einem intelligenteren Rohstoffverbrauch durch Ressourceneffizienz, Recycling, Wiederverwertung und Substitution kann Europa nicht nur seine Versorgungssicherheit erhöhen, sondern gleichzeitig seine Wettbewerbsfähigkeit gegenüber anderen Ländern stärken. Laut der EU-Kommission kann z.B. Deutschland alleine durch mehr Ressourceneffizienz im produzierenden Gewerbe Kosteneinsparungen von 20 bis 30 % generieren. Europa kann hier

von seinen Partnern lernen. Die japanische Regierung hat sich zum Beispiel das Ziel gesetzt, ein Drittel ihres Verbrauchs von SEE in den kommenden Jahren zu reduzieren. Alleine in 2011 hat Tokyo 650 Millionen US Dollar bereitgestellt, um die Versorgungssicherheit bei den SEE und anderen kritischen Rohstoffen zu erhöhen (Maeda 2011). Die USA haben wiederum dieses Jahr 120 Millionen US Dollar zur Verfügung gestellt um ein Critical Materials Institute in Ames, Iowa, zu etablieren, welches die Forschung und Entwicklung zu SEE fördern soll (Moskvitch 2013). In der EU dauern solche Vorhaben bedauerlicherweise etwas länger. Mein Vorschlag von 2011, ein europäisches Kompetenznetzwerk zu Seltenen Erden (European Rare Earth Competency Network, ERECON) zu etablieren, das Forschungsinstitute, Wirtschaft und Experten zusammenbringt, um Forschungsanstrengungen in diesen Bereich zu bündeln, wird 2013 endlich Realität.

Bei all diesen Anstrengungen ist die Einrichtung eines „*Trilateral EU-US-Japan Conference on R&D on Rare Earths and Critical Materials*“ besonders relevant. Diese Initiative fand zum ersten Mal 2011 in Washington statt und bringt europäische, amerikanische und japanische Entscheidungsträger und Wissenschaftler zusammen. Im Mai 2013 wird das dritte Treffen in Brüssel stattfinden.

Im letzten Jahrzehnt hat ein Umbruch in der internationalen Ressourcenpolitik stattgefunden. Europa und China sollten lernen, dass sie in dieser neuen Situation durchaus gemeinsame Ziele und Kooperationschancen finden können.

## Quellenverzeichnis

British Geological Survey (2012) Risk List 2012 – Current supply risk index for chemical elements or element groups which are of economic value <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/riskList.html>. Letzter Zugriff: 28.03.2013

Krajewski M (2012) Entwurf eines Alternativen Rohstoffabkommens der Bundesrepublik Deutschland – Mustertext mit Erläuterungen, eine Studie, erstellt im Auftrag von Reinhard Bütikofer, MdEP, 1. Oktober 2012.

<http://reinhardbuetikofer.eu/wp-content/uploads/2012/10/Alternatives-Rohstoffabkommen-Text-und-Erlaeuterungen-fin.pdf>. Letzter Zugriff: 30.03.2013

Lee B, Preston F, Kooroshy J, Bailey R, Lahn G (2012) Resources Futures – A Chatham House Report, Chatham House (The Royal Institute of International Affairs), December 2012. [http://www.chathamhouse.org/sites/default/files/public/Research/Energy,%20Environment%20and%20Development/1212r\\_resourcesfutures.pdf](http://www.chathamhouse.org/sites/default/files/public/Research/Energy,%20Environment%20and%20Development/1212r_resourcesfutures.pdf). Letzter Zugriff: 30.03.2013

Maeda R (2011) Japan budgets \$650 mln for rare earths, resources. Reuters edition U.S., 5 Januar 2011. <http://www.reuters.com/article/2011/01/05/japan-china-rareearth-idUSTOE70404220110105>. Letzter Zugriff: 30.03.2013

Moskvitch K (2013) US to build \$120m rare earth research institute, BBC News, 11 Januar 2013. <http://www.bbc.co.uk/news/technology-20986437>. Letzter Zugriff: 27.02.2013

Raw Materials Supply Group (2010) Critical Raw Materials for the EU, Report of the Ad-Hoc Working Group on Defining Raw Materials, Raw Materials Supply Group, European Commission. Version 30 Juli 2010. [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_en.htm). Letzter Zugriff: 25.03.2013

Stanway S (2011) China could become net rare earth importer by 2015 – Molycorp, Reuters edition UK, 10 März 2011. <http://uk.reuters.com/article/2011/03/10/china-rareearth-molycorp-idUSTOE72901L20110310>. Letzter Zugriff 3.01.2013

Yuan H (2013) China sets first rare earth output quota for 2013 at 46,900 tons. 7 Januar 2013. Bloomberg News. <http://www.bloomberg.com/news/2013-01-07/china-sets-first-rare-earth-output-quota-for-2013-at-46-900-tons.html>. Letzter Zugriff: 30.01.2013

## Kernaussagen

- Die internationalen Kräfteverhältnisse verschieben sich in Richtung Asien zulasten von Europa.
- Gerade im Bereich der Ressourcenpolitik dominieren die Schwellenländer, allen voran die Volksrepublik China. Das war vor einigen Jahren noch völlig anders.
- China nutzt seine Rohstoffstärke, u. a. auch dazu, ausländische Unternehmen mit dem Lockmittel eines sicheren Rohstoffzugangs zum Aufbau einer Produktion in China zu bewegen.
- Am Beispiel der Seltenen Erden ist abzulesen, welche gute Rohstoffstrategie China verfolgt. Die eigenen Vorräte werden nicht ausreichen, den Bedarf zu decken, deshalb expandiert man weltweit. Deshalb muss sich Europa stärker nach anderen Quellen umsehen. Je später der Westen daraus Konsequenzen zieht, desto bitterer wird es.
- Anstatt mit China auf Rohstoffkonfrontation zu gehen, sollte man kluge Kooperationsstrategien entwickeln.
- In Afrika, gibt es einen starken Rohstoffwettbewerb zwischen der EU und China. Die EU sollte ein Partnerschaftsmodell anbieten, das für alle Beteiligten Vorteile bietet, und durch Einbeziehung der Zivilgesellschaft dafür sorgt, dass der Rohstoffreichtum stärker den Bürgerinnen und Bürgern in den Ländern zugute kommt.
- Die EU-Transparenzrichtlinie sollte so ausgerichtet werden, dass alle rohstoffprojektbezogenen Zahlungen an die Regierungen veröffentlicht werden müssen, um Korruption entgegenzuwirken.
- Das internationale Wettrennen um Rohstoffe läuft, und es wird sich nicht durch bilaterale Partnerschaften gewinnen lassen. Internationale Kooperationen sind notwendig. Zum Beispiel gibt es für Bereich der Energierohstoffe mit der Internationalen Energie Agentur bereits eine solche Kooperation, um Transparenz, Vertrauen und Marktsicherheit zu fördern. Warum kann man nicht ein ähnliches Vehikel für Metalle einrichten?



# 4 Verfügbarkeit von Elementen für die Halbleiterindustrie

Andreas Dirk Wieck

## 4.1 Materialbasis Erde

Wir leben auf unserem Planeten Erde wie im Paradies (oder Schlaraffenland). Einerseits werden wir von Gaia (griechische Göttin der Erde) mit einer sauerstoffreichen Atmosphäre und angenehmen Temperaturen versorgt: Im Sommer gleicht in unseren Breiten die Innentemperatur der Außentemperatur; im Winter brauchen wir nur ca. 10 % auf der absoluten Temperaturskala in Kelvin dazuzuheizen. Andererseits sind wir auch bezüglich Materialvielfalt, -auswahl und -verfügbarkeit äußerst privilegiert: Alle unsere technischen Geräte stellen wir aus Elementen her, die wir durch bloßes Schürfen in der Erdkruste gewinnen und anreichern, chemisch herauslösen, konzentrieren und reinigen können. Wir sind uns nicht bewusst, dass diese Verfügbarkeit auf kosmischem Maßstab die absolute Ausnahme ist: Weit über 99 % aller (sichtbaren, nicht dunklen) Materie im Universum ist Wasserstoff (H), *das* Urelement. Astronomen bezeichnen daher alle chemischen Elemente, die schwerer als H sind, bereits als „metallisch“. Schon das nächstschwerere Element Helium (He) ist ein Produkt der Fusion von H, daher der so wahre Satz „am Anfang war der Wasserstoff“, der die Materie kurz nach dem Urknall charakterisiert. Ironischerweise ist es nur dieses Einfachste aller Atome, das wir mit der heutigen Quantenmechanik exakt berechnen können: Das Durchdeklinieren

der möglichen Elektronenhüllenzustände des einzelnen Elektrons um das einzelne Proton herum ist das komplette Basisprogramm der theoretischen Quantenphysik, das seit etwa einem Jahrhundert jeder Physikstudent durchmacht. Ein zweites Elektron in der Hülle, gar noch mit 4 Hadronen im Kern, erzeugt bereits ein Vielteilchenproblem, das streng genommen nicht mehr geschlossen gelöst werden kann; vom gesamten Periodensystem der Elemente ganz zu schweigen. Immerhin gibt es clevere Mittelungskonzepte, um die Chemie doch einigermaßen zu verstehen. Wir kennen also nicht die elektronische Struktur unserer chemischen Elemente in Perfektion; kennen wir dann wenigstens ihren Ursprung?

Wenn alles mit dem Wasserstoff (H) begann, kann die Fusion zu schwereren Elementen nur bei hoher Hitze und hohem Druck im Innern von Sternen stattgefunden haben. Und zwar von solchen, die vor unserer Sonne „gelebt“ haben. In ihnen wurden alle bekannten Elemente durch Kernfusion „erbrütet“. Beim Explodieren der Sterne am Ende ihres Lebens wurden diese Elemente in einer Supernova herausgeschleudert, bevor sich deren Masse gravitativ zu Planeten verklumpten. Unsere Erde, unsere gesamte irdische Umwelt und sogar wir selbst bestehen daher aus der Asche mindestens einer ausgebrannten Sternengeneration *vor* unserer Sonne; wir sind aus Sternenstaub gemacht! Diese kosmische Entwicklung hat uns den chemischen Baukasten der Elemente beschert, den wir nach



## 4

einiger Erfahrung in Perioden und andere Kategorien geordnet haben und der die gesamte Basis unseres Seins, unserer Kultur und unserer Technologie darstellt. In dieser Dimension betrachtet erscheint es lächerlich, dass wir auf der Erde wie die frühen Goldgräber „Claims“ abstecken und sie durch Paragraphen, Juristen, Notare und Grundbücher einigen Wenigen zuordnen. Die Erde gehört uns allen, und wir können, ja müssen uns glücklich schätzen, hier leben und mit den Elementen spielen zu dürfen. Wobei die Kenntnis der Materialeigenschaften und die Technologie ihrer Einsetzbarkeit und Manipulation *der* intellektuelle Schatz ist, den wir uns wirklich selbst erarbeitet haben. Nicht die Verfügbarkeit und Verteilung des Materials auf der Erde; das ist entwicklungsgeschichtlich vorgegeben, durch Gravitation, Elektro- und Thermodynamik modifiziert und integral von uns kaum beeinflussbar. Alles, was wir auf der Erde haben, bleibt auf der Erde, mit Ausnahme vom He, das, einmal in der Atmosphäre, diese verlässt und in den freien Raum gelangt; die Erde zieht also schon seit Milliarden Jahren einen He-Schweif hinter sich her. Alle anderen Elemente bleiben auf der Erde, und aus dieser Sicht ist das „Erdöl- bzw. Erdgasproblem“ nur eine energetische Umformung von Kohlenwasserstoffen.

## 4.2 Von Förderung über Recycling zu „smart-standardization“

Spätestens seit der Bronzezeit haben Menschen Metallerze abgebaut und weiterverarbeitet. Dabei wurde ihnen schnell klar, dass es meist einfacher ist, Altmetalle durch zum Beispiel Einschmelzen oder Umschmiedung wiederzuverwerten, als neues Metall abzubauen. Insofern ist unser modernes „Recycling“ ein alter Hut, wird allerdings heute industriell und kaufmännisch besser organisiert und durch-

geführt als früher. Das möglichst vollständige Sammeln, Zerlegen, Sortieren, Lagerhalten und Zurückführen in den Fertigungsprozess ist jedoch mit erheblichem Zeit-, Arbeits- und Energieaufwand verbunden. Und das umso mehr, je mehr Elemente immer kleinteiliger verbaut werden, beispielsweise in Miniaturisierung, erhöhter Komplexität und Hochintegration. Es wird dann verständlich, dass aus wirtschaftlichen Gründen manches Recycling nicht durchgeführt wird. Um daher die Rohstoff-Sparsamkeit eine weitere, deutliche Entwicklungsstufe zu entwickeln, wird hier eine „smart-standardization“ vorgeschlagen:

Es ist bekannt, dass kein industrielles Produkt nach einer gewissen Lebensdauer in Gänze versagt. Vielmehr fällt eine von vielen, in der Regel Hunderten bis Tausenden von Komponenten aus, die dann das ganze Objekt wertlos machen. Beispiele sind: ein elektrischer Widerstand in einem TV-Gerät, ein Kabelbaum in einem Kraftfahrzeug, ein Drehlager in einer Werkzeugmaschine etc. Die Suche nach eben dieser einen defekten Komponente ist in der Regel so aufwendig, dass sich eine Reparatur nicht lohnt und das ganze Produkt aufgegeben wird. Das ist wegen des unzureichenden Recyclings rohstoffmäßig der größte Verlust, vom finanziellen Verlust ganz zu schweigen.

Wenn nun die Menschheit, am besten im globalen Konsens, sich auf eine strikte Standardisierung von Funktionsorganen einigen könnte, wäre die Ressourcen-Ausnutzung erheblich gesteigert. Zum Beispiel könnte man Standard-Verstärker, -Beleuchtungskomponenten, -Motoren, -Getriebe, usw. in höchster Premium-Qualität millionen- oder milliardenfach wirtschaftlich produzieren, die einerseits eine extrem geringe Ausfallrate hätten und andererseits im Falle des Falles schnell ausgetauscht werden könnten. Dem steht heute eigentlich nur die Individualisierung von Produkten entgegen (z.B. verschiedene Automarken mit entsprechend verschiedenen Prestigeakzenten) sowie die offensichtlich bewusst inkompatibel und auf begrenzte Lebensdauer ausgelegten Konstruktionen der konkurrierenden Herstel-

ler. Immerhin werden bereits seit Jahren erste Ansätze in dieser richtigen Richtung – vom Verbraucher fast unbemerkt – gemacht: So sind z. B. in ganz verschiedenen Automarken zum Teil gleiche Motoren, Getriebe oder Bremsen verbaut. Das geht so weit, dass z. B. Porsche der einzige Anbieter ist, der seine Bremsen selbst entwickelt und herstellt; alle anderen Mitbewerber haben sich bereits standardisiert. Aber eben noch nicht genug. Diese Entwicklung der „smart-standardization“ muss erheblich konsequenter und in möglichst allen Industriebeichen vorangetrieben werden.

### 4.3 Ressourcen der Halbleiterindustrie

Die Halbleiterindustrie basiert größtenteils auf Silizium (Si). Das wird sich in absehbarer Zeit sicherlich nicht ändern, wenn man bedenkt, wie viel Entwicklungsarbeit (Größenordnung Millionen Personenjahre) und Know-how mit diesem Material investiert und erfolgreich zusammengetragen wurden und welchen immensen Erfolg diese Technologie hat (► Kap. 2, 12, 16). Da Si mit einem Massenanteil von 28 % in der Erdkruste nach dem Sauerstoff (46 %) das am meisten verfügbare Material ist, haben wir es hier glücklicherweise mit einer schier unerschöpflichen Ressource zu tun. Auch das so wichtige  $\text{SiO}_2$  als hochwertiger Isolator ist damit ressourcenmäßig perfekt gesichert. Die Menschheit verdankt der sogenannten indirekten Bandlücke des Si (anfangs des Germaniums, Ge) die Erfindung des Bipolar-Transistors, denn nur durch diese Indirektheit im Impulsraum „leben“ Elektron-Loch-Paare so lange (Millisekunden, ms) vor ihrer Rekombination, dass Diffusionslängen beinahe im Millimeter-Bereich (mm) entstehen, die für die ersten Spitzen-Transistoren essenziell waren.

Auf der anderen Seite macht eben diese indirekte Bandlücke des Si seine Anwendbarkeit in der Optoelektronik leider fast unmöglich,

sodass Verbindungshalbleiter wie Galliumarsenid (GaAs) und Galliumnitrid (GaN) entwickelt wurden, die eine direkte Bandlücke aufweisen. Diese ermöglicht eine extrem effiziente Rekombination von Elektronen mit Löchern, sodass Leuchtdioden (engl. „*Light Emitting Diodes*“, LEDs) und sogar die stimulierte Emission in Halbleiterlasern möglich werden. Aus heutiger Sicht werden LEDs in der nächsten Dekade sämtliche anderen künstlichen Lichtquellen komplett verdrängen, sodass sich die Menschheit wohl auf alle Zeiten mit diesen nichtplanckschen, sondern quantenmechanischen Strahlern beleuchten wird. Wenn man bedenkt, dass die Glühlampe eben „nur“ ein Planckscher Strahler durch Hitze war, hat sich die Menschheit jetzt erst endgültig von solchen heißen Lichtquellen (wie der eines Lagerfeuers) emanzipiert und erst ab etwa dem Jahr 2000 begonnen, sich mit der Errungenschaft der Quantenmechanik durch LEDs zu beleuchten.

Auch extrem hohe Frequenzen kann die Si-Technologie leider nicht leisten: Hier haben sich GaAs und GaN als wesentlich besser erwiesen, sodass auch im Bereich der Hochfrequenztechnik den Verbundhalbleitern die Zukunft gehört. Schließlich ist die chemische, mechanische, elektrische und thermische Beständigkeit von

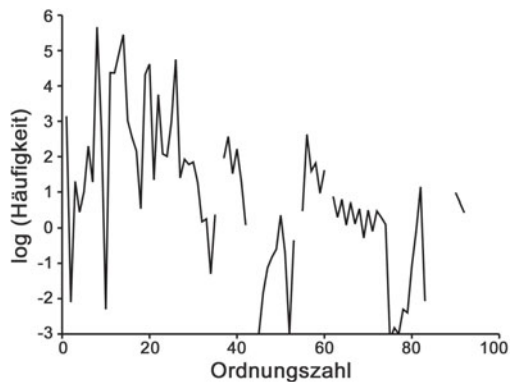


Abb. 4.1 Logarithmische Häufigkeit der Elemente in der Erdkruste, aufgetragen gegen ihre Ordnungszahl. Quelle: nach © Lide (2005)

4

GaN durch die enorme Ga-N-Bindungsenergie so hoch, dass zukünftige Leistungs-Bauelemente wohl bevorzugt aus diesem Material gefertigt werden (allgemeine Sendeanlagen, Relais-Verstärker für Mobilfunk-Netze, etc.).

Ein weiterer, grundsätzlicher Vorteil von Verbundhalbleitern ist die Möglichkeit, nicht nur binäre, sondern auch ternäre oder gar quaternäre Legierungen herzustellen, beispielsweise  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  oder  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{In}_y\text{As}$ . Ihre Bandlücken hängen von den Stöchiometrie-Parametern  $x$  und  $y$  ab, die wiederum frei eingestellt werden können. Dadurch ist es möglich, beliebige Schichtdicken beliebiger Bandlücken in beliebiger Reihenfolge herzustellen: Elektronen und Löcher können gezielt mit Monolagen-Präzision (ca. 0,3 Nanometer, nm) platziert werden und quantenmechanische Systeme realisieren, die zu fantastischen Funktionalitäten und u. a. zu Quantum-Bit-Supercomputern führen werden.

Aus diesen Gründen wird die Halbleiterindustrie zusätzlich die in Abbildung 4.2 dargestellten Elemente benötigen und es ist sinnvoll, sich über ihre Verfügbarkeit klar zu werden.

Aluminium (Al) ist in der Erdkruste mit sagenhaften 8,2% vertreten (Lide 2005), sodass seine Reserven ähnlich wie die von Silizium (Si) und Sauerstoff (O) als unerschöpflich gelten können. Es kommt zwar wegen seiner

hohen chemischen Reaktivität nie gediegen metallisch, sondern stets nur in fester Bindung mit anderen Stoffen vor. Aber durch genügend Energieeinsatz (vor allem elektrischer Energie) kann es in riesigen Mengen gewonnen werden, stellt also kein Ressourcenproblem dar.

Stickstoff (N) ist ein ähnlich günstiger Fall: Es kommt im Gestein gebunden zwar nur mit  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  (!) vor (Lide 2005), bildet jedoch 78% unseres Atmosphärendruckes und ist damit ein ungeheuer großes und durch die vollständige Äquilibrierung der Partialdrücke durch Diffusion ein überall sehr leicht zugängliches Reservoir. Selbst eine leichte Verringerung des N-Anteils durch massive technische Nutzung sollte für das Leben auf der Erde keine essenzielle Bedrohung darstellen.

Ganz anders stellt es sich bereits beim Gallium (Ga) dar: Es gibt in der Erdkruste nur ca.  $14 \text{ mg kg}^{-1}$  Ga (Lide 2005), sodass wir es hier mit einer um viele Größenordnungen reduzierten Verfügbarkeit zu tun haben. Arsen gibt es nur zu etwa  $5,5 \text{ mg kg}^{-1}$  in der Erdkruste (Lide 2005), ist also noch einmal deutlich seltener als Ga. Indium (In) schließlich ist nur mit  $0,24 \text{ mg kg}^{-1}$  vertreten (Lide 2005) und damit schon sehr selten. Trotz dieses ernüchternd geringen relativen Anteils ist die absolute Masse immerhin so groß, dass sie durchaus die industrielle Nachfrage über sehr

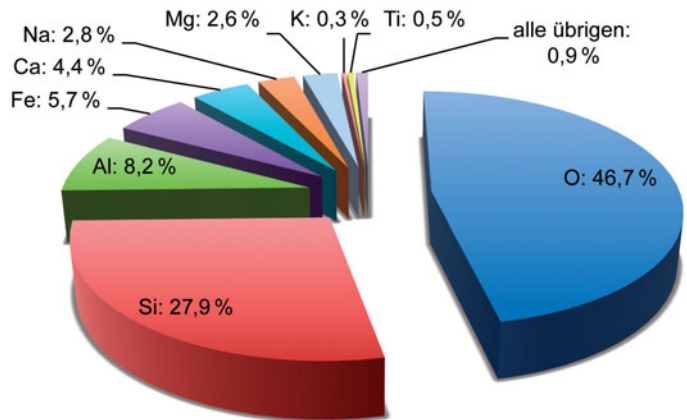


Abb. 4.2 Häufigkeiten (Gew. %) der wichtigsten chemischen Elemente in der kontinentalen Erdkruste. Quelle: Durchschnitt der Daten, Reimann und de Caritat (1998)

lange Zeit befriedigen kann. Das liegt an folgender Überlegung:

Zum Glück braucht die Halbleiterindustrie keine „Volumen“-Elemente, also solche, die in einer Größenordnung von kg oder gar Hunderten von kg in jedem technischen Objekt installiert werden müssten. Ein Auto benötigt fast eine Tonne Eisen (Fe); für eine komplette funktionelle Lage in einem Chip, der dieses Auto kontrollieren kann, benötigen wir dagegen nur ein paar Mikrogramm ( $\mu\text{g}$ ), also 12 Größenordnungen weniger! Da mittlerweile bereits um die 100 Chips pro Fahrzeug verbaut werden, reduziert sich das auf ein Verhältnis von  $10^{10}$ , was aber immer noch enorm ist. Und nicht eingesetztes Halbleitermaterial (das z. B. neben den *wafer/chip* auf Halterungen oder Wandungen der Vakuumanlage gedampft wird) kann in der Fabrik relativ leicht wieder rezykliert werden.

Anders sieht es mit bereits verbauten Chips aus: Hier ist das Extrahieren der sehr kleinen Mengen in der Regel unwirtschaftlich, sodass ein Recycling fast unmöglich wird. Deutlich größere Mengen werden übrigens im elektrotechnischen Weichlot eingesetzt, das in den letzten Jahren wegen der Toxizität von Blei (Pb) von in großen Mengen verfügbaren Blei-Zinn-Loten (PbSn) unglücklicherweise auf das sehr rare Indium (In) umgestellt wurde. Indium wird nicht nur als konstitutionelles Element, also stöchiometrisch relevant, in Verbindungshalbleitern aktiv funktionell eingesetzt, sondern auch in optisch transparenten, aber elektrisch hoch leitfähigen In-Sn-Oxid („*Indium Tin Oxide*“ ITO)-Schichten benötigt. Praktisch alle Flachbildschirme, vom kleinsten Display über Mobiltelefon-Anzeigen bis zu TV-Großbildschirmen benötigen ITO, egal, ob es Flüssig-Kristall-Displays oder organische LEDs sind. Insofern ist es sehr schade, diese seltene und für die Halbleiterfunktionalität relevante Ressource Indium für das bloße Lötverbinden in großen Volumina zu opfern. Es gibt diverse Eutektika, die ebenfalls einen niedrigen Schmelzpunkt wie In aufweisen und

auch sehr gut zum Weichlöten eingesetzt werden können.

In den letzten Jahren ist als halbleitertechnische Alternative Kohlenstoff (C) entwickelt worden, dessen monoatomar dünne Einzelschichten elektrisch relativ hochleitend sind. Dieses Material nennt man „Graphen“ und man kann es aus natürlichem Graphit „exfolieren“, d. h., die Graphen-Schichten von der Oberfläche des Graphits ablösen. Sollte sich Graphen zu einem der hauptsächlich eingesetzten Halbleiter entwickeln, stellt sich auch hier die Frage nach der Verfügbarkeit. Kohlenstoff liegt mit  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  in der Erdkruste zwischen Si und Ga, ist also für Halbleiter-Maßstäbe ausreichend vorhanden.

Alle oben genannten relativen Mengenangaben beziehen sich natürlich nur auf die Existenz dieser Elemente in unserem Raumschiff Erde, nicht auf ihre tatsächliche, wirtschaftlich sinnvoll abbaubare Verfügbarkeit. Doch wenn die Menschheit ein bestimmtes Element für echte Schlüsseltechnologien tatsächlich exklusiv benötigt, wird der Preis so weit steigen, dass auch – heutzutage noch nicht abbauwürdige – Lagerstätten geringerer Konzentration erschlossen werden (können).

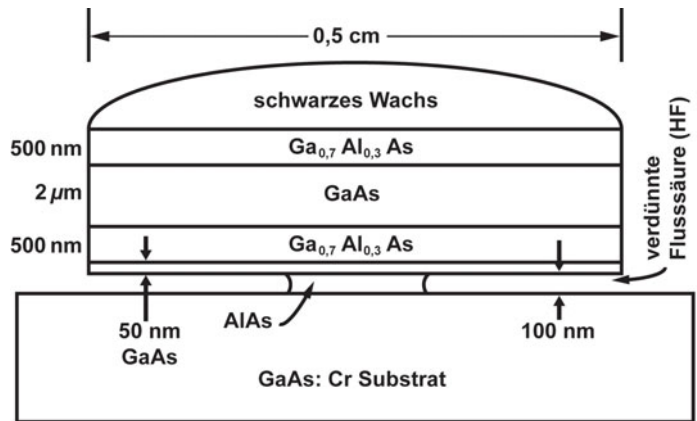
Hochwertige Halbleiterschichten werden heute epitaxiell hergestellt, d. h. einkristallin auf eine Substratscheibe (engl. „*wafer*“) gleicher Gittersymmetrie und -konstanten aufgewachsen. Das gilt für Si, Ge und insbesondere für die Verbindungshalbleiter aus der 3. und 4. sowie aus der 2. und 6. Hauptgruppe. Funktionell aktive Schichten haben eine Dicke von nur etwa  $\mu\text{m}$ , die *Wafer* aber fast mm, sind also etwa  $10^3$  dicker. Wenn wir dieses *Wafer*-Material sparen könnten, das ja elektrisch keine Funktionalität hat, sondern nur zum Wachstum der  $1 \mu\text{m}$  dünnen Schicht und ihrer mechanischen Stabilisierung dient, würden wir 99,9% weniger Material wie z. B. GaAs benötigen. Seit über zwei Dekaden wird dieser „epitaxiale Lift-off“ tatsächlich eingesetzt: Beispielsweise wird auf einen 1 mm dicken GaAs-*Wafer* eine 100 nm dünne AlAs-„Opferschicht“ aufgebracht

4

(Yablonovitch et al. 1987; Abb. 4.3). Dann wird die 1  $\mu\text{m}$  dicke GaAs-Schicht darüber gewachsen und mit einem organischen, mechanischen Stabilisator (Wachs oder Plexiglas) bedeckt. In der verdünnten Flusssäure (HF) wird dann die 1  $\mu\text{m}$ -GaAs-Schicht mit diesem Stabilisator durch Auflösen der AlAs-Schicht abgelöst und auf ein preiswertes Substrat, z. B. Fensterglas, über van-der-Waals-Bindungen aufgeklebt

(Yablonovitch et al. 1990). Danach steht der „nackte“ 1 mm dicke GaAs-Wafer für die nächste Epitaxie wieder zur Verfügung und kann als „Muttersubstrat“ theoretisch beliebig oft wieder eingesetzt werden. Mit dieser Methode kann die Halbleiterindustrie 3 Größenordnungen an Material sparen und damit auch das Recycling von verbauten Chips faktisch überflüssig machen.

**Abb. 4.3** Schema der Ablösung einer epitaxiellen Schicht von einem viel dickeren GaAs-Mutterwafer. Dieses Verfahren ist in der Original-Veröffentlichung an Proben mit 5 mm Durchmesser durchgeführt worden, funktioniert aber auch bei Durchmessern von mehreren Zentimetern. Quelle: nach © Yablonovitch et al. (1987)



Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Halbleiter-Si-Technologie auf der Erde unerschöpfliche Materialquellen vorfindet. Kompliziertere Halbleiterstrukturen wie Verbundhalbleiter aus der 3. und 5. bzw. auch aus der 2. und 6. Hauptgruppe benötigen chemische Elemente, die bis zu etwa 6 Größenordnungen seltener in der Erdkruste zu finden sind. Durch den sparsamen „Nicht-Volumen“-Einsatz dieser Elemente einerseits und innovativer Herstellungs- und Verarbeitungstechniken andererseits gelingt es jedoch auch hier, die Vorkommen auf der Erde sehr effizient zu nutzen und der Menschheit auf unabsehbare Zeit ausreichend zur Verfügung zu stellen. Mit hoher Sicherheit wird das Reservepotenzial

von Halbleitern auf der Erde bis zu der Zeit reichen, in der die Menschheit interplanetare Kolonialmissionen unternehmen wird.

## Danksagung

Ich danke Jean-Yves Duboz und Borge Vinter für ihre Gastfreundschaft während meines Sabbaticals 2011/12 am CRHEA des CNRS in Sophia-Antipolis sowie für die finanzielle Unterstützung durch die Deutsch-Französische Hochschule DFH-UFA / Saarbrücken im Rahmen des Doktorandenkollegs CDFA 05/06.



## Quellenverzeichnis

- Lide DR (2005) Abundance of elements in the Earth's crust and in the sea. Geophysics, astronomy, and acoustics. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85. Auflage, CRC Press, Boca Raton, Florida
- Reimann C, de Caritat P (1998) Chemical Elements in the Environment: Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist. Springer-Verlag, Berlin
- Yablonovitch E, Gmitter T, Harbison JP, Bhat R (1987) Extreme selectivity in the lift-off of epitaxial GaAs films. Appl Phys Lett. 51: 2222
- Yablonovitch E, Hwang DM, Gmitter T, Florez LT, Harbison JP (1990) Van der Waals bonding of GaAs epitaxial lift-off films onto arbitrary substrates. Appl Phys Lett. 56: 2419

## Kernaussagen

- Standardisierung von Komponenten kann erheblich zum effizienteren Umgang mit Ressourcen führen.
- Die Halbleiterindustrie basiert auf Silizium (Si). Das wird sich vorerst nicht ändern, nicht nur wegen der ausreichenden Verfügbarkeit des Rohstoffes, sondern auch wegen der weit fortgeschrittenen Beherrschung dieser Technologie.
- Insbesondere in der Hochfrequenztechnik haben sich bereits GaAs und GaN als wesentlich bessere Komponenten gegenüber dem Si erwiesen.
- Gallium (Ga), Germanium (Ge) und Indium (In) kommen in sehr geringen durchschnittlichen Konzentrationen in der Erdkruste vor, d. h., es besteht eine sehr eingeschränkte Verfügbarkeit, selbst wenn die Verwendung dieser Elemente in einem Produkt extrem gering bleibt; sie beträgt wenige Mikrogramm ( $\mu\text{g}$ ).
- Die technische Entwicklung wird zu weiteren erheblichen Einsparungen führen, wie an einem Beispiel („epitaxial liftoff“ vom GaAs *Wafer*) dargestellt wird.



# 5 Marktpreisrisiken rohstoffintensiver Unternehmen – Identifikation und Management

Ein idealtypischer Prozess zur Risikosteuerung einer „Urban Nickel Mine“

*Roland Mauss und Peter N. Posch*

Entscheidungen unter Unsicherheit sind das zentrale Merkmal jeglichen Unternehmertums. Dieses generelle Risiko begleitet uns in jeder Entscheidungssituation und stellt auch in den Finanzmärkten ein ehernes Gesetz dar: Die Übernahme von Risiko wird durch eine Prämie vergütet. Daher gibt es eine höhere erwartete Rendite auf die Aktie eines kleinen Unternehmens als auf die Anleihe eines großen Staates.

Spätestens seit der Finanz- und Schuldenkrise 2008 hat sich die Risikolandschaft jedoch deutlich und nachhaltig verändert. Durch das Zusammenspiel volkswirtschaftlicher und finanzmarkttechnischer Entwicklungen sind wir in eine Phase zunehmender Preisschwankungen, also steigender Volatilität geraten. Als Beispiel sei hier der Rohstoffindex von Standard & Poor's und Goldman Sachs GSCI genannt. Dieser Index hatte einen Wertzuwachs von jährlich etwa 3,1 % im Zeitraum 1970–2000. Dies entspricht in etwa der durchschnittlichen Inflationsrate; somit haben die im Index enthaltenen Rohstoffe im Schnitt real ihren Wert erhalten. In den letzten zwölf Jahren betrug der jährliche Zuwachs jedoch über 20 %; die Preisvolatilität war sichtbar höher, wie Abbildung 5.1 verdeutlicht.

In einem derartigen Umfeld wird die unternehmerische Entscheidung durch volatile

Marktwertveränderungen einem erhöhten Risiko ausgesetzt. Dieses Marktrisiko gilt es durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren. Eine neue Dynamik hat dieses Thema auch durch die erheblichen Preissteigerungen bei fast allen Rohstoffen erhalten. Gründe hierfür finden sich u. a. in der Nachfragesteigerung aus den sich entwickelnden Volkswirtschaften, z. B. den BRIC-Staaten, dem Eigenverbrauch und dem zunehmenden Einfluss von spekulativen Interessen, die Rohstoffe als neue Investitionsmöglichkeit betrachten.

Der vorliegende Beitrag fokussiert auf das Management von Unternehmen zur Identifikation und Reduzierung von Rohstoffpreisrisiken. Dabei wird die Beschreibung eines gewissermaßen idealtypischen Prozesses zur Gestaltung und Umsetzung eines Risikomanagements durch konkrete Beispiele und Erfahrungen aus der Unternehmenspraxis der KMR Stainless-Gruppe illustriert und vervollständigt.

Im Folgenden werden wir zuerst auf die besonderen Anforderungen im Risikomanagement bei rohstoffintensiven Unternehmen eingehen. Derartige Unternehmen kombinieren eine Vielzahl von Risikotreibern; und die fundierte Kenntnis und Analyse der geschäftsspezifischen Risiken müssen einer jeglichen Absicherungsstrategie voranstellen.

5

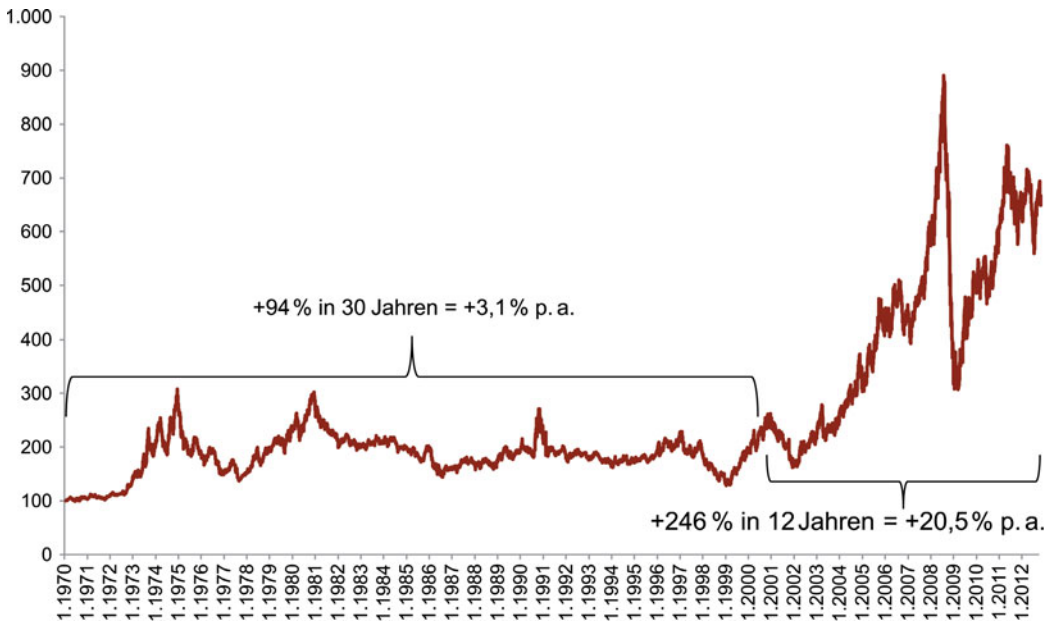


Abb. 5.1 Der S&P GSCI-Rohstoffindex umfasst 24 verschiedene Rohstoffe-Spotpreise.  
Datenquelle: Bloomberg (2012)

Zunächst gehen wir auf die Risikoidentifikation sowie die typischen Probleme eines rohstoffintensiven Unternehmens ein. Im Rahmen dieser Einführung werden wir das Rohstoffunternehmen KMR Stainless AG vorstellen und im weiteren Verlauf als Praxisbeispiel für die theoretischen Schritte im Rahmen eines idealtypischen Risikoprozesses nutzen. Der darauf folgende Abschnitt stellt Wege zur Risikoabsicherung vor, die im dritten Abschnitt praktisch angewandt werden.

## 5.1 Risikoidentifikation und Risikodimensionen bei Rohstoffunternehmen

Zielgrößen beim Risikomanagement von Rohstoffen sind im Wesentlichen die Versorgungs-

sicherheit und der Schutz vor Preisschwankungen. Bei der Entscheidung in Unternehmen, für welche kritischen Rohstoffe ein Risikomanagement aufgebaut werden soll, spielt neben der eigentlichen Kritikalität im Sinne der Versorgungssituation oder Knappheit, auch die individuelle Betroffenheit oder Vulnerabilität eines Unternehmens bzw. der jeweiligen Produkte bezüglich der kritischen Rohstoffe eine entscheidende Rolle. Erste wissenschaftliche Studien dazu wurden durchgeführt (TU Berlin im Auftrag von Oryx Stainless sowie Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) in Kooperation mit adelphi, Berlin, im Auftrag der KfW-Bankengruppe). Diese Arbeiten kommen, in einer wesentlichen Erweiterung der bisher vorherrschenden geologischen Sichtweise, zu einer umfassenderen Beurteilung der Knappheit von Rohstoffen. Insbesondere werden auch ökonomische Kriterien in die Betrachtung einbezogen, wie

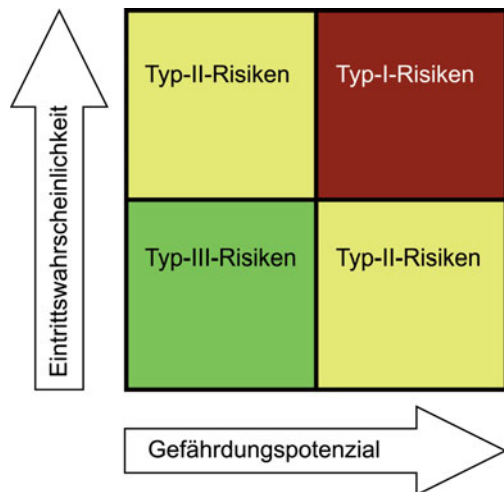
z.B. Marktkonzentration, politische Stabilität in den Förderländern, erwartetes Nachfragerwachstum, bestehende Außenhandelsbeschränkungen oder Recyclingfähigkeit und -rate. Aktuell leistet der Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) Pionierarbeit mit der VDI-Richtlinie 4599 „Kumulierter Rohstoffaufwand“ als Bestandteil einer Richtlinienfamilie zur Ressourceneffizienz auf nationaler Ebene. Zielsetzung ist ein weithin anerkannter und wissenschaftlich abgesicherter Ansatz zur Analyse und Bewertung der Ressourceneffizienz von Rohstoffen und den damit verbundenen Risiken. Diese Arbeit wird vermutlich auch auf europäischer Ebene richtungsweisend sein. In diesem Zusammenhang ist auch eine verbindliche Definition des Begriffs der „Ressourceneffizienz“ notwendig, da derzeit verschiedene Fachrichtungen mit diesem Begriff unterschiedliche Zielsetzungen verbinden. Auch ist zu betonen, dass die Zeitzyklen der Produkte sowie die typischerweise längeren Zyklen in der Bergbauproduktion zu beachten sind. Die Schnelllebigkeit moderner Finanzmärkte steht hier im Kontrast zu langfristigen Planungs- und Explorationszeiten in der physischen Welt.

Am Anfang eines jeden Risikomanagements steht die Identifikation der unternehmerischen Risiken. Als ersten Ansatz überprüft man die Prozesse entlang der Wertschöpfungskette auf Risiken und deren Auswirkungen. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass nicht alle möglichen Risiken eine tatsächliche Verlustgefahr für das Unternehmen darstellen müssen. Auch ist die bewusste Übernahme von Risiken Teil der unternehmerischen Entscheidung und auch Beitrag zum Geschäftserfolg. Welche Risiken sollte man also einer genaueren Betrachtung würdigen? Bei dieser Entscheidung ist eine Gliederung in die Dimensionen „Eintrittswahrscheinlichkeit“ und „Gefährdungspotenzial im Eintrittsfall“ hilfreich (Abb. 5.2).

Hierbei sind die Typ-I-Risiken durch ein hohes Gefährdungspotenzial im Eintrittsfall sowie eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit unbedingt vorrangig zu adressieren. Typ-II-

Risiken erfüllen entweder das Kriterium der hohen Eintrittswahrscheinlichkeit bei geringem Gefährdungspotenzial oder ein hohes Gefährdungspotenzial mit niedriger Eintrittswahrscheinlichkeit. Auch diese Risiken müssen im Rahmen der Gesamtbewertung beachtet werden, stellen jedoch ein reduziertes Bedrohungspotenzial für die Unternehmung dar. Die letzte Kategorie weist sowohl eine niedrige Eintrittswahrscheinlichkeit als auch ein niedriges Gefährdungspotenzial auf und muss in vielen Fällen nicht besonders adressiert werden. Selbstverständlich kann diese grobe Einteilung verfeinert werden; es ist allerdings darauf zu achten, hier keiner Scheingenauigkeit zum Opfer zu fallen.

Wir stellen diese Kategorisierung der Einteilung in verschiedene Risikobereiche voran, da im Rahmen einer pragmatischen Risikoidentifizierung die Dringlichkeit Vorrang vor der Vollständigkeit haben sollte. Wie kann man nun Risiken konkret kategorisieren und identifizieren? Aus der Vielzahl der in der Literatur



**Abb. 5.2** Klassifikation nach Risikotypen in den Dimensionen Eintrittswahrscheinlichkeit und Gefährdungspotenzial

## 5

diskutierten Ansätze stellen wir im Folgenden einen pragmatischen Ansatz für rohstoffintensive Unternehmen dar. In einer ersten Kategorisierung kann man zwischen auf die Unternehmung bezogenen externen und internen Risiken unterscheiden. Erstere betreffen etwa die gesamtwirtschaftliche Lage, die politischen Rahmenbedingungen oder die Regulierung (► Kap. 3). Die internen Risiken sind die Unternehmensrisiken im engeren Sinne und können weiter in strategische und operative Risiken unterteilt werden. Die finanziellen Risiken können hierbei als separate Kategorie betrachtet werden, da sie sowohl externen als auch internen Einflüssen unterliegen; Letztere sind bei Industrieunternehmen häufig Teil der operativen Tätigkeit.

Strategische Risiken betreffen beispielsweise die Produktgestaltung, Wettbewerbssituation oder auch technische Substitutionsmöglichkeiten. Die operativen Risiken entwickeln sich anhand der Unternehmensprozesse. Diese sind entlang der Wertschöpfungskette zu identifizieren.

Als Risikoidentifikationsmethode eignen sich insbesondere strukturierte Interviews oder Workshops. Dabei werden typische Analysemodelle, wie beispielsweise die SWOT-Analyse, flankierend bemüht (das Akronym SWOT steht für Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken – engl. *Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*). Kern sollte jedoch das Verständnis von Marktposition und Wertschöpfungskette des Unternehmens sein. Nur anhand dieser Kriterien kann ein wertbasiertes Risikomanagement die Geschäftstätigkeit unterstützen. Mittels dieser Informationsgewinnung erhält ein externer Blick die relevanten Risikotreiber und ordnet diese entsprechend der Dringlichkeit an. Je dezentraler die Aufgaben in dem zu betrachtenden Unternehmen gestaltet sind, umso wichtiger ist dieses strukturierte, externe Benchmarking zur Vermeidung von Verzerrungen in der Risikowahrnehmung.

Bevor wir uns den finanziellen Risiken zuwenden, seien der Vollständigkeit halber die zeitlich folgenden Abschnitte des Risiko-

managements skizziert. Nach Identifikation und Bewertung der Risiken erfolgt die Erstellung der Risikostrategie. Hierbei ist insbesondere die unternehmerische Entscheidung zu treffen, welche Risiken wie adressiert werden und welche man bewusst in Kauf nimmt. Da es sich um eine strategische Entscheidung handelt, sind hier das Management und ggf. auch die Eigentümer in der Pflicht. Als Folge der Risikostrategie kann nun die Implementierung der Risikosteuerung beginnen. In der Steuerung werden die Risiken sowohl bewertet als auch beherrscht.

## Rohstoffrisikomanagement

Die Anforderungen an das Management von Rohstoffrisiken sind vielfältig. So sind zum einen das Beschaffungsrisiko (► Kap. 8) sowie die Eigenschaften beim Handel mit physischen Gütern spezifische Besonderheiten in den Anforderungen eines rohstoffintensiven Unternehmens.

Im Allgemeinen klassifiziert man das spezifische Rohstoffrisiko als Teil des Marktrisikos, das wiederum als finanzielles Risiko aufgefasst wird. Zu den weiteren finanziellen Risiken gehören die Kredit- und Liquiditätsrisiken, die eng mit dem Marktrisiko verknüpft sind (Abb. 5.3). Die Erfassung der gegenseitigen Abhängigkeit und Beeinflussung dieser Risikoklassen ist für ein ganzheitliches Management unerlässlich. So ist eine Umsetzung von Preisabsicherungen ohne die Beachtung der Kredit- und Liquiditätsposition langfristig ebenso unmöglich wie umgekehrt die Kontrolle jener Positionen ohne die Beachtung der Marktrisiken.

Die wichtigsten Risikobereiche im Marktrisiko sind Zins-, Rohstoff- und Währungsrisiko. Die Trennung in verschiedene Bereiche dient der systematischen Kategorisierung; in der Praxis überlappen die Risikobereiche und beeinflussen sich gegenseitig. Dies macht das Rohstoffrisikomanagement so komplex und ein umfassendes Verständnis der Einfluss-

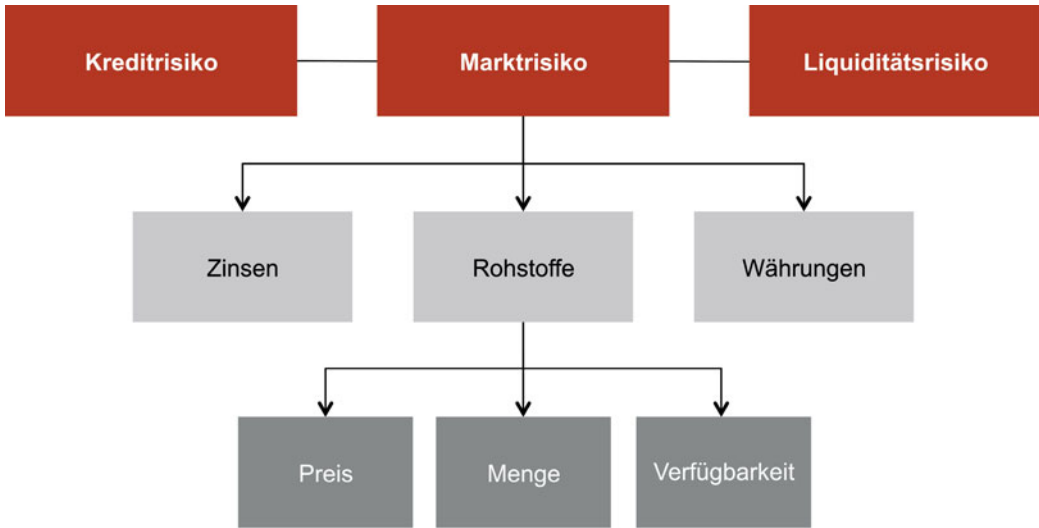


Abb. 5.3 Klassifikation des finanziellen Risikos

faktoren unerlässlich. Letztere Marktbereiche korrelieren eng und beeinflussen die Position rohstoffintensiver Unternehmen umgehend. Das Rohstoffrisiko betrifft einerseits die Beschaffung und das damit verbundene Mengenrisiko. Andererseits umfasst es zwei Arten des Preisrisikos, die negative Wirkung auf das Unternehmensergebnis entfalten: sinkende Verkaufspreise und steigende Einkaufspreise.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass eine Absicherungsstrategie von Metallpreisrisiken in aller Regel auch eine Absicherung des assoziierten Wechselkursrisikos beinhalten sollte. Denn die gängigen Rohstoffpreise werden auf den internationalen Rohstoffmärkten ganz überwiegend in US-Dollar notiert. Damit ergibt sich zwangsläufig, dass ein entsprechendes Währungsrisiko zwischen der Abrechnungs- und der Rohstoffwährung entsteht, wenn weitere Währungen in Ein- und Verkauf eine Rolle spielen. Darüber hinaus können sich aus Wechselkursentwicklungen auch Einflüsse auf die Bilanz ergeben. Für den Euroraum wäre das bei Ein- und Verkauf sowie Bilanzierung typischerweise ein US-Dollar-/Euro-Risiko. Zur

Absicherung des Wechselkursrisikos ist es dann auch erforderlich, zusätzlich entsprechende Fremdwährungssicherungen abzuschließen.

Es ist zu beachten, dass man diesen Rohstoffrisiken nicht nur im Rahmen eines finanziellen Risikomanagements begegnen kann. Die Reduktion von Kosten kann, je nach Unternehmen in unterschiedlichem Maße, einerseits über den strategischen Einkauf und andererseits durch die Weitergabe von Preissteigerungen an den Kunden erfolgen. Auch eine Erhöhung der Produktionseffizienz kann über Mengenreduktion und möglicherweise Materialsubstitution zu einer Verringerung der Rohstoffrisiken beitragen. Allerdings sind diese Möglichkeiten, ebenso wie strategische Veränderungen des Geschäftsmodells oder der Produktdiversifikation, stark von der Unternehmenssituation abhängig. Die Absicherung von Marktpreisrisiken, wie sie im Folgenden vorgestellt wird, ist hingegen grundsätzlich von jedem Unternehmen umsetzbar. Hierbei wird der Marktmechanismus genutzt, welcher zur Entstehung der Risiken beigetragen hat, um diese sinnvoll zu reduzieren.

## 5

## Risikosituation einer Urban Mine

Edelstahlschrott wird neben den aus Erzen raffinierten Primärrohstoffen wie zum Beispiel Ferronickel (FeNi) und Ferrochrom (FeCr) mit einem Anteil von rund 50 % als Ausgangsrohstoff für die Produktion nichtrostender Edelstähle eingesetzt. Die Vorteile des Sekundärrohstoffs Edelstahlschrott liegen neben einem direkten Preisvorteil auch in einer höheren Energie- und CO<sub>2</sub>-Effizienz.

Edelstahl ist eine Legierung, die je nach konkreter Werkstoffnummer, neben Eisen (Fe) als Basis und anderen metallischen und nichtmetallischen Elementen, vor allem die Legierungsmetalle Chrom (Cr), Nickel (Ni) und gegebenenfalls Molybdän (Mo) enthält. Die Legierungselemente verhelfen dem Stahl zu den erwünschten Materialeigenschaften der Rost-, Säure- und Hitzebeständigkeit, die für die Einsatzmöglichkeiten von Edelstahl einen erheblichen Vorteil gegenüber den ge-

wöhnlichen Kohlenstoffstählen darstellen. Aus der Abbildung 5.4 kann man für den Produktionsmix des Edelstahlherstellers Outokumpu entnehmen, dass der Volumenanteil von Ni bei Edelstahl bei 8,2 % pro Tonne liegt. Gemessen am Wert ist Ni hingegen mit 75,6 % die alles überragende Größe.

Damit wird klar, warum gerade der Ni-Preis für das Geschäft mit Edelstahl beziehungsweise Edelstahlschrott eine so wesentliche Bedeutung hat. Daher wird sich auch die weitere Betrachtung auf den Rohstoff Ni fokussieren, der als ein Risikotreiber der Geschäftstätigkeit identifiziert wurde. Es sei der Vollständigkeit halber darauf hingewiesen, dass es auch bei den Rohstoffen Cr, Mo und Fe sowie weiteren hier nicht genannten Legierungselementen zu erheblichen Preisschwankungen und damit der Notwendigkeit eines professionellen Risikomanagements kommen kann.

Die KMR Stainless-Gruppe mit ihrer Marke Oryx Stainless ist weltweit der drittgrößte Edelstahlschrotthändler. Zu den Kunden der

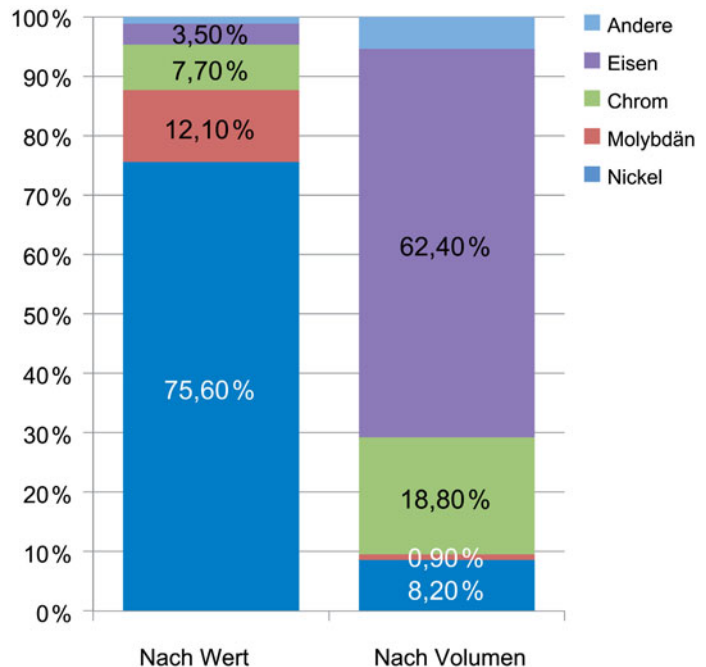


Abb. 5.4 Material und Wertanteil an einer Tonne Edelstahl. Quelle: nach © Outokumpu Oyj (2007)



Unternehmensgruppe mit Aktivitäten in Deutschland, den Niederlanden und Asien zählen die großen, global tätigen Edelstahlhersteller.

Als Aufbereiter und Händler von Rohstoffen ist Oryx Stainless in besonderem Maße und auch sehr unmittelbar den Änderungen der Rohstoffpreise auf der Beschaffungs- und Absatzseite ausgesetzt. Insbesondere der zwischen Einkauf und Verkauf liegende Zeitraum oder genauer gesagt zwischen Preisfixierung auf der Ein- und Verkaufsseite gilt es, hinsichtlich Preis- und Wechselkursänderungen zu steuern.

Die schematische Abbildung 5.5 zeigt die Einbindung von Oryx Stainless in den Prozess der Edelstahlproduktion als rote Raute. Aufgrund des nicht unerheblichen Know-hows zur Konfektionierung von direkt im Stahlwerk einsetzbaren Rohstoffblends und dem damit vorhandenen „Produktionsprozess“ erbringt Oryx Stainless eine Wertschöpfung, die weit

über die Bezeichnung eines Schrotthändlers hinausgeht. Komplementär zu den Bergbaugesellschaften, die Edelstahlproduzenten mit Primärrohstoffen versorgen, beliefert Oryx Stainless die Hüttenwerke mit individuell auf die Kundenbedürfnisse abgestimmten Rohstoffmischungen (Blends), die aus den verschiedensten Edelstahlschrottsorten zusammengestellt werden.

Dabei werden die Sekundärrohstoffe vorwiegend zu Festpreisen und in vergleichsweise kleinen Mengen, wie zum Beispiel einer Lkw-Lieferung oder einem Eisenbahn-Waggon oder Seecontainer, auf den nationalen und internationalen Beschaffungsmärkten bezogen. Lieferanten sind in diesem Zusammenhang vorgelagerte Handelsstufen, deren Fokus nicht wie bei Oryx Stainless ausschließlich auf Edelstahlschrott liegt, ebenso Entsorgungs- und Recyclingunternehmen und Unternehmen aus dem Industrieanlagenabbau und der Edelstahlverarbeitung. Die

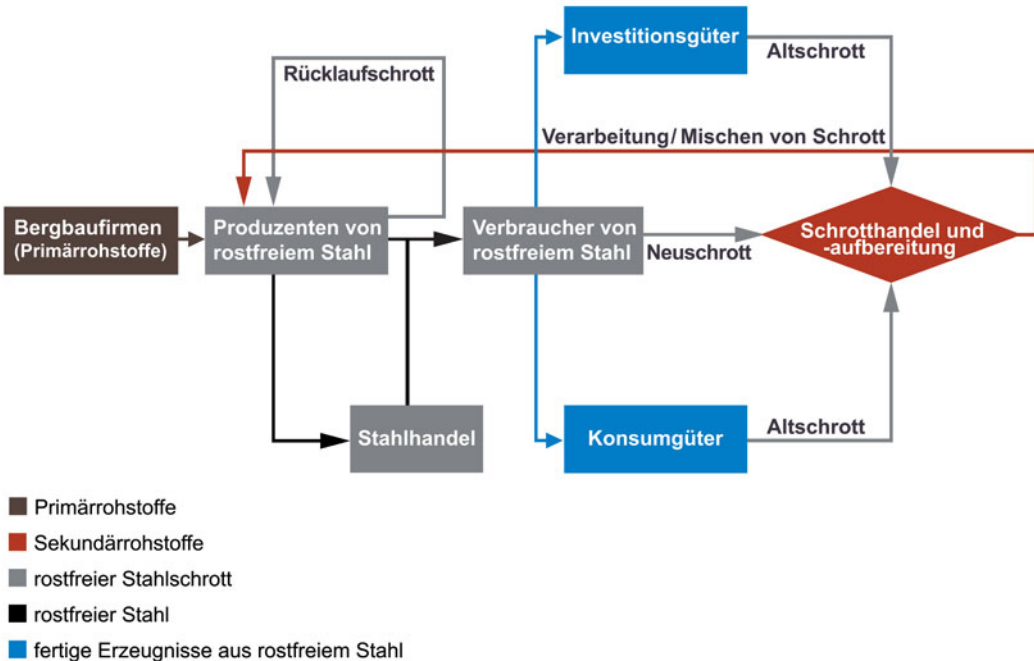


Abb. 5.5 Prozess einer Urban Mine. Quelle: übersetzt nach © Oryx Stainless (2012)

5 Einkaufsparameter, wie Menge, Preis, Währung, Qualität, chemische Spezifikation sowie Liefer- und Zahlungskondition werden in entsprechenden Einkaufsverträgen festgehalten.

Mit dem Zeitpunkt des Abschlusses eines Einkaufsvertrags zum Festpreis über eine bestimmte Menge Schrott, die qua metallurgischer Analyse einen bestimmten prozentualen Ni-Gehalt hat, entsteht für diese Ni-Menge ein Ni-Preisänderungsrisiko. Dieses Risiko und damit die Situation der Ungewissheit hinsichtlich der endgültigen Verkaufsmarge endet theoretisch erst dann, wenn eine ebenso große Menge Ni-Inhalt zu einem fixierten Preis an einen Abnehmer veräußert wird und damit auf beiden Seiten ein endgültiger Preis vereinbart ist.

Die Herausforderung bei Oryx Stainless hinsichtlich des Ni-Preisrisikos besteht vor allem darin, dass Einkauf und Verkauf zeit- und mengenmäßig auseinanderfallen. So ist es in der Regel nicht möglich, physische Ein- und Verkaufstransaktionen schon beim Abschluss der Lieferverträge miteinander zu verknüpfen. Der Grund ist, dass aus vielen kleineren Einkaufsmengen am Ende eine große Verkaufslieferung zusammengestellt wird, deren Verkaufsvertrag unter Umständen zum Zeitpunkt der entsprechenden Schrotteinkäufe noch gar nicht vorliegt. Auch ist es mittlerweile nur noch selten so, dass der Ni-Inhalt im Schrott durch die Kunden (Edelstahlwerke) zu einem Festpreis vergütet wird. Stattdessen wird häufig eine Preisformel vereinbart, die für die Ni-Preisermittlung beispielsweise den Monatsdurchschnitt der offiziellen Ni-Fixings an der London Metal Exchange des Liefermonats zugrunde legt.

Außerdem vergeht zwischen Einkauf, Lieferung, Verarbeitung und Verkauf nicht selten – gerade bei Importware aus Übersee – viel Zeit. Doch selbst bei kürzeren Lieferzyklen besteht aufgrund der hohen Volatilität des Ni-Kurses ein deutliches Preisänderungsrisiko. Alle diese Besonderheiten muss das Risikomanagement von Oryx Stainless berücksichtigen.

## 5.2 Wege zur Risikoabsicherung

Die grundsätzlichen Zielsetzungen der Risikoabsicherung liegen in der Kompensation der Risiken eines physischen Geschäfts durch ein gegenläufiges Absicherungsgeschäft und damit der Glättung des Ergebnisses. Dies sichert eine stabile Kalkulationsbasis für die eigenen Produkte und letztlich über die Sicherung des Eigenkapitals die Existenz des Unternehmens; mindestens jedoch die Fokussierung auf das eigentliche Kerngeschäft. Auch die Verbesserung von (Bilanz-)Kennzahlen, z. B. im Rahmen von Finanzierungsvereinbarungen, die Verbesserung von (Bank-)Ratings sowie die Dokumentation einer Absicherungsstrategie für Investoren und Stakeholder ist ein Nebenprodukt einer Risikostrategie. Hierbei gibt es neben den Finanzmarktinstrumenten eine Reihe anderer operativer Möglichkeiten der Risikoreduktion. Beide werden im Folgenden vorgestellt.

### Operative Möglichkeiten

Die einfachste Form des operativen *Hedgings* besteht – falls es das Geschäftsmodell erlaubt – im Abschluss von in sich abgeschlossenen Ein- und Verkaufstransaktionen, sogenannte *Back-to-back-Kontrakte*. Hierbei werden Ein- und Verkaufspreis im möglichst gleichen Augenblick festgelegt. Ferner besteht die Möglichkeit, durch die Erzielung einer hohen Umlaufgeschwindigkeit zumindest für den Warenbestand eine marktnahe Bewertung sicherzustellen. Das sollte jedoch nicht als Extrem zu einer übermäßig niedrigen Bestandshaltung führen. Denn in rohstoffnahen Geschäften besteht durch eine kontinuierliche Präsenz und Teilnahme an den Beschaffungsmärkten ein ganz erheblicher Vorteil. In aller Regel dürfte man damit dem durchschnittlichen Rohstoffpreis einer jeweiligen Periode wesentlich näher kom-

men, als wenn das Unternehmen durch eine sehr erratische und ausschließlich am unmittelbaren Bedarf („von der Hand in den Mund“) orientierte Beschaffungspolitik nur dann kauft, wenn „alle“ kaufen. Die letztgenannte Einkaufspolitik führt regelmäßig zu suboptimalen, durchschnittlichen Einkaufspreisen.

Wenn es um die Vermeidung von Preisrisiken geht, kommt, häufig in Abhängigkeit von der bestehenden Markt- bzw. Verhandlungsmacht, auch die Abwälzung des Risikos mittels entsprechender Vertragsklauseln auf Lieferanten oder Kunden in Betracht. Intelligenter ist es zweifelsohne, aus der Übernahme des Managements von Preisrisiken auch für die vor- und nachgelagerten Glieder der Wertschöpfungskette, einen Wettbewerbsvorteil für das eigene Unternehmen zu generieren.

Da Unternehmen üblicherweise nicht nur gegenüber einem einzigen Rohstoff exponiert sein dürften, sondern vielmehr eine ganze Reihe von Rohstoffen in Handel oder Produktion einsetzen, sind die Korrelationen der verschiedenen Rohstoffpreise untereinander bei den Überlegungen zu berücksichtigen. Es kann sich bei entsprechenden gegenläufigen Wechselbeziehungen im Rohstoffportfolio – möglicherweise unter zusätzlichem Einbezug von Wechselkurs- und Zinsänderungsrisiken – eine Konstellation ergeben, die per Saldo eine weitgehende Neutralisierung der Risiken ergibt. Dann kann man, vor allem bei im Volumen relativ stabilen Geschäften, die Entscheidung treffen, auf ein *Hedging* mit Finanzmarktinstrumenten gänzlich zu verzichten. Allerdings muss in diesem Fall regelmäßig überprüft werden, ob Mengengerüst und Korrelationen noch wie angenommen intakt sind; denn diese Größen sind über die Zeit variabel. Selbst wenn auf Finanzmarktinstrumente zur teilweisen oder vollständigen Abdeckung der Risiken zurückgegriffen wird, sind die Portfolioeffekte immer mit zu berücksichtigen, damit man nicht von falschen Voraussetzungen hinsichtlich der tatsächlichen Absicherung ausgeht.

Währungsrisiken aus den Rohstoffen, wie vorstehend beschrieben, lassen sich wirkungsvoll dadurch neutralisieren, dass man, wenn möglich, sowohl die Ein- als auch die Verkaufsgeschäfte in US-Dollar-Währung abschließt. Zur Finanzierung sollten entsprechende US-Dollar-Kreditlinien genutzt werden. Durch diesen *Natural Hedge* kann das Währungsrisiko des Einkaufswerts vollständig abgesichert werden. Im Risiko steht dann „nur“ noch die Marge, welche man je nach Präferenz hinsichtlich Ausschüttungs- und Reservewährung absichern kann oder auch nicht.

## Finanzmarktinstrumente

Der Finanzmarkt bietet weitere Instrumente. Es ist grundsätzlich das Bestreben des Finanzmarktes, eine Gegenposition zu der bestehenden physischen Risikoposition einzugehen. Ist also physisch Material verkauft (Lieferverpflichtung), so lässt sich diese Position durch den Kauf von Finanzmarktprodukten absichern. Entsprechend steht einem physischen Kauf (oder einer Warenposition) der finanzielle Verkauf gegenüber. Es ist dieses einfache Grundprinzip, welches in der Finanzwelt tagtäglich zum Tragen kommt, jedoch für den Außenstehenden durch eigene Begrifflichkeiten schnell verwirrend wirken kann. So spricht man im Finanzmarkt von einem *long*, wenn man von einer Bestandsposition oder einer gekauften Position spricht, von einem *short* bei einer Verpflichtung oder einer verkauften Position. *Long* und *short* sind also entgegengesetzte Begriffe, eine *long*-Position sichert man durch einen *short* ab und umgekehrt.

Nur welche Finanzmarktinstrumente werden eigentlich gehandelt und wo kann man diese erwerben? Kann man beispielsweise Nickel direkt am Finanzmarkt kaufen? Diese Fragen führen uns zu der Betrachtung der Finanzmarktinstrumente und der Handels-

5

plätze. Hierbei sind grundsätzlich, sowohl für Rohstoffmärkte, Zinsmärkte als auch Währungsmärkte zwei Markttypen zu unterscheiden. Zum einen gibt es den *spot* oder *cash*-Markt, auf welchem Finanzinstrumente mit sofortiger oder sehr kurzer Lieferzeit angeboten werden, zum anderen den Terminmarkt. Der Terminmarkt bietet Produkte an, die zu einem festgelegten späteren Zeitpunkt geliefert werden. Das häufigste hier gehandelte Finanzinstrument, der *Future-Kontrakt*, gibt diesem Terminmarkt seine englische Bezeichnung als *Future-Markt*.

Ein *Future* ist ein standardisierter Kontrakt, der an Handelsplattformen gekauft und verkauft werden kann. In der Standardisierung sind die Produktspezifikationen ebenso enthalten wie die Details über den Zeitpunkt der Lieferung. Eng mit dem *Future* verwandt ist der *Forward-Kontrakt*, der in weniger starkem Maße standardisiert ist und typischerweise zwischen den Handelspartnern direkt in einem „*Over-The-Counter*“ (OTC-)Geschäft abgeschlossen wird. Die Funktionsweise beider Instrumente, *Future* und *Forward*, ist bezüglich der Wirkung als Absicherungsinstrument gleich, die bilanzielle Abwicklung sowie die Notwendigkeit zur Hinterlegung von Kreditsicherheiten beim *Future-Kontrakt*, führen jedoch praktisch zu nicht unwesentlichen Anpassungen. Bei *Future-Kontrakten* an Börsen ist bei Eingehen des Kontraktes eine Marge (*initial margin*) zu hinterlegen sowie während der Laufzeit je nach Marktsituation weitere sogenannte *Margin-Calls* (*variation margin*) zu bedienen. Dies ist bei der Einbindung der Sicherungsstrategie in das Gesamtfinanzkonzept zu beachten.

Das Prinzip eines Kontraktes mit zeitlich späterer Lieferung findet sich nicht nur bei Rohstoffen, sondern auch bei Zinsen oder Wechselkursen. Insbesondere Wechselkurse spielen im Rohstoffmanagement eine wichtige Rolle, da die meisten Rohstoffe derzeit in amerikanischen Dollar (USD) gehandelt werden. Hierdurch entsteht für ein in Euro bilanzie-

rendes Unternehmen ein Wechselkursrisiko, welches mit Terminkontrakten auf Wechselkurse oder auch Tauschgeschäften (*Swaps*) reduziert werden kann.

Grundsätzlich führt jeder Terminmarkt zu der Existenz einer Terminstrukturkurve. Diese Kurve trägt die Preise für die Terminkontrakte gegen die Laufzeit der Kontrakte ab. Es entstehen damit zwei mögliche Verläufe der Terminstrukturkurve, wie in Abbildung 5.6 veranschaulicht. Exemplarisch wird die Strukturkurve von Kupfer (Cu; Juli 2012) und Nickel (Ni; Februar 2013) gegenübergestellt.

Die Situation, in der steigende Laufzeiten mit steigenden Preisen einhergehen, bezeichnet man als *Contango*. Gründe für die steigenden Preise sind neben Lager- und Zinskosten auch die steigenden Opportunitätskosten und die Unsicherheit über zukünftige Entwicklungen. Die entgegengesetzte Situation bezeichnet man als *Backwardation*, diese wird oft von vorübergehender Knappheit der Ressource bestimmt. Die Beschäftigung mit Terminstrukturkurven ist für ein erweitertes Rohstoffmanagement sehr wichtig, ebenso wie das Verständnis der Marktbewegungen. Eine Terminstrukturkurve ist nämlich kein statisches Preisgefüge, vielmehr wird dieses von Angebot und Nachfrage nach bestimmten Terminen beeinflusst. Ein informierter Einsatz dieser Struktur ermöglicht ein zielgenaues Management der Rohstoffrisiken und minimiert das Marktrisiko. So kommen für den Einsatz der Risikoabsicherung je nach dem zeitlichen Verlauf des Risikos im Unternehmen unterschiedliche Instrumente – zum Einsatz.

Der Erwerb all dieser Instrumente findet über Broker, Banken oder zum Teil auch direkt an Handelsplätzen statt. Für die im Folgenden vorgestellte praktische Anwendung der Absicherung von Urban Mining ist die London Metal Exchange (LME) die relevante Börse. [Die größte Warenterminbörse, die CME Gruppe, handelt in Chicago und New York neben Edelmetallen auch Aluminium (Al) und Kupfer (Cu); die Singapore Commodity

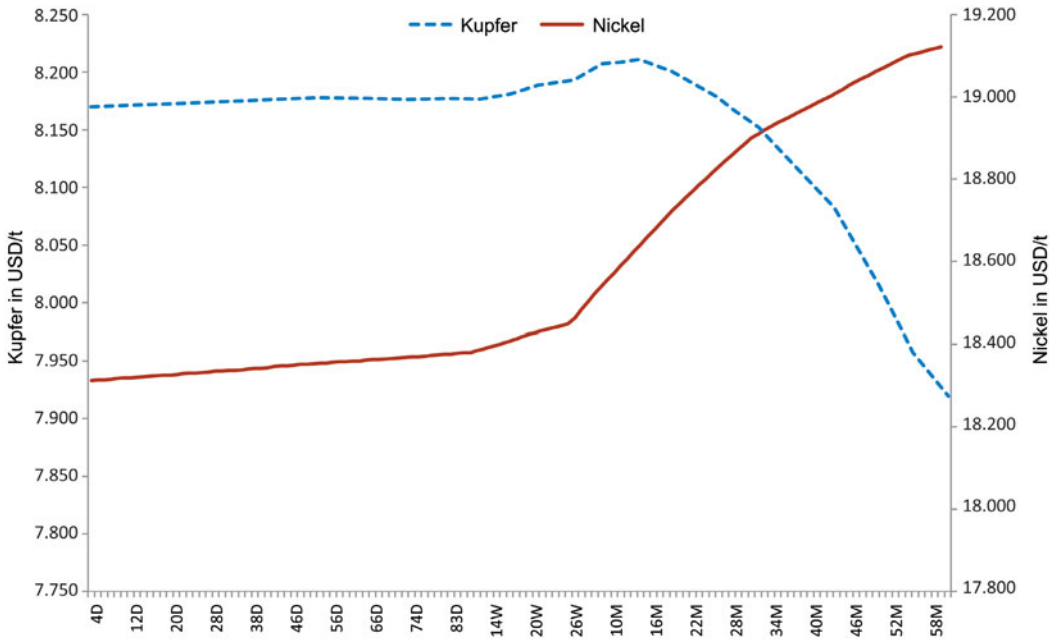


Abb. 5.6 Verläufe von Terminstrukturkurven von Kupfer (Juli 2012) und Nickel (Februar 2013). D Tag, W Woche, M Monat. Datenquelle: LME (2013)

Exchange (SGX) handelt zusätzlich noch Zink (Zn)]. Die LME existiert seit 1877 im Herzen Londons und ist weltweit die Referenzbörse für sechs Nicht-Eisen-Metalle, Stahl sowie einige Metalle, die im Verarbeitungsprozess der Industriemetalle eine Rolle spielen, die *minor metals* (auf die Handelstätigkeit im Bereich der Edelmetalle, welche ebenfalls an der LME möglich ist, wird im Folgenden nicht eingegangen). Der Handel der Rohstoffe findet überwiegend in USD statt, jedoch können die Produkte beispielsweise auch in den Währungen Euro, Britische Pfund und Japanische Yen abgeschlossen werden. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Liquidität außerhalb der USD-Produkte geringer ist.

Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die gehandelten Industriemetalle sowie die zulässigen Lieferformen, die Kontraktgröße und den Haupteinsatz in der Industrie.

So umfasst z.B. ein Kontrakt Nickel sechs metrische Tonnen und kann als Kathode, Pellets oder Briketts geliefert werden. Die Lieferung bzw. Lieferverpflichtung erfolgt grundsätzlich nur dann, wenn der *Future*-Kontrakt zur Endfälligkeit gehalten wird. Im Falle der physischen Lieferung ist eine Prämie je nach Lieferort und Lieferart fällig (*physical premium*).

Die LME hat weltweit 37 Orte in 14 Ländern als „Lieferorte“ (*good delivery point*) klassifiziert. Diese Länder müssen unter anderem politisch und ökonomisch stabil und kommerziell orientiert sein. Dort sind insgesamt über 600 Warenlager zertifiziert. Die Lager unterliegen ebenfalls den von der LME festgelegten Kriterien insbesondere hinsichtlich der Lagergröße und des täglichen Liefer Volumens. Ferner legt die LME für alle Lager verbindlich die Lagerkosten und die Transportkosten (*free-on-truck*, FOT) fest.

## 5

**Tabelle 5.1** Industriemetalle an der London Metal Exchange. *NASAAC* North American Special Aluminum Alloy Contract. Quelle: LME (2013)

Metall	Lieferform	Kontraktgröße t $\pm$ 2 % <sup>1</sup>	Hauptindustrie
Primäraluminium	Barren, T-Barren	25	Automobil, Transport, Bau, Verpackung
Aluminiumlegierung NASAAC	Barren, T-Barren	20	
Kupfer	Kathode	25	Elektro, Bau
Blei	Barren	25	Batterien
Zink	Barren	25	Galvanisierung, Messing
Nickel	(geschnittene) Kathoden, Pellets, Briketts	6	Edelstahl, Legierungen
Zinn	Barren	5	Beschichtungen, Löten
Cobalt (minor metal)	Kathode, Briketts, Barren	1	Batterien, Turbinen, Farbe
Molybdän (minor metal)	Pulverform in Fässern	5	Legierungszusatz, z. B. Edelstahl
Stahl	Barren	65	Bau

<sup>1</sup> Kontraktgröße in metrischen Tonnen entspricht 1.000 kg

Die Standardisierung der lieferbaren Produkte wird durch einen Markengenehmigungsprozess sichergestellt. So sind nur Produkte von zertifizierten Marken (*brands*) entsprechend der Qualitätsspezifikation des Materials sowie der Form- und Gewichtsspezifikation lieferbar.

Die physische Lieferfähigkeit von LME-Kontrakten ist ein Grund für die weltweite Akzeptanz der LME Preise. Ein weiterer Grund ist die hohe Transparenz des Preisfindungsprozesses:

In sogenannten *Ring-Sessions* werden zweimal täglich im Fünf-Minuten-Takt durch offene Ansprache (*open outcry*) die Metalle gehandelt und der Referenzpreis festgestellt. An diesen Sitzungen nehmen nur etwa ein Dutzend Mitglieder der LME teil, der daneben stattfindende elektronische Handel ist demgegenüber wesentlich anonymer und intransparenter. Insgesamt sollte die physische Lieferfähigkeit, der *market of last resort*, in seiner Bedeutung allerdings nicht überschätzt werden.



## 5.3 Umsetzung einer Absicherungsstrategie

Bei der Umsetzung einer Absicherungsstrategie steht die unternehmerische Situation im Vordergrund. Erst wenn diese hinreichend bekannt und analysiert ist, kann über den Einsatz geeigneter Instrumente nachgedacht werden.

Die Entwicklung einer Absicherungs- oder *Hedging*-Strategie ist jedoch umso dringender, je schwankender die Marktbewertung des betrachteten Rohstoffes oder des Rohstoffportfolios ausfällt. So weist beispielsweise der Ni-Preis eine ganz erhebliche Volatilität auf. Die Volatilität wird als Schwankung der Preisveränderungen um einen Mittelwert berechnet. Je nach zugrunde liegendem Zeitraum und Verwendung von Anpassungsverfahren ergeben sich unterschiedliche Schätzwerte dieser Schwankung. Die jährliche Volatilität des Ni-Kurses bewegte sich in den letzten zehn Jahren zwischen 22 und 37 %. Zum Vergleich: Die Volatilität des US-Dollar-/Euro-Wechselkurses lag in der gleichen Periode zwischen 8 und 12 %.

### Unternehmenssituation

Wie man mit der identifizierten Metallposition und dem sich daraus im Zusammenhang mit der unterliegenden Volatilität ergebenden Risiko umgeht, ist letztlich eine unternehmerische Entscheidung. Wichtig ist, dass diese Entscheidung auf der Grundlage von validen Informationen getroffen wird. Je nach spezifischer Unternehmenssituation und dem bestehenden Kontext kann die bewusste Entscheidung, auf die Absicherung einer kleineren Risikoposition zu verzichten, ebenso sinnvoll und richtig sein wie die Verabschiedung einer *Hedging*-Richtlinie für ein kapitalmarktorientiertes Unternehmen im Rohstoffbereich, mit der Maßgabe, sämtliche Metallpreisrisiken möglichst vollständig und zeitnah abzusichern.

Die Ergebnisse mit und ohne *Hedging* sind – wie zu erwarten – sehr stark von den individuellen Kursverläufen abhängig. In einzelnen Jahren werden die Ergebnisse daher stark divergieren. Über lange Perioden werden sich die aufsummierten Ergebnisse zwischen einer Situation mit und ohne *Hedging* angleichen, wenn man von strukturellen Veränderungen in den Preisniveaus absieht. Gegen diese kann man sich nur für begrenzte Zeit absichern, da alle Absicherungsinstrumente eine begrenzte Laufzeit haben.

Daraus folgt aber auch, dass sich ein Unternehmen eine 0%-Absicherungsstrategie nur dann erlauben kann, wenn es über die finanzielle Potenz und Bilanzstärke verfügt, auch längere Perioden mit negativen Kursentwicklungen durchzufinanzieren sowie die Abhängigkeit hinsichtlich der mitunter stark schwankenden Jahresergebnisse von Dritten sehr gering ist. Mit anderen Worten: Ausschüttungen sind in schwachen Jahren kaum oder nur in geringem Umfang möglich, und auch sonst wird ein ausreichender Eigenkapitalpuffer zur Kompensation von Preiseinbrüchen benötigt.

Sind die Unternehmen jedoch in hohem Maße von externen Kapitalgebern (wie z.B. von Banken) bei der Finanzierung abhängig und/oder ist der Gesellschafterkreis sehr groß und weitgehend anonym, scheidet eine 0%-*Hedging*-Strategie aus, da in der Regel negative „Überraschungen“ bei den Unternehmensergebnissen nicht dazu geeignet sind, das erforderliche und gewünschte Vertrauen in die Organisation zu stärken.

Sollte ferner die Absicht bestehen, zukünftig die Gesellschafterstruktur einmal zu ändern, erhöht sich auch hier der Wert von (gehedgten) konstanten, positiven Unternehmensergebnissen erheblich. Der Kreis potenzieller Interessenten wird wesentlich erweitert. Konstante *Cash-flows* sind in der Regel im Zusammenhang mit M&A-Transaktionen (*mergers and acquisitions*) eine wesentliche Zielgröße.

## 5

## Marktsituation und Durchführung der Absicherung

Die konkrete Durchführung einer Absicherungsstrategie setzt entweder auf Einzelgeschäftsbasis (Mikro-Hedge) oder auf der Nettoposition eines Portfolios oder des Gesamtunternehmens (Makro-Hedge) an. Die Bestimmung der notwendigen Absicherungsparameter erfolgt in beiden Fällen sehr ähnlich, wobei der Makrohedge durch die Aggregation mehrerer Einzelgeschäfte grundsätzlich komplexer gestaltet sein kann. Im Folgenden sei die Ausführung der Absicherung anhand eines Einzelgeschäftes vorgestellt. Die im Folgenden angegebenen Preise entsprechend real gehandelten Preisen; vereinfachend wurden mittlere Preise und nicht die jeweilige Kauf- bzw. Verkaufsseite zugrunde gelegt. Weitere Vereinfachungen wurden aus didaktischen Zwecken bezüglich der zugrunde liegenden Geschäftsprozesse getroffen.

Wir beginnen mit einem physischen Kauf über 825 t Edelstahlschrott am 06. Februar 2012 und nehmen der Einfachheit halber an, dass die Analyse des Schrottes einen Ni-Anteil von 8 % anzeigt. Damit ergibt sich für diese Position ein Ni-Inhalt von 66 t ( $825 \text{ t Edelstahl} \cdot 8 \% \text{ Ni-Anteil} = 66 \text{ t}$ ). Nickel wird am Tage des Einkaufs an der LME mit 21.695 USD pro Tonne notiert, der Ni-Anteil in der Schrottposition hat damit einen Preis von 1,432 Millionen USD ( $21.695 \text{ USD pro Tonne} \cdot 66 \text{ Tonnen} = 1.431.870 \text{ USD}$ ).

Nehmen wir nun an, dass bis zum Verkauf der Position ein Monat vergeht. Am 06. März 2012 steht der Ni-Kurs nun bei 18.745 USD pro Tonne, der Ni-Anteil im Edelstahl hat also entscheidend an Wert verloren. Insgesamt würde aus dem Ni-Anteil in diesem Handelsgeschäft ein Verlust von 0,195 Millionen USD resultieren ( $1.431.870 \text{ USD}$  wurden für den Kauf des Nickels im Edelstahl bezahlt,  $1.237.170 \text{ USD}$  ( $= 18.745 \text{ USD/t} \cdot 66 \text{ t}$ ) wurden Erlöst. Es ist zu bemerken, dass sich die Rechnung nur auf

den Ni-Anteil im Edelstahl bezieht, außerdem wurde vereinfachend angenommen, dass der Nickel im Edelstahl bei Kauf und Verkauf entsprechend dem LME-Preis bezahlt wird).

Wie hätte man diesen Verlust aus der Ni-Preisveränderung vermeiden können? Zeitgleich mit dem Kauf der 825 t Edelstahlschrott ( $= 66 \text{ t Ni}$ ) wird die identische Ni-Menge an der LME verkauft. Ein Ni-Kontrakt an der LME hat nach Tabelle 5.1 ein Volumen von 6 t, d. h. für 660 t Ni im Edelstahl müssen elf Kontrakte verkauft werden. Was passiert nun mit dieser Absicherung im Laufe des Monats bis zum Verkauf der physischen Position? Der Ni-Preis fällt nach wie vor von 21.695 USD auf 18.745 USD. Dem Verlust auf der physischen Bestandsposition steht nun aber ein Gewinn in gleicher Höhe auf der LME-Finanzkontraktposition gegenüber. Denn bei Verkauf einer Position profitiert man von fallenden Preisen (es ist daran zu denken, dass die Position später zurückgekauft werden soll. Bei fallenden Preisen wird der Rückkauf günstiger; ein Profit resultiert). Am 06. März 2012 wird nun die physische Position verkauft und gleichzeitig der Finanzkontrakt an der LME gekauft. Die Position an der LME ist dadurch geschlossen, der Edelstahlschrott ist an den Kunden geliefert, und es bleibt der Gewinn aus dem Grundgeschäft. Die Abbildung 5.7 veranschaulicht den beschriebenen Ablauf.

Es bleibt also festzuhalten, dass der Mikro-Hedge in diesem Beispiel einen Verlustbeitrag von 15,7% der Ursprungsposition (knapp 200.000 USD) vermieden hat. Das verbleibende Wechselkursrisiko kann nunmehr mit *Forward*-Kontrakten auf Währungsmärkten oder durch den Handel von LME-Produkten in Heimwährung abgesichert werden.

Neben der eigentlichen Verfügbarkeit von Preissicherungsinstrumenten wird es für Unternehmen, die das Thema des Risikomanagements aktuell zur Entscheidung und Umsetzung anstehen haben, letztlich auch auf den Zugang zu den entsprechenden Börsen oder Intermediären sowie auf das erforderliche

Know-how zum zielgerichteten und verantwortungsvollen Umgang mit den jeweiligen Instrumenten ankommen. Diese Randbedingungen sollten aber, gegebenenfalls unter Einbezug entsprechender Fachleute, erfüllbar sein.

## Bilanzielle und weitere Aspekte

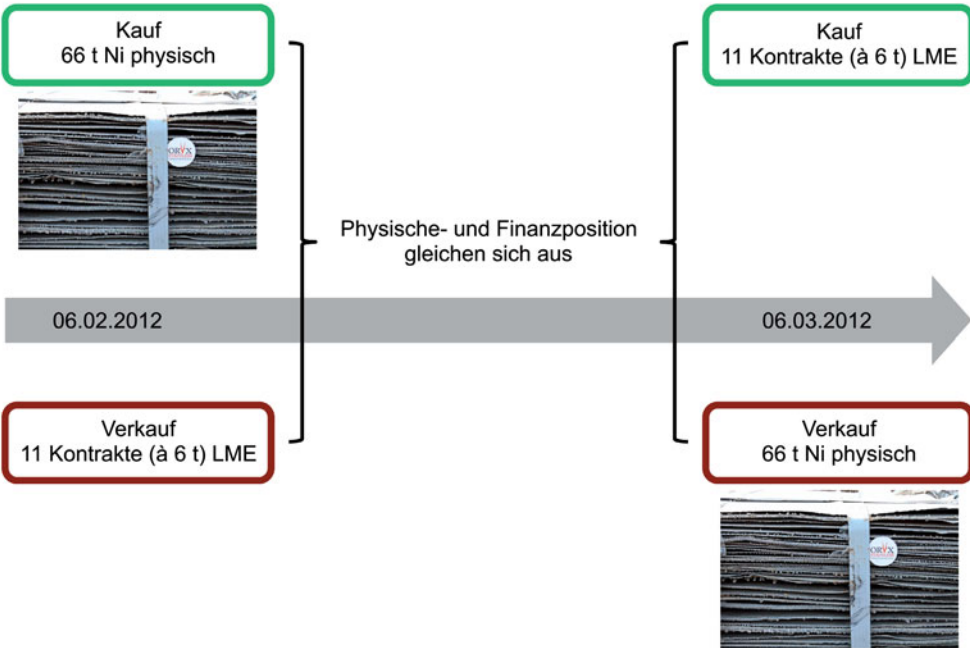
Zur vollständigen Umsetzung der Absicherungsstrategie gehört aber nicht nur die Anpassung an die spezifische Unternehmenssituation oder die Ausführung der Sicherungsgeschäfte nach Auswahl der richtigen Instrumente, sondern auch die Berücksichtigung weiterer Aspekte. Die unmittelbaren Auswirkungen, der in einem Geschäftsjahr zur (teilweisen) Neutrali-

sierung von Preisschwankungen abgewickelten Geschäfte, finden sich in den Positionen Erträge oder Aufwendungen aus Absicherungsgeschäften der Gewinn- und Verlustrechnung und damit entsprechend den Rechnungslegungsvorschriften des Handelsgesetzbuches (HGB) unter den sonstigen betrieblichen Aufwendungen oder Erträgen wieder. Das ist im Hinblick auf eine klare Darstellung der ökonomischen Lage nicht zielführend. Unter dem Aspekt der wirtschaftlich richtigen Darstellung wäre es eigentlich geboten, die *Hedge*-Ergebnisse im Bereich der Umsatzerlöse und/oder Anschaffungs-/Herstellkosten auszuweisen.

Noch deutlich gravierender können die Auswirkungen von *Hedge*-Geschäften auf den Jahresabschluss werden, wenn es um die Frage der bilanziellen Darstellung von noch offenen Transaktionen zum Quartals- oder Bilanzstichtag

66 t Ni zu 21.695 USD/t = -1.431.870 USD

11 Kontrakte x 18.745 USD/t = -1.237.170 USD



11 Kontrakte x 21.695 USD/t = +1.431.870 USD

66 t Ni x 18.745 USD/t = +1.237.170 USD

Abb. 5.7 Abbildung eines prototypischen Mikro-Hedges. Quelle: Mecore (2012). Foto: © B. Brüggmann

5

geht. Je nach Rechnungslegungsnorm, z. B. HGB oder *International Financial Reporting Standards* (IFRS), um die in Deutschland gängigsten zu nennen, werden sehr unterschiedliche Anforderungen an die Dokumentation von Absicherungsgeschäften gestellt, so dass es insbesondere bei nicht in sich geschlossenen und separat abgesicherten und dokumentierten Einzelgeschäften zu erheblichen, unerwünschten Verwerfungen im Bilanzbild kommen kann. Das HGB ist hier mit der relativ einfachen Möglichkeit zur Bildung von Bewertungseinheiten durchweg eher an der betrieblichen Praxis orientiert als zum Beispiel die diesbezüglichen Regelungen der IFRS, welche sich ursprünglich fast ausschließlich auf den Einsatz von Derivaten in Banken und bei anderen Finanzdienstleistern konzentrierten und damit für die Abbildung der Realität in Industrie-, Gewerbe- und Handelsunternehmen eher ungeeignet waren.

Es ist daher zu empfehlen, die *Hedging*-Strategie vor Verabschiedung unbedingt auch mit den eigenen Wirtschaftsprüfern zu diskutieren. Insbesondere ist abzustimmen, welche konkreten Dokumentationsanforderungen an eine sachgerechte Abbildung, das *Hedge*-Accounting, ohne unerwünschte Verwerfungen von Einzelpositionen und Kennzahlen, gestellt werden. Mit einer entsprechend abgestimmten Lösung sind regelmäßig alle bestehenden Ausweisrisiken sicher zu bewältigen. Allerdings hat die betriebliche Praxis gezeigt, dass es gerade hinsichtlich Rohstoffpreisabsicherungen mitunter gar nicht so einfach ist, einen geeigneten Ansprechpartner auf Wirtschaftsprüferseite zu finden. Die Vertreter der Fachabteilungen sind in der Regel zu spezialisiert und bankenlastig; den Prüfern vor Ort im Unternehmen fehlt häufig das spezifische Know-how in Sachen Rohstoffderivate.

Nicht außer Acht gelassen werden darf bei jeder Umsetzung der *Hedging*-Strategie die entsprechende Berücksichtigung des Einflusses von Rohstoffderivaten auf die Liquidi-

tätssituation des Unternehmens. Folgerichtig hat eine enge Verzahnung mit der Liquiditätsplanung und -bereitstellung zu erfolgen. Aufgrund des üblichen Margensystems mit Brokern oder anderen Gegenparteien, kann es bei stärkeren Kursveränderungen zu sogenannten Einschussverpflichtungen zur Unterlegung der jeweiligen Derivatenspositionen kommen. Hierfür müssen entweder Liquiditätsreserven (Kreditlinien oder Guthaben) beim Unternehmen oder entsprechende Kreditlinien bei den Kontrahenten bestehen, die diese Verpflichtungen, falls erforderlich, abdecken können. Das eigentliche Problem besteht darin, dass – obwohl die Absicherungstransaktionen grundsätzlich richtig sind – es zu einem zeitlichen Auseinanderfallen von Zahlungsströmen kommen kann. Das heißt, ein mögliches Minus aus einer Absicherungsposition wird als (ggf. vorübergehender) Einschuss fällig, während sich das Plus aus dem Grundgeschäft noch nicht realisiert hat, weil der Zahlungseingang für die Verkaufsrechnung noch nicht erfolgt ist. Spätestens nach vollständiger Abwicklung beider Geschäfte (Grundgeschäft und Absicherung) wird dann auch der gewünschte Ausgleich auf der Liquiditätsseite erzielt.

Spätestens seit der jüngsten Finanzkrise ist im Zusammenhang mit der Auswahl der Vertragspartner, neben den physischen Geschäftspartnern, auch bei den Finanzpartnern auf eine hinreichende Bonität zu achten. Diese sollen ihre vertraglichen Verpflichtungen jederzeit erfüllen können. Nichts ist schlimmer, als wenn ein Kontrahent ausfällt und damit eine als abgesichert angenommene Transaktion sich plötzlich wieder voll im Risiko befindet oder ein Vertrag nicht beliefert wird und damit das Absicherungsgeschäft ohne physisches Pendant bleibt. Daher ist gemeinhin zu empfehlen, die Kontrahentenrisiken entsprechend zu diversifizieren, selbst wenn man dadurch auf gewisse Konditionsvorteile aus einer potenziellen Geschäftsbündelung verzichten muss.

## 5.4 Fazit und Ausblick

Dieser Beitrag stellt einen Prozess zur Risikoidentifikation in rohstoffintensiven Unternehmen vor und führt anhand eines praktischen Beispiels in eine prototypische Risikoabsicherungsstrategie ein. Naturgemäß kann eine solche Abhandlung nicht erschöpfend sein, sondern nur die ersten Schritte vorstellen. Umfassende Absicherungsstrategien können durch eine Kombination einer Vielzahl von Instrumenten schnell an Komplexität zunehmen. Daher ist bei der Implementierung derartiger Strategien stets darauf zu achten, dass nur Instrumente zum Einsatz kommen, deren Wirkungsweise vollständig verstanden und im Unternehmen abbildbar sind. Im Zweifel sind einfache Produkte vermeintlich maßgeschneiderten Banklösungen vorzuziehen.

Ferner setzt das unternehmerische Risikomanagement die Kenntnis der Unternehmensprozesse, des unternehmerischen Umfelds und der Wertschöpfung voraus. Risikomanagement ist also als strategisches Thema in der Unternehmensführung angesiedelt. Hier muss auch die Entscheidung über die Höhe des vertretbaren Risikos getroffen werden. Ein Einbezug der relevanten operativen Bereiche und insbesondere des Einkaufs bei der Implementierung ist natürlich notwendig.

Während der Zugang zu Absicherungsinstrumenten über Börsen einen recht klaren Weg zu einer Risikomanagementstrategie darstellt, ist das *Hedging* nicht börsengehandelter Rohstoffe ungleich schwieriger. Ein sinnvoller, doch anspruchsvoller Ansatz ist hier die Nutzung eines *proxy hedge*. Hierbei wird der nichtbörsengehandelte Rohstoff einer umfassenden statistisch-mathematischen und ökonomischen Analyse unterzogen, um auf enge Korrelationen mit börsengehandelten Rohstoffen aufzusetzen. Bei dieser Analyse ist eine Kombination von quantitativen Methoden mit rohstoffspezifischer Fachkenntnis gefragt, um eine sichere Basis für die Absi-

cherungsstrategie zu erlangen. Oft greifen einfache mathematische Instrumente, wie die lineare Korrelationsanalyse, wesentlich zu kurz. Die zunehmende Geschwindigkeit von Marktbewegungen führt nämlich zu einem hohen Grad an Nicht-Linearität und zeitlichen Änderungen in der Korrelationsstruktur, welche berücksichtigt werden müssen.

In der gegenwärtigen Situation an vielen Rohstoffmärkten, wo die Preisbildung in immer größerem Maße von branchenfremden Marktteilnehmern aus dem Bereich der Finanzanleger mitbestimmt wird und es auch immer wieder zu Marktphasen kommen kann, in denen sich Preisbewegungen von den aktuellen und erwarteten Fundamentaldaten von Rohstoffangebot und -nachfrage völlig abkoppeln, gibt es gerade für Unternehmen mit einem hohen Gefahrenpotenzial gegenüber Rohstoffpreisrisiken kaum eine Alternative zu einem *Hedging* für wesentliche Teile des Preisrisikos.

Die im Zusammenhang mit der Risikoidentifikation und dem Management von Metallpreisrisiken unweigerlich erforderliche, intensive Beschäftigung mit den relevanten Rohstoffmärkten, verbessert im Allgemeinen das Verständnis für den jeweiligen Rohstoff und dessen Preisentwicklung erheblich, wodurch ein weiterer positiver Effekt auf das eigene Geschäft entsteht.

Die Übernahme von Preisrisiken für in der Wertschöpfungskette vor- oder nachgelagerte Unternehmen kann die eigene Marktposition auf den Beschaffungs- und Absatzmärkten ganz erheblich verbessern. Zudem wäre daran zu denken, dass man sich diese „Zusatzleistung“ vergüten lässt. Viele Großkonzerne gehen hier unverständlicherweise gerade den umgekehrten Weg und nutzen die Marktmacht, um Preisrisiken auf Lieferanten und Kunden abzuwälzen und das trotz mutmaßlich vorhandenen Know-hows und entsprechenden personellen und finanziellen Kapazitäten, um die bestehenden Metallpreisrisiken professionell zu managen.



## 5

Derzeit wird in Europa und in USA intensiv über eine stärkere Regulierung der Derivatmärkte diskutiert. Die geplanten und teilweise schon umgesetzten Maßnahmen dürfen jedoch nicht dazu führen, dass Unternehmen künftig die Absicherung von Preisrisiken aus sachfremden Erwägungen unterlassen.

### Danksagung

Wir danken Herrn Prof. Peter Kausch für wertvolle Hinweise und fruchtbare Diskussionen und Frau Eva-Maria Kalteier für die Unterstützung in Recherche und Aufarbeitung. Verbleibende Fehler verantworten die Autoren.

### Quellenverzeichnis

- Bloomberg (2012) Bloomberg Professional service.  
<http://www.bloomberg.com/professional/>
- Hull J (2012) Risk Management and Financial Institutions. 3. Auflage, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey
- LME (2013) Kontraktspezifikationen der Metalle (Mai 2013). London Metal Exchange. <http://www.lme.com>
- Mecore (2012) Risikoabsicherung mit der LME, Vortrag für die Allianz AGCS, 2012
- Nguyen T (2007) Bilanzielle Abbildung von Finanzderivaten und Sicherungsgeschäften. Band 149. Herbert Utz Verlag, München
- Outokumpu Oyj (2007) Supply Chain Management, S. 34. Annual Report (Geschäftsbericht)
- Oryx Stainless (2012) Unternehmenspräsentation (nicht öffentlich)
- Posch PN, Löffler G (2011) Credit Risk Modelling using Excel and VBA. 2. Auflage, John Wiley & Sons, Chichester, UK
- Schneck O (2010) Risikomanagement: Grundlagen, Instrumente, Fallbeispiele. Wiley-VCH Verlag, Weinheim Germany



## Kernaussagen

- Das Management von Rohstoffrisiken ist komplex und vielschichtig.
- Die Identifikation der Risiken entlang der unternehmerischen Wertschöpfungskette, setzt ein Verständnis der spezifischen Unternehmenssituation voraus.
- Das Management von Rohstoffpreisrisiken ist eine Querschnittsfunktion der verschiedenen Unternehmensbereiche. Als Teil der Unternehmensstrategie ist die Koordination der Bereiche und Festlegung der Absicherungsstrategie immer Topmanagementaufgabe.
- Die Nutzung von Finanzinstrumenten zur Absicherung von Marktpreisrisiken ist ein wichtiger Baustein und kann durch geeignete mathematisch-statistische Verfahren verfeinert werden.

# Teil 2

## Primäre Rohstoffe



Bildquellen der vorangehenden Seite

*Großes Bild oben:* Erztransport und Abkippen in einer Goldmine von Kinross in Minas Gerais, Brasilien

*Untere Bildreihe:* Links: Zerkleinerung von Basalten für die Bauindustrie in der Akita-Präfektur, Japan  
Rechts: Eisenerzabbau im Eisernen Viereck, Minas Gerais, Brasilien. Fotos: © Jörg Matschullat

# 6 Die Versorgung mit wirtschaftskritischen Rohstoffen –

## Eine Ursachensuche und -analyse

Jens Gutzmer und Andreas Klosssek

### 6.1 Die Auslöser

Mineralische sowie insbesondere metallhaltige Rohstoffe sind für die Wertschöpfung aller hochentwickelten Volkswirtschaften von elementarer Bedeutung. Gleichzeitig entstammen diese Rohstoffe letztlich alle der Erdkruste – und damit einem Reservoir von endlicher Größe. Auch wenn die gesamte Größe dieses Reservoirs, auch Geopotenzial genannt, für keinen mineralischen oder metallhaltigen Rohstoff bisher ausgeschöpft wird, so werden die zur Verfügung stehenden Rohstoffkörper (Lagerstätten) zunehmend minderwertiger und teurer in ihrer Erschließung, ihrem Abbau und ihrer Verarbeitung.

Durch den technischen Fortschritt wird sich die Rohstoffabhängigkeit noch weiter verschärfen, wobei insbesondere der Bedarf an bislang technologisch wenig genutzten Metallen dramatisch steigen wird. Wurden in den 1980er-Jahren für die Herstellung eines Computerchips noch zwölf verschiedene Rohstoffe benötigt, sind es heute bis zu sechzig. Prognosen zufolge lassen technischer Wandel und Innovationen den Bedarf an Technologiemetallen wie Gallium (Ga), Neodym (Nd), Indium (In), Germanium (Ge), Scandium (Sc), Platin (Pt) oder Tantal (Ta) bis 2030 auf ein Vielfaches der heutigen Weltproduktionsmenge steigen (Angerer et al. 2009).

Nicht nur technischer Wandel und Innovationen katapultieren den internationalen

Rohstoffbedarf nach oben. Auch die steigende Weltbevölkerung gerade in Entwicklungs- und Schwellenländern wie China und Indien oder die Wachstumssprünge in der Wirtschaftsleistung vieler dieser Länder beeinflussen den weltweiten Bedarf nach metallhaltigen Rohstoffen dramatisch. So ist schon jetzt klar, dass die Wirtschaftsmacht China ihren eigenen immens ansteigenden Rohstoffbedarf nicht nur aus eigenen, teilweise bereits heute schon nach außen hin reglementierten Rohstoffvorkommen decken kann, sondern bei weiter steigendem volkswirtschaftlichem Wachstum alle Kategorien mineralischer und metallischer Rohstoffe in zunehmendem Maße auch von außen zukaufen muss.

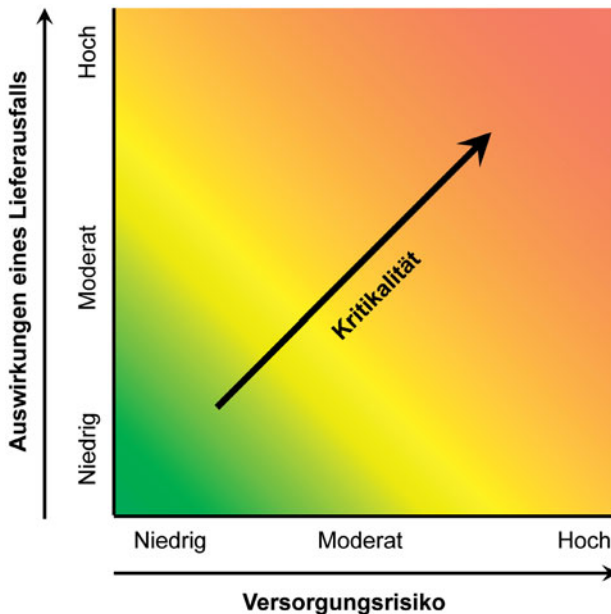
In letzter Instanz führen diese globalen Entwicklungen zu Lieferrestriktionen, sich verteuern den Rohstoffen und zu Rohstoffknappheit. Rohstoffe, deren Verfügbarkeit für Zukunftstechnologien gesichert werden muss, die eine große Hebelwirkung für die Wirtschaft haben und von denen bereits ein relativ geringer Mengeneinsatz damit zu einer hohen zusätzlichen Wertschöpfung in Hochtechnologiebereichen beiträgt, werden als „wirtschaftsstrategische“ Rohstoffe bezeichnet (BMBF 2012). Rohstoffe, deren Versorgungslage sich für die Wirtschaft mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte, sind als „kritisch“ zu bezeichnen (ebd.), sodass die vorliegende Studie in Anlehnung an beide Definitionen von „wirtschaftskritischen Rohstoffen“ spricht. Was genau macht jedoch einige der bereits

6 genannten Rohstoffe wirtschaftskritischer als andere, und wie kann auf unterschiedlichen gesellschaftlichen Ebenen mit dieser Rohstoff-kritikalität umgegangen werden? Dieser Frage widmet sich die vorliegende Studie.

## 6.2 Identifizierung wirtschaftskritischer Rohstoffe

Im Zuge der innerhalb der letzten Jahre aufkommenden Frage, welche metallischen Rohstoffe denn besonders knapp oder unverzichtbar seien, entstanden mehrere Studien unterschiedlicher Organisationen auf deutschem, europäischem und internationalem Terrain (u. a. Angerer et al. 2009; DERA 2012; Europäische Kommission 2010; IZT u. adelphi 2011; U.S. DOE 2010. Für einen detaillierten Überblick siehe Achzet 2012 sowie Erdmann u.

Graedel 2011 und Peiró et al. 2011). Alle folgen einer ähnlichen Logik, nämlich der Bewertung der Rohstoffkritikalität in einer zwei- bzw. dreidimensionalen Matrix. Ein sehr generischer – und damit auch sehr exemplarischer – Ansatz zu einer solchen Bewertung wurde in einer Studie zu „*Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*“ (National Research Council 2008) eingeführt. Hier werden als die zwei wesentlichen Dimensionen der Kritikalität das Versorgungsrisiko („*supply risk*“) sowie die Auswirkungen eines Lieferausfalls („*impact of supply risk*“) eingeführt (Abb. 6.1). In der Studie wird klargestellt, dass die Einschätzung des Versorgungsrisikos recht objektiv geschehen kann, während der Impact eines Ausfalls sehr stark von der Perspektive der Analyse (Firma, Region, Nation) abhängt. Weiterhin wird nur zwischen „niedrigem“, „moderatem“ und „hohem“ Risiko unterteilt. Neuere Herangehensweisen sind sehr viel umfassender und berücksichtigen eine Vielzahl von Kriterien (Graedel et al. 2012).



### Auswirkungen eines Lieferausfalls:

- Mögliche Substitution
- Skalenfaktor „Raum“ (Produkt, Firma, Region etc.)
- Skalenfaktor „Zeit“
- Kleine Märkte – besonders für Hightech Rohstoffe
- Nur firmenspezifisch zu bewerten

### Versorgungsrisiko:

- Geologische Faktoren
- Technologische Faktoren
- Umwelt- und Sozial-Faktoren
- Strategische und geopolitische Faktoren
- Wirtschaftliche Faktoren

Abb. 6.1 Kritikalitätsmatrix. Quelle: übersetzt und modifiziert nach © National Research Council (2008)

Darauf folgende Studien versuchen sich an alternativen Indizes und numerischen Skalierungen, die zum Teil erheblich von denen der Studie des National Research Council abweichen. Die Resultate einiger dieser Bewertungen werden in Tabelle 6.1 zusammenfassend verglichen.

Dieser Vergleich führt zu dem interessanten Ergebnis, dass die Studien trotz sehr unterschiedlicher Perspektive, Zeithorizont und Herangehensweise zu sehr ähnlichen, in weiten Teilen deckungsgleichen Resultaten kommen (siehe auch Erdmann u. Gabriel 2011; Peiró et al. 2011). So werden die den Seltenen Erden zugehörigen Elemente, aber auch Elektronikmetalle wie Niob (Nb), Ta, Ga und In sowie die

Metalle der Platingruppe in allen Studien, in denen diese Rohstoffe berücksichtigt wurden, als wirtschaftskritische Rohstoffe identifiziert. Hinzu treten Rohstoffe, die nur in wenigen der Studien Berücksichtigung finden, insbesondere Antimon (Sb), Wolfram (W), Zinn (Sn), Bismut (Bi) und Magnesium (Mg), daneben auch Graphit (C) und Flussspat (CaF<sub>2</sub>).

Aus den offensichtlichen Ähnlichkeiten der verschiedenen Bewertungen sollen hier Handlungsempfehlungen für Wirtschaft, Politik und Wissenschaft abgeleitet werden. Dazu werden die als besonders wirtschaftskritisch eingestuft Rohstoffe zu drei Gruppen zusammengefasst. Diese drei Gruppen leiten sich aus den dominanten Ursachen, die in einer (zumindest

Tabelle 6.1 Vergleich der bekanntesten Studien über kritische mineralische Rohstoffe

DERA <sup>1</sup> (2012)	IZT u. adelphi <sup>2</sup> (2011)	US DOE <sup>3</sup> (2010)	EU-Kommission (2010)	Fraunhofer ISI u. ICT <sup>4</sup> (2009)
Seltene Erden (SEE)	Seltene Erden (SEE)	Seltene Erden (SEE)	Seltene Erden (SEE)	Seltene Erden (SEE)
Antimon (Sb)	Antimon (Sb)		Antimon (Sb)	
Wolfram (W)	Wolfram (W)		Wolfram (W)	
Niob (Nb)	Niob (Nb)		Niob u. Tantal	Tantal (Ta)
Platinmetalle (PGM)	Palladium (Pd)		Platinmetalle (PGM)	Platinmetalle (PGM)
Zinn (Sn)	Zinn (Sn)			Zinn (Sn)
Cobalt (Co)		Cobalt (Co)	Cobalt (Co)	
Bismut (Bi)	Bismut (Bi)			
	Germanium (Ge)		Germanium (Ge)	Germanium (Ge)
	Gallium (Ga)	Gallium (Ga)	Gallium (Ga)	Gallium (Ga)
	Indium (In)	Indium (In)	Indium (In)	Indium (In)
Magnesium (Mg)			Magnesium (Mg)	
Graphit (C)			Graphit (C)	
Flussspat (CaF <sub>2</sub> )			Flussspat (CaF <sub>2</sub> )	

<sup>1</sup> Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)  
<sup>2</sup> Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) und adelphi, eine der führenden Institutionen für Politikanalyse und Strategieberatung  
<sup>3</sup> United States Department of Energy (US DOE) = Energieministerium der Vereinigten Staaten  
<sup>4</sup> Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT in: Angerer et al. (2009)



6

scheinbar) vulnerablen Versorgungssituation resultieren, ab (Abb. 6.2). Als wichtige Ursachen werden hier unterschieden die einseitige Abhängigkeit von der Volksrepublik China (Gruppe 1), die Abhängigkeit der Versorgung von einem/wenigen politisch, wirtschaftlich oder gesellschaftlich instabilen Ländern (Gruppe 2) sowie dem Nichtvorhandensein adäquater Technologien bzw. primärer Verarbeitungs- und Recyclingkapazitäten (Gruppe 3). Bevor diese drei Gruppen im Detail betrachtet werden, muss ein weiterer, übergeordneter Faktor benannt werden, der auf alle drei Gruppen zutrifft. Dies ist die fehlende Verfügbarkeit zuverlässiger und öffentlicher Ressourcen- und Reservendaten zu fast allen als wirtschaftskritisch eingestuften Rohstoffen, die in Tabelle 6.1 aufgeführt sind. Nur für wenige der hier betrachteten Rohstoffe/Rohstoffgruppen gibt es bisher eine Datenbasis, die eine Bewertung ihrer geologischen Verfügbarkeit auf einer Ebene erlaubt, wie sie bei metallischen Rohstoffen wie

Eisen (Fe), Kupfer (Cu) oder Gold (Au) üblich ist. Dies betrifft insbesondere die Rohstoffe der Seltenen Erdelemente (SEE) sowie die Elektrometalle. Gründe für die unzureichende Datenbasis liegen (a) im bisher nur geringen wirtschaftlichen Interesse für eben diese Rohstoffe (insbesondere SEE) und ein daher weitgehend unzureichender Stand der globalen Exploration und (b) im Auftreten vieler wirtschaftskritischer Rohstoffe ausschließlich als Beiprodukt bei der Produktion von Metallen wie Kupfer (Cu), Zink (Zn) oder Aluminium (Al). So ist die Produktion von Ge oder In als Beiprodukt der Zinkverhüttung möglich, wird aber in den meisten Hütten weder praktisch durchgeführt noch findet eine systematische Quantifizierung der ungenutzten potenziellen Beiprodukte statt. Vergleichbar zuverlässig sind Ressourcen- und Reservendaten bei den in Tabelle 6.1 benannten wirtschaftskritischen Rohstoffen dagegen für die Platingruppen-Metalle sowie für Flussspat.

1	<b>Abhängigkeit der Versorgung von China:</b>	
	Seltene Erden (SEE), Antimon (Sb), Wolfram (W), Graphit (C), Flussspat ( $\text{CaF}_2$ ), Magnesium (Mg)	
2	<b>Versorgung aus wenigen und/oder instabilen Regionen:</b>	
	Niob (Nb)	Brasilien, Kanada
	Tantal (Ta)	Brasilien, Mozambik, Rwanda, Australien
	Platinmetalle (PGM)	Südafrika, Russland
	Zinn (Sn)	China, Demokratische Republik Kongo, Indonesien, Peru, Bolivien
	Cobalt (Co)	Demokratische Republik Kongo, Sambia, Russland, China
3	<b>Zukünftig rasch ansteigender Bedarf kann mit bestehenden technischen Anlagen nicht abgedeckt werden:</b>	
	Germanium (Ge), Gallium (Ga), Indium (In), Bismut (Bi)	

**Abb. 6.2** Gruppierung wirtschaftskritischer Rohstoffe nach den dominanten Ursachen. Datenquelle: USGS (2012)

### 6.3 Gruppe 1 – Die Volksrepublik China als dominante Quelle

Insbesondere die SEE als Rohstoffgruppe sind ein Paradebeispiel für die sehr einseitige Abhängigkeit der Weltwirtschaft von der Volksrepublik China als Lieferant nicht nur von Rohstoffen, sondern auch zunehmend von Hüttenprodukten und veredelten Materialien und Werkstoffen. Eine Marktmacht von  $\geq 90\%$  der globalen Versorgung aus der VR China besteht, unter anderem für SEE (98%) und Antimon (90%). Auch bei den meisten anderen wirtschaftskritischen Rohstoffen stammen mehr als 50% der globalen Versorgung aus der VR China (Tabelle 6.2; ► Kap. 3 und 8). Hier muss allerdings gleichzeitig berücksichtigt werden, dass die VR China nicht nur als weltweit dominanter Versorger, sondern auch als führender Verbraucher vieler mineralischer und metallischer Rohstoffe auftritt.

Eine Monopolstellung in der Erzeugung eines Rohstoffes eröffnet für den Versorger die Möglichkeit, die sich anschließenden Ketten in der Wertschöpfungskette zu beeinflussen. Im Falle der Rohstoffgruppe der SEE, aber auch im

Falle von Magnesium, ist dies sehr offensichtlich. Kritisch ist weiterhin zu bewerten, dass die klare Dominanz der VR China in der heutigen Produktion nicht durch die Verteilung von bekannten Ressourcen und Reserven gerechtfertigt ist. In der Tat scheint die VR China selbst bei sehr prominenten Fällen wie den SEE ihre bekannten Ressourcen und Reserven im internationalen Bereich zu stark zu nutzen – die aktuelle Monopolstellung ist auf Dauer aber unhaltbar. Sie wird in Zukunft abgelöst durch eine Marktkonstellation, in der die VR China vom Netto-Exporteur zu einem Netto-Importeur von wirtschaftskritischen Rohstoffen werden wird (siehe z. B. Roskill 2011).

### 6.4 Gruppe 2 – Rohstoffbezug aus wenigen instabilen Ländern/Regionen

Diese Gruppe bestimmt sich über die faktisch sehr ungleichmäßige geographische Verteilung vieler geogener Rohstoffe. Eine solche geographische Konzentration von Rohstoffen ist nicht ungewöhnlich, finden sich doch alle mineralischen und metallhaltigen Rohstoffe in Lagerstätten, deren Entstehung und ungewöhnliche

Tabelle 6.2 Abhängigkeit von China – Produktion vs. bekannte Reserven. Datenquelle: USGS (2012)

Rohstoffe	Globale Produktion in Kilotonnen	Anteil China	Globale Reserven in Megatonnen	Anteil China
Antimon (Sb)	167	90%	1,8	52%
Flussspat (CaF <sub>2</sub> )	6.010	55%	240	10%
Graphit (C)	925	65%	77 <sup>1</sup>	71%
Magnesium (Mg)	757	86%	2.500	22%
Seltene Erdenoxide (ohne Yttrium)	133	98%	110	50%
Wolfram (W)	69	86%	3,1	62%

<sup>1</sup> sehr konservativ, Ressourcen >800 Megatonnen

## 6

Konzentration eines Minerals oder Metalls in der Regel eine sehr ungewöhnliche Kombination geologischer Prozesse bedarf. Lagerstätten jedes mineralischen und metallhaltigen Rohstoffes sind daher nicht gleichmäßig über den Erdball verteilt, sondern finden sich lokal konzentriert in Gruppen (oder Distrikten), in denen ähnliche Bildungsprozesse die Lagerstättengenese ermöglicht haben.

Erhebliche Risiken entstehen, wenn für die Versorgung nur wenige (in einigen Fällen einzigartige) Lagerstätten genutzt werden. Sie werden besonders kritisch, wenn diese Lagerstätten in politisch, gesellschaftlich oder wirtschaftlich vulnerablen Ländern auftreten. So sind aktuell bauwürdige Konzentrationen von Platingruppen-Elementen (PGE) konzentriert auf nur sehr wenige Lagerstättendistrikte. Hier sind zunächst zu nennen der Bushveld Intrusivkomplex in Südafrika (dominante Quelle von Pt) und der Great Dyke in Simbabwe sowie die PGE-führenden Ni-Cu Erze des Norilsk Distriktes in Russland (dominante Quelle von Palladium, Pd). Neben diesen drei Lagerstättendistrikten treten alle anderen bekannten PGE-führenden Lagerstätten weit zurück. Die Vulnerabilität der Versorgung mit PGE wurde im Jahr 2012 illustriert im Zuge von Streiks und bewaffneten Auseinandersetzungen zwischen Streikenden und der Polizei im Bushveld-Lagerstättendistrikt (das Marikana-Massaker). In Sorge um mögliche Lieferausfälle stieg der Preis von Pt um mehr als 25 %.

Ähnlich vulnerabel ist die Versorgungssituation für Niob (Brasilien als wichtigste Quelle) und Cobalt (Demokratische Republik Kongo mit Lagerstätten des Zentralafrikanischen Kupfergürtels), aber auch für Zinn (Seifenlagerstätten in Indonesien). Ein solch natürliches Ungleichgewicht in der Verteilung bestimmter Rohstofftypen birgt daher inhärente Risiken. Diese können nur durch die Entdeckung und den Abbau bisher unbekannter Lagerstättendistrikte in anderen geographischen Regionen oder durch die Entwicklung von Substituten bzw. Technologien zur Nutzung alternativer (z. B. niedrigwertiger) Lagerstätten aufgelöst werden.

## 6.5 Gruppe 3 – Fehlende Technologien

Die Versorgung mit einigen der als wirtschaftskritisch benannten mineralischen und metallhaltigen Rohstoffen ist nur deshalb gefährdet, weil Technologien fehlen, welche die Verarbeitung dieser Rohstoffe in ausreichender Menge und zu wirtschaftlich vertretbaren Preisen ermöglichen würden. Dies sind im Wesentlichen solche Metalle, deren jährliches Marktvolumen sehr klein ist und die ausschließlich als Bei- oder Koppelprodukt bei der Verhüttung von Massenmetallen wie Zn, Cu oder Al anfallen. Im Umkehrschluss bedeutet dies auch, dass diese Rohstoffe in der Regel keine eigenständigen Lagerstätten bilden. Dies trifft insbesondere auf Elektronikmetalle wie Ga und In zu. Bei diesen Metallen ist der Markt sehr klein (Abb. 6.3), sowohl im Hinblick auf das Gesamtvolumen als auch auf die Anzahl der Marktteilnehmer. Preisschwankungen sind durchaus vorhanden (Abb. 6.4), sind aber bei Weitem nicht so dramatisch wie z. B. bei den SEE. Weiterhin ist die Produktion nicht an eine spezifische Lagerstätte gebunden, sondern an Hüttenstandorte, die entsprechende Technologien vorhalten (► Kap. 9). Solche Hüttenstandorte sind dabei keinesfalls regional fokussiert, sondern finden sich z. B. auch in Deutschland.

Das Beispiel Gallium ist hier besonders deutlich. Im Jahre 2010 lag die Weltjahresproduktionskapazität von raffiniertem Ga bei etwa 260 t (USGS 2012; Abb. 6.3). Gallium wird, so wie auch In und Ge, als Beiprodukt von Buntmetall-Sulfiderzen (Zn, Cu) gewonnen. Weit wichtiger ist für Gallium aber die Gewinnung als Koppelprodukt bei der Verhüttung von Bauxit zu Aluminium. Galliuminhalte in weltweiten Vorkommen von Bauxit und Zinkerz sind variabel (Abb. 6.5). Ohne Zweifel ist es so, dass bei aktuellem Verbrauch die weltweit bekannten Ressourcen an Ga (2,75–3,75 Mt Ga in Bauxit, 46 kt Ga in Zinkerzen) keine Limitation für die zukünftige Produktion darstellen. Weiterhin führen konservative Schätzungen

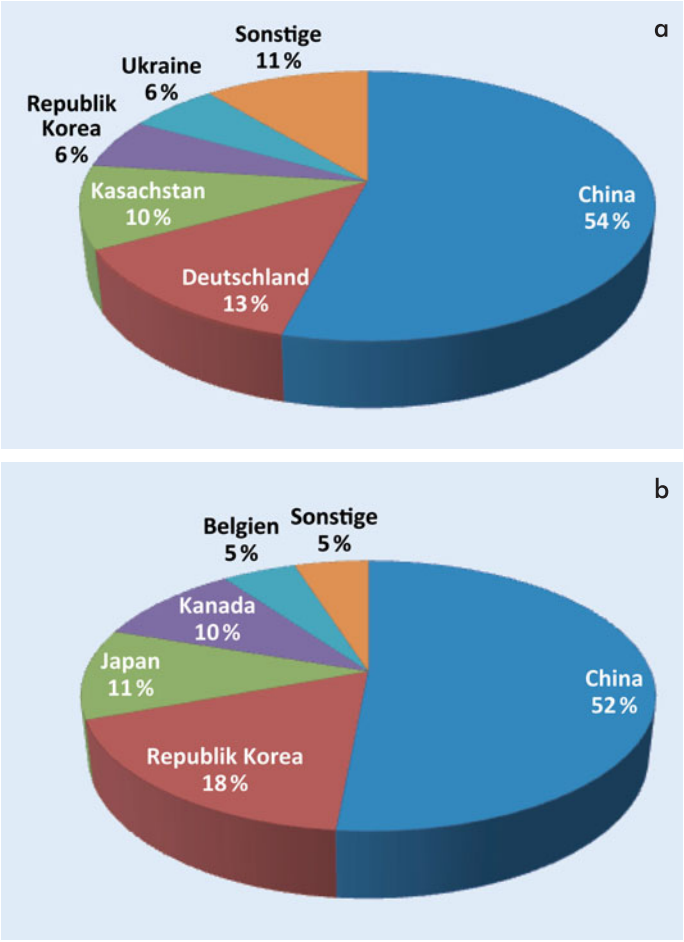


Abb. 6.3 (a) Jährliche Produktionskapazität 2010 von Gallium: 260 t und (b) Jahresproduktion 2010 von Indium: 659 t. Datenquelle: USGS (2012)

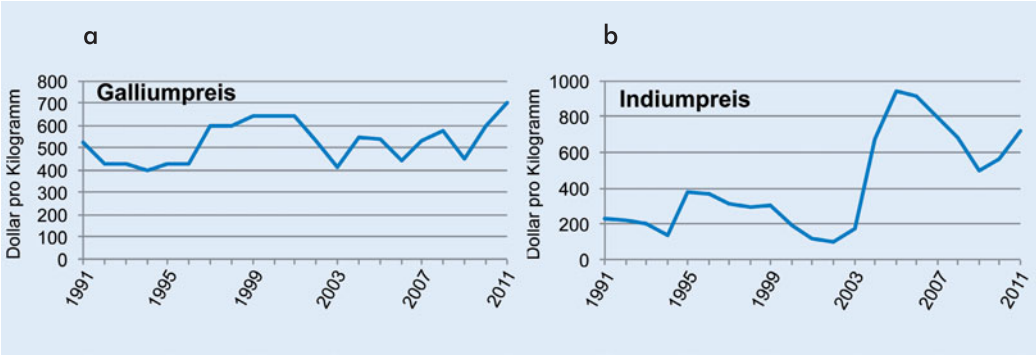
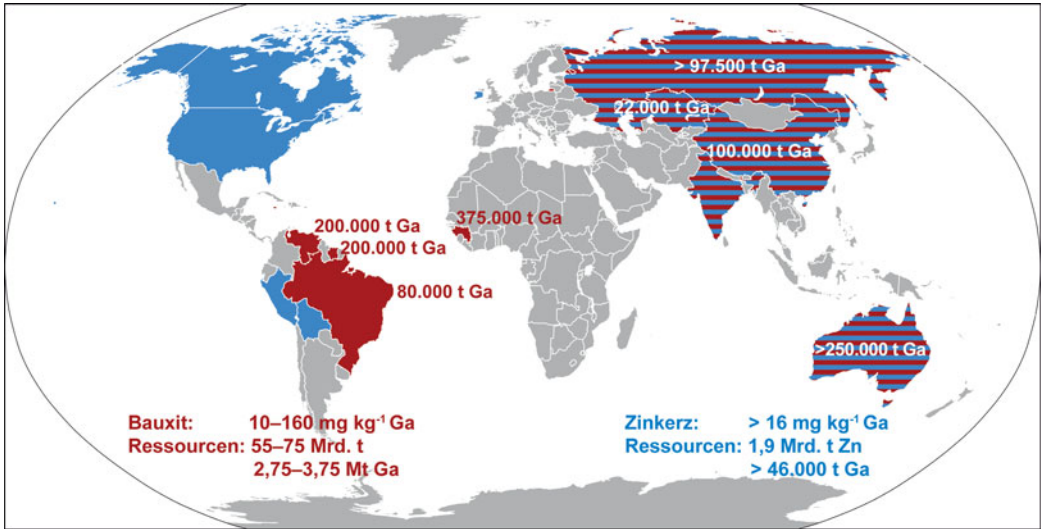


Abb. 6.4 Gallium- und Indiumpreise 1991–2011 (a) Galliumpreis, Jahresende für 99,99999% Reinheit (= 5N) und (b) Indiumpreis, Jahresdurchschnitt 99,97%. Datenquelle: USGS (2013)

6



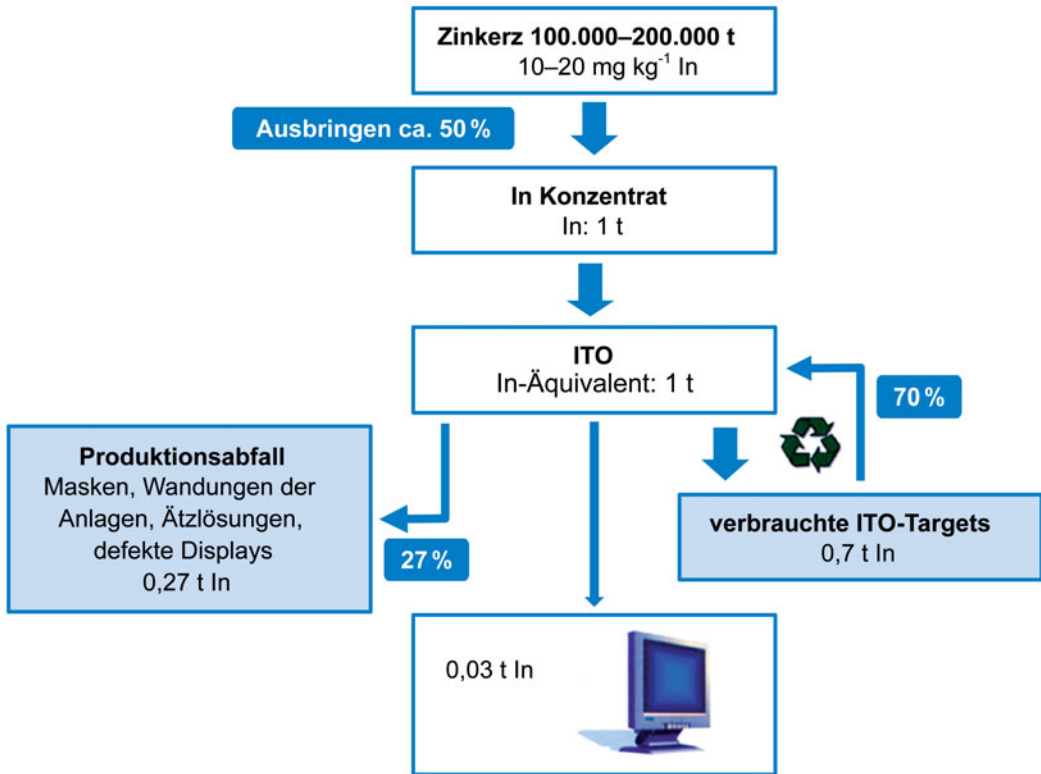
**Abb. 6.5** Weltweite Gallium-Ressourcen. Quelle: übersetzt und modifiziert nach © Dittrich et al. (2011)

(Dittrich et al. 2011) zu der Aussage, dass allein im Zuge des weltweiten Bauxitabbaus (ca. 211 Mt Rohbauxit in 2010) mit einem durchschnittlichen Galliumgehalt von etwa 50 mg kg<sup>-1</sup> mehr als 10.000 t Ga bergmännisch gewonnen und verarbeitet werden. Von dieser Menge wurden in 2010 aber nur 1–2 % des enthaltenen Ga tatsächlich abgetrennt – und dies nur an ausgewählten Hüttenstandorten.

Der Grund für die nur sehr unzureichende Nutzung des Ga-Rohstoffpotenzials liegt am sehr begrenzten Volumen des Marktes und im Fehlen effizienter und kostengünstiger Technologien für deren Abtrennung. So können bei der Aluminiumproduktion aus Bauxit derzeit mit aktuell verwendeten Technologien nur ca. 5 % des im Bauxit enthaltenen Ga abgetrennt werden – die verbleibenden 95 % verbleiben im Aluminium oder finden sich im Rotschlamm wieder, der dann als Reststoff verbracht wird. Geringes Marktvolumen und geringe Effizienz verfügbarer Technologien wirken zusammen und gestalten die Abtrennung von Ga bei der Bauxitverhüttung an vielen Standorten als unrentabel.

Ein weiterer Grund sind die bislang oft fehlenden technologischen Möglichkeiten, Rohstoffe wie Ga, aber auch Indium effizient herzustellen, einzusetzen und zu recyceln. So liegt das z.B. bei der Gewinnung von Indium erzielbare Ausbringen von In-Konzentrat aus primär gewonnenem Zinkerz zwar zunächst bei immerhin 50 %. Beim darauf folgenden Produktionsprozess bspw. von Flachbildschirmen geht dann aber ein Großteil des Indiums verloren (Abb. 6.6). De facto befinden sich in einem 32"-Bildschirm von den im Herstellungsprozess erforderlichen 3 g In im fertigen Bildschirm nur noch 0,18 g In (Niederschlag u. Stelter 2009). Ein Ausweg ist deshalb nicht nur die Rückgewinnung des in einem Endprodukt eingeschlossenen Rohstoffs im Sinne eines klassischen Recyclingansatzes, sondern auch die Rückgewinnung von Rohstoffen aus Produktionsabfällen.

Die Reaktion des Marktes auf den vorhergesagten raschen Anstieg des globalen Bedarfs an Elektronikmetallen wie Ga oder In kann zwei Formen annehmen. Auf der einen Seite könnte mit dem Bedarf der Preis für Elektronikmetalle



**Abb. 6.6** Indium im Produktionsprozess von Flachbildschirmen. *ITO* Indium-Zinnoxid (engl. *Indium-Tin-Oxide*) wird als transparentes, leitfähiges Oxid für Dünnschicht-Produkte verwendet. Quelle: nach © Niederschlag u. Stelter (2009)

stark ansteigen – und damit herkömmliche Technologien wirtschaftlich werden. Auf der Verbraucherseite würde einem drastischen Preisanstieg aber sicher mit Vermeidungs- und Substitutionsstrategien begegnet werden – eine Strategie, die langfristig wenig sinnvoll erscheint für Rohstoffe, die eigentlich jetzt schon in genügender Menge bergmännisch gewonnen werden. Die zweite, nachhaltigere Strategie wäre die Suche nach innovativen Technologien für die effizientere Abtrennung, Nutzung und dem Recycling von Elektronikmetallen als Bei- und Koppelprodukte. Hier besteht auf jeder Ebene sehr großer Innovationsbedarf, dem nur durch mittel- und langfristige Forschung begegnet werden kann.

## 6.6 Lösungsansätze

Für die Zukunft absehbare Engpässe in der Versorgung wirtschaftskritischer Rohstoffe können auf verschiedenen Handlungsebenen sowohl auf wirtschaftlich-politischer als auch auf technologischer Ebene begegnet werden. Wirtschaftliche und/oder politische Handlungsansätze sind insbesondere für die den Gruppen 1 und 2 zugeordneten wirtschaftskritischen Rohstoffen von Relevanz. Wichtig zu unterscheiden sind hier allerdings scheinbare von realen Abhängigkeiten der Versorgung von Lieferregionen. In die erste Art der Abhängigkeit haben sich die westlichen Industrienationen durch



## 6

Untätigkeit in den letzten Jahrzehnten freiwillig hineinbegeben. Dies erfasst im Wesentlichen die Rohstoffe der Gruppe 1. Für die Sicherung des Zugangs zu Rohstoffen dieser Gruppe wird es notwendig sein, alternative Rohstoffquellen zu erkunden (da diese in vielen Fällen schon bekannt sind, gilt es, diese in der Regel nur nachzuerkunden) und mit strategischen Investitionen/Partnerschaften (z.B. Abnahmeverträge oder *Joint Ventures*) an Standorten außerhalb der VR China in Produktion zu bringen. Nur so können bestehende Monopole aufgebrochen und nachhaltig vermieden werden. Wichtig ist hier noch einmal zu betonen, dass es hochwertige Lagerstätten von Rohstoffen der Gruppe 1 auf verschiedenen Kontinenten gibt – und die derzeitige regionale Fokussierung der Versorgung unnötig erscheint. Eine Aufhebung der Monopolstellung erfordert ausschließlich den Willen der rohstoffverarbeitenden und -verbrauchenden Industrie, die strategische Absicherung der Rohstoffversorgung als integralen und notwendigen Bestandteil ihres Geschäftsfeldes zu begreifen.

Die Rohstoffe der Gruppe 2 dagegen zeichnen sich durch eine sehr stark regional fokussierte Verteilung aus, wobei reale Abhängigkeiten entstehen. Hier können Instrumente wie die von der Bundesregierung mit der Mongolei, Kasachstan und Chile geschlossenen Rohstoffpartnerschaften greifen, um durch politische Allianzen verbesserte Transparenz und erhöhten Marktzugang zu erreichen. Die Politik kann aber nur günstige Rahmenbedingungen schaffen – letztlich ist aktives Handeln der Industrie zur Sicherung des Rohstoffbedarfes unumgänglich.

Für die Rohstoffe der Gruppe 3 fokussiert sich der empfohlene Handlungsbedarf auf Technologieforschung und -entwicklung. Dabei muss das langfristige Ziel der effektiven Gewinnung wirtschaftskritischer Metalle aus primären Rohstoffquellen sowohl Fortschritte in der Ressourcen- als auch in der Energieeffizienz erreichen. In puncto Ressourceneffizienz wird es notwendig sein, verfügbare und neuartige Technologien so zu kombinieren, dass nicht

nur Hauptprodukte, sondern auch möglichst viele der in einer Lagerstätte enthaltenen Koppel- und Beiprodukte effizient und wirtschaftlich gewonnen werden können. Dies erfordert einerseits die Etablierung und den Ausbau mittel- bis langfristig angelegter interdisziplinärer und relevanter Forschung (z.B. Geometallurgie, Biohydrometallurgie, ► Kap. 17), andererseits aber auch die Bereitschaft von Unternehmen oder Förderorganisationen, entsprechende Projekte zu finanzieren.

Gerade in den hochindustrialisierten Nationen gilt es im Sinne der Ressourceneffizienz ebenfalls, Rohstoff- und Materialkreisläufe zu schließen. Innovative Technologien, die zur effizienten Nutzung komplexer primärer (geogener) Rohstoffe entwickelt werden, können gegebenenfalls auch beim Recycling von komplexen sekundären Rohstoffen zum Einsatz gebracht werden. Bei heute generell sehr niedrigen Recyclingraten für wirtschaftskritische Rohstoffe (oft < 1 %, siehe UNEP 2013) ist hier sehr großes Potenzial vorhanden (► Kap. 11). Zu diesem Potenzial gehören einerseits Methoden für die Rückgewinnung von wirtschaftskritischen Metallen aus aktuell anfallenden (z.B. Beizen, Schlämme, Schlacken, Aschen) oder früheren Produktionsrückständen (z.B. Berge- oder Hüttenhalden), das Recycling von *End-of-Life*-Produkten (z.B. Flachbildfernseher, Magnete) sowie damit verbunden das *Smart Design* von (Gradienten-)Werkstoffen und Produkten.

Forschung und Entwicklung dürfen hierbei nicht ausschließlich auf solche Rohstoffe beschränkt bleiben, die heute als wirtschaftskritisch eingestuft werden. Eine solche Einstufung ist dynamisch und muss fortlaufend kritisch hinterfragt werden. Zum einen ändert sich das Angebot eines Rohstoffs, z.B. durch die Entdeckung eines neuen Lagerstättendistriktes, der Etablierung eines neuen Bergwerkes oder der Einführung einer neuen Verhüttungstechnologie. Viel wesentlicher ist aber die rasche Entwicklung der Nachfrage, getrieben durch immer schneller verlaufende Produktentwicklungszyklen.

Insbesondere der Bedarf an Hochtechnologiemetallen mit aktuell niedriger Produktionsbasis kann nur sehr schwer vorhergesagt werden. Kombiniert mit der Tatsache, dass für eben diese Metalle die natürliche Verfügbarkeit kein wesentliches Hindernis darstellt, ergeben sich z. B. Limitationen des Nutzens der Substitutionsforschung. Für die meisten der Rohstoffe, die aktuell als wirtschaftskritisch eingestuft werden (Gruppen 1 bis 3), sind für die Zukunft mehr als ausreichende Ressourcen und Reserven nachgewiesen. Eine Substitution dieser Rohstoffe erscheint daher nur begrenzt sinnvoll, insbesondere deswegen, weil man hier nur einen Rohstoff, welcher in einer aktuellen Bewertung einen kritischen Status erreicht, durch einen weiteren ersetzt, dem in naher Zukunft das gleiche Schicksal drohen könnte. Durch ein solches Vorgehen würden Lieferengpässe lediglich verlagert, aber nicht behoben werden.

## 6.7 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie widmete sich der Frage, was genau bestimmte Rohstoffe wirtschaftskritischer als andere macht und wie mögliche Versorgungengpässe für bestimmte Rohstoffe in der Zukunft vermieden werden können. Insbesondere sollte darauf eingegangen werden, warum verschiedene Studien zur Bestimmung wirtschaftskritischer Rohstoffe am Ende immer zu sehr ähnlichen Resultaten kommen. Eine Unterteilung der betrachteten Rohstoffe in nur drei Gruppen lieferte bereits ein einfaches, aber auch eindrucksvolles Resultat. Die Kritikalität der ersten Gruppe wird bestimmt durch die klare Dominanz der VR China als Versorger. Da diese Monopolstellung nicht auf einer außergewöhnlich hohen Konzentration von Ressourcen und Reserven in der VR China basiert, ist diese Monopolstellung durch eine einfache, aktive Haltung der rohstoffkonsumierenden Industrie aufzuheben. Versorgungsrisiken der zweiten Gruppe von Rohstoffen basieren auf real existierenden Ungleichgewichten in der natürlichen Verteilung gewisser mineralischer

Rohstoffe, die sich auf wenige – z. T. auch einzigartige – Lagerstätten(-distrikte) konzentrieren, die mit derzeit verfügbaren Technologien wirtschaftlich nutzbar sind. Wenn diese Lagerstätten sich in politisch, gesellschaftlich oder wirtschaftlich instabilen Ländern befinden, entsteht ein erhebliches Versorgungsrisiko. Dieses Risiko kann wiederum durch aktives Handeln der Industrie, flankiert durch wirtschafts- und handelspolitische Maßnahmen begrenzt, aber nicht aufgehoben werden. Langfristig gibt es natürlich auch die Möglichkeit, über geologische Erkundung bzw. die Entwicklung innovativer Technologien neue Lagerstätten für Rohstoffe der Gruppe 2 zu entdecken bzw. nutzbar zu machen. Ähnlich ist die Situation bei den Rohstoffen der Gruppe 3 – nur, dass hier die Entwicklung neuer, effizienter Technologien klar im Vordergrund steht.

Der rohstoffverarbeitenden Industrie bzw. Herstellern von Produkten, die wirtschaftskritische Rohstoffe nutzen, kommt offensichtlich eine Schlüsselrolle zu. Rohstoffsicherung und Rohstoffmanagement sind ureigenstes Interesse der Industrie. Da der Bedarf zumindest jeder Branche, wahrscheinlich aber für jeden Betrieb, einzigartig ist, stellt sich die Situation auf der Ebene einer Volkswirtschaft wie der Bundesrepublik Deutschland beliebig komplex dar. Hier kann die Politik im günstigsten Fall positive Rahmenbedingungen schaffen, in keinem Fall aber die Funktion der Rohstoffsicherung für die Industrie übernehmen. Grundlegende Entscheidungen in Bezug auf ihre Rohstoffsicherung bzw. – allgemeiner – in Bezug auf ein umfassendes Rohstoffmanagement müssen von der Industrie selbst getroffen werden. Im Fall der deutschen Industrie zeigt sich, dass die Zyklen der Bergbauindustrie und die sich kontinuierlich verkürzenden Lebensphasen moderner Konsumgüter nicht mehr miteinander vereinbar sind. Nur so lässt sich die anhaltende Abhängigkeit von der Wirtschaftsmacht China in Bezug auf viele wirtschaftskritische Rohstoffe erklären. Westliche Firmen müssen deshalb gemeinsam mit Forschung und Politik die sich z. B. im Rahmen der finanziellen

## 6

Beteiligung an jungen Explorationsfirmen oder kleinen innovativen Betrieben bietenden Chancen nutzen und das Thema Rohstoffe konzertiert angehen. Die Kunst dabei ist es, nicht nur kurzfristig orientierte Umsetzungsmaßnahmen durchzusetzen, sondern auch mittel- und langfristige Rohstoffsicherung und -management zu betreiben.

## Quellenverzeichnis

- Achzet B (2012) Empirische Analyse von preis- und verfügbarkeitsbeeinflussenden Indikatoren unter Berücksichtigung der Kritikalität von Rohstoffen. Hamburg, disserta Verlag
- Angerer G, Marscheider-Weidemann F, Lullmann A, Erdmann L, Scharp H, Handke V, Marwede M (2009) Rohstoffe für Zukunftstechnologien – Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung Berlin, Fraunhofer ISI. Studie im Auftrag des BMWi. [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/n/de/publikationen/Schlussbericht\\_lang\\_20090515\\_final.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/n/de/publikationen/Schlussbericht_lang_20090515_final.pdf). Letzter Zugriff 29.07.2013
- BMBF (2012) Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland. Bonn.
- DERA (2012) DERA-Rohstoffliste 2012. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-10.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-10.pdf?__blob=publicationFile&v=6). Letzter Zugriff 1.08.2013
- Dittrich T, Seifert T, Gutzmer J, Fentie KY, Bongaerts JC (2011) Gallium. Interner unveröffentlichter Bericht.
- Erdmann L, Graedel TE (2011) Criticality of non-fuel minerals: A review of major approaches and analyses. *Environmental Science & Technology* 45: 7620–7630
- Europäische Kommission (2010) Critical raw materials for the EU. Report of the ad-hoc working group on defining critical raw materials. 30. July 2010. [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf). Letzter Zugriff 19.07.2013
- Graedel TE, Barr R, Chandler C, Chase T, Choi J, Christoffersen L, Friedlander E, Henly C, Jun C, Nassar NT, Schechner D, Warren S, Yang M, Zhu C (2012) Methodology of metal criticality determination. *Environmental Science & Technology* 46: 1063–1070
- IZT, adelphi (2011) Kritische Rohstoffe für Deutschland, Abschlussbericht im Auftrag der KfW Bankengruppe. Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung und Adephi. <https://www.izt.de/fileadmin/downloads/pdf/54416.pdf>. Letzter Zugriff 19.07.2013
- National Research Council (2008) Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. National Research Council of the National Academies, Washington, DC, The National Academies Press, 245 S.
- Niederschlag E, Stelter M (2009) 145 Jahre Indium – Ein Metall mit Zukunft. *Erzmetall* 62: 17–22.
- Peiró LT, Méndez GV, Ayres RU (2011) Rare and critical metals as by-products and the implications for future supply. INSEAD Working Paper 2011/129/EPS/TOM/ISIC
- Roskill (2011) Rare Earths & Yttrium: Market outlook to 2015. 14. Auflage. London, UK
- UNEP (2013) Metal recycling: Opportunities, limits, infrastructure. Report 2b of the Global Metal Flows Working Group. United Nations Environment Programme. <http://www.unep.org/resource-panel/Publications/MetalRecycling/tabid/106143/Default.aspx>. Letzter Zugriff 29.07.2013
- US DOE (2010) Critical Materials Strategy, December 2010. United States Department of Energy. <http://energy.gov/pi/office-policy-and-international-affairs/downloads/2010-critical-materials-strategy>. Letzter Zugriff 30.07.2013
- USGS (2012) 2010 Minerals Yearbook. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/myb1-2010-galli.pdf> und <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/myb1-2010-indiu.pdf>. Letzter Zugriff 31.07.2013
- USGS (2013) Minerals Yearbook. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/index.html#mcs> und <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/index.html#mcs>. Letzter Zugriff 31.07.2013

## Kernaussagen

- Wirtschaften ohne Rohstoffe ist nicht möglich; der Beitrag setzt sich konstruktiv mit dem Begriff wirtschaftskritischer Rohstoffe auseinander.
- Eine Unterteilung der wirtschaftskritischen Rohstoffe in drei Gruppen führt zu folgendem Ergebnis:
- Gruppe 1 wird durch China als Versorger dominiert – jedoch nicht, weil dort eine außergewöhnliche Konzentration an Ressourcen vorhanden ist, sondern weil langfristig angelegte Strategien verfolgt werden; Ausweg: Erschließen neuer Lagerstätten außerhalb von China.
- Gruppe 2 wird gekennzeichnet durch existierende Ungleichgewichte in der natürlichen Verteilung der Rohstoffe; dies in Verbindung mit bestehenden politischen Risiken führt zu einem erheblichen Versorgungsrisiko. Mögliche Gegenmaßnahmen: geologische Erkundung intensivieren, neue Techniken zum Auffinden und zur effizienteren Verarbeitung der Rohstoffe entwickeln.
- Gruppe 3 schließlich wird bestimmt durch den Bedarf der Industrie an Metallen, die in Lagerstätten nicht als Hauptminerale, sondern als Begleitminerale vorkommen. Gemeinsame F&E an Explorations- und Gewinnungstechniken, aufbereitungstechnischen und metallurgischen Fragestellungen sind notwendig.
- Rohstoffsicherung und Rohstoffmanagement sind eine gemeinsame Aufgabe der Industrie und aller anderen Beteiligten; F&E-Projekte müssen interdisziplinär ausgebaut werden.

# 7 Lithiumgewinnung aus Primärrohstoffen – Stand und Perspektiven

Wolfgang Voigt

## 7.1 Einleitung

Seit Jahren lässt sich ein kontinuierlicher Anstieg des Verbrauches an Lithiumverbindungen in den verschiedensten Bereichen der Industrie verzeichnen. Ein nahezu sprunghafter Bedarf entwickelt sich durch die Fortschritte im Bereich der Lithiumbatterien — sowohl der Primär- und besonders der Sekundärbatterien (Lithium-Ionenakkus). Diese Fortschritte und die zu erwartenden weiteren Entwicklungen bei den Lithium-Ionenakkus erlaubten es vor etwa drei Jahren, dass die führenden Automobilfirmen laut über einen Weg aus der Krise nachdachten und diesen partiell in einer mindestens teilweisen Umstellung vom Verbrennungsmotor zum Elektromotor sahen. Etwa zur gleichen Zeit wurden Bedenken geäußert, dass die Rohstoffreserven für Lithium (Li) nicht ausreichend sein könnten, um einen bedeutenden Anteil der Automobilproduktion auf Elektro- oder Hybridantrieb umzustellen.

Die darauf folgende fieberhafte Suche nach Li-Quellen und deren Bilanzierung zeigte schnell, dass es an Li prinzipiell nicht mangelt, aber sehr wohl Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig sind, um eine nachhaltige und ökonomisch tragbare Li-Gewinnung zur Herstellung von Li-Karbonat oder Li-Metall aus den unterschiedlichen Rohstofftypen in Batteriequalität zu gewährleisten. Im folgenden Beitrag bemüht sich der Autor aus der Sicht

eines Chemikers, der in unterschiedlichen Li-Projekten involviert ist, den aktuellen Stand und die Perspektiven darzustellen.

## 7.2 Bedarf, Reserven und Ressourcen

Der Li-Bedarf für die Elektromobilität lässt sich in etwa an folgenden Zahlen ableiten. Je nach technischer Version werden 300–600 g Li zur Speicherung von 1 kWh benötigt, die dann in 5 kg Batterie verarbeitet sind. Für die Reichweite eines Autos von 100 km benötigt man 13–16 kWh. Bei 10 kg Li pro Fahrzeug wären dies gesicherte Reserven für 400 Mio. Fahrzeuge (Tabelle 7.1). Ließe sich die gesamte Reservenbasis durch technologische Entwicklung nutzen, so wären es mehr als 1 Milliarde, nach Roskill sogar 28 Milliarden Fahrzeugeinheiten.

In der Zwischenzeit wurden neue Vorkommen entdeckt bzw. bereits bekannte neu bewertet. Allein für den Salar de Uyuni in Bolivien gehen die Expertenschätzungen von 9 Mio. t Lithium aus. Falls sich die Ergebnisse der einzigen bisher dort durchgeführten Tiefbohrung bestätigen, könnte man von mehr als dem 10-Fachen dieser Menge allein an diesem Salzsee ausgehen (Ballivián 2010). Der USGS gibt jetzt eine Reserve von 30 Millionen t Li an (USGS 2012).

**Tabelle 7.1** Reserven an Lithiumvorkommen in den wichtigsten Ländern in Tonnen Li (Stand 2008 nach USGS 2009 und Roskill 2009)

Land	USGS		Roskill Reserven
	Reserven <sup>1</sup>	Reservenbasis <sup>2</sup>	
USA	38.000	410.000	2.703.000
Argentinien	–	–	6.000.000
Australien	170.000	260.000	190.000
Bolivien	–	5.400.000	5.500.000
Brasilien	190.000	910.000	
Kanada	180.000	360.000	151.000
Chile	3.000.000	3.000.000	6.800.000
China	540.000	1.100.000	5.400.000
Serbien	–	–	957.000
Welt	4,1 Mio.	11,5 Mio.	28 Mio.

<sup>1</sup> Reserven sind Teil der Reservenbasis, die zum Zeitpunkt der Feststellung dieser Vorkommen wirtschaftlich abgebaut werden kann. Der Begriff ‚Reserven‘ sagt nichts darüber aus, ob Abbauanlagen vorhanden und betriebsbereit sind.

<sup>2</sup> Die Reservenbasis entspricht der nachgewiesenen Ressource, von der Reserven abgeschätzt werden. Diese Reservenbasis umfasst solche Ressourcen, die aktuell wirtschaftlich (Reserven) gewinnbar sind, bzw. bedingt abbauwürdig und von denen einige zurzeit wiederum unwirtschaftlich sind.

Neben der Li-Verfügbarkeit gibt es große Fortschritte für den sicheren Betrieb großer Li-Batterieeinheiten. Mit der Eigenschaft von Li-Ionenakkus, schnell be- und entladen werden zu können, werden diese als Speicher zur Kapazitätsregelung in Stromnetzen oder autarken Hausanlagen interessant, wenn Photovoltaik- oder Windkraftstrom genutzt werden. Evonik Industries sieht hierin *„ebenso wie im Automobilbereich einen Milliardenmarkt“* (Dr. Klaus Engel, Vorstandsvorsitzender der Evonik Industries AG) und hat in Völklingen (Saarland) einen Versuchsspeicher von 1 MW Leistung mit einer Kapazität von 700 kWh eingeweiht; ein 10-fach größerer soll bald folgen. Über ähnliche Projekte berichtet auch

der Batteriehersteller Leclanche. Er geht von Speicherkosten von *„deutlich unter 10 Cent pro kWh aus“*; auf Zellebene ist dies schon erreicht (Eder 2012). Für den Privatbereich werden bereits komplette Photovoltaikanlagen mit Speichersystemen angeboten (z. B. Conergy), die dann 80 % des Eigenbedarfs an Strom abdecken.

Bedarfsprognosen mit unterschiedlichen Szenarien zur Entwicklung der Automobilindustrie gehen von einem Bedarf von 300.000 bis 600.000 t/a  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  im Jahr 2020 aus. Das ist eine Verdreifachung bis Verfünffachung der gegenwärtigen Erzeugung. Der zusätzliche Bedarf aus dem Energiesektor ist dabei noch nicht eingerechnet.



### 7.3 Rohstofftypen und Grundprinzipen der Gewinnung

Geochemisch gesehen gehört Lithium nicht zu den seltenen Elementen. Seine Häufigkeit ist vergleichbar mit Elementen wie Bor (B), Blei (Pb) oder Brom (Br). Die Besonderheit besteht darin, dass es wie die Seltenen Erdmetalle (SEE) nicht in konzentrierter Form in Erzen angetroffen wird (► Kap. 8), sondern verdünnt in Muttergesteinen oder in Lösungen von Salzseen. Wichtige Li-Mineralerale sind Silikate wie Spodumen und Li-Eisen-Glimmer wie Zinnwaldit (Tabelle 7.2). Sie enthalten zwischen 0,5 und 5 % Li. In Lösungen von Salzseen (Südamerika: *Salare*), die für eine Li-Gewinnung in Betracht kommen liegen die Li-Gehalte zwischen 0,2 und 2,0 g/L, in der Atacamawüste bis 6,0 g/L. Nicht jeder Salzsee oder ausgetrocknete Salzsee enthält Li-Konzentrationen, die für die Gewinnung infrage kämen; dies ist regional sehr unterschiedlich. Es sollte an dieser Stelle auch hervorgehoben werden, dass die Li-Konzentration im Meerwasser so gering ist, dass dies als

Rohstoffquelle nicht in Betracht kommt. Im Hinblick auf die Gewinnungstechnologien und die Klassifizierung der Erschließungsprojekte ist eine weitere Untergliederung der Li-Quellen sinnvoll (Tabelle 7.3). Die Listung in der Reihe A bis E spiegelt zugleich die Reihenfolge in der Bedeutung als Li-Rohstoffquelle wider. Garrett (2004) beschreibt sehr detailliert die Verfahrensprinzipien aus den unterschiedlichen Rohstoffquellen mit Kenntnisstand bis zum Jahre 2002.

#### Salzseen

In den Salzseen liegt Lithium bereits in löslicher Form vor. Allerdings muss es von den in viel größerer Menge ebenfalls gelöst vorliegenden Salzen von Natrium (Na), Kalium (K) und Magnesium (Mg) sowie der Borate ( $\text{BO}_3$ ) abgetrennt werden (Tabelle 7.4). Die Abbildung 7.1 zeigt ein typisches Prozessschema, wie es im Salar de Atacama in Chile angewendet wird. In großen, mehrere  $\text{km}^2$  umfassenden Eindunstungsbecken wird die Salzlösung mittels Sonnenwärme und Wind aufkonzentriert, wobei sich die Salze in der Reihenfolge ihrer Löslichkeit

Reservoir	Konzentration	
Erdkruste	0,02–0,03 g Li/kg	(wie Bor, Blei, Brom)
Silicate, Glimmer	0,5–5%	♦ 5–50 g $\text{Li}^+$ /kg
Salzseen	0,02–0,2%	♦ 0,2–2,0 g $\text{Li}^+$ /kg
Meerwasser	0,00018 g $\text{Li}^+$ /kg	

Tabelle 7.2 Verteilung von Lithium in der Erdkruste

Typ	Li-Quelle
A	Solen, Salzlösungen aus Binnen-Salzseen
B	Silikate/Pegmatite: Spodumen/Li-Fe-Glimmer, (Zinnwaldit)
C	Hectorit/Li-Tone
D	Erdgas-/Erdölbegleitwässer
E	Geothermiewässer

Tabelle 7.3 Rohstofftypen für eine Lithiumgewinnung

7

abscheiden: zuerst NaCl, dann KCl, später Carnallit (ein Doppelsalz  $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) und schließlich der Bischofit ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ).

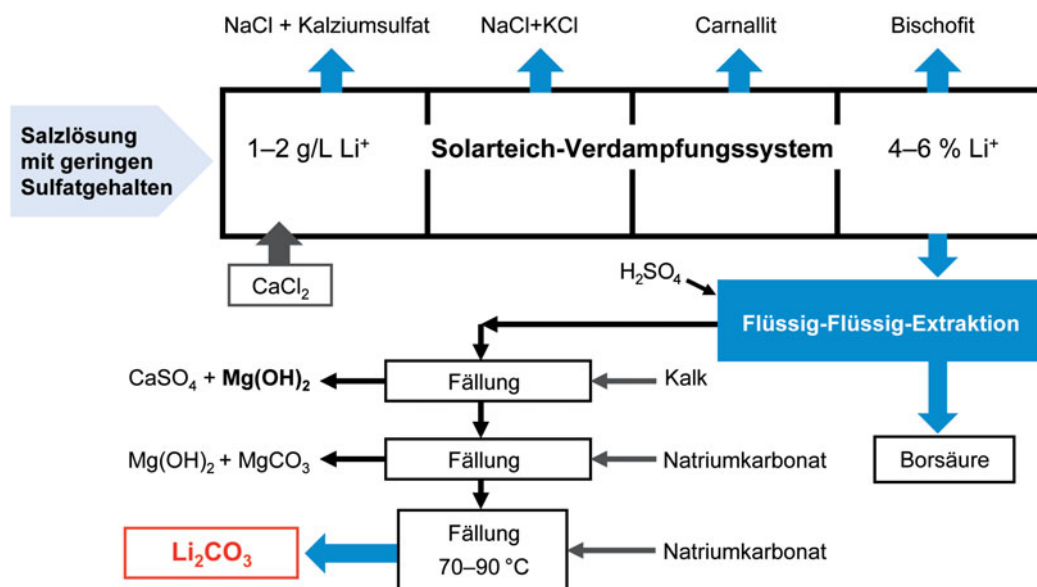
Letzterer kann sich nur unter Bedingungen größter Trockenheit bilden, wie sie in der Atacamawüste gegeben sind. Die verbliebene Lösung mit 4–6 %  $\text{Li}^+$  (entspricht etwa 240–360 g LiCl pro kg Lösung) wird dann in einer Fabrik einer chemischen Feinreinigung unterzogen. Zunächst werden die Borate in Form von Borsäure mittels Schwefelsäure und in Kerosin gelösten langkettigen Alkoholen durch Flüssig-Flüssig-Extraktion entfernt und anschließend über selektive Fällungen restliches Sulfat, Magnesium- und Kalziumionen entfernt. Im letzten Schritt fällt man mit Soda das Zielprodukt Li-Karbonat ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) aus, das gegebenenfalls dann noch weiteren aufwendigen Hochreinigungen auf Batteriequalität unterzogen wird (Tabelle 7.5).

Ein Problem im Eindunstungsprozess der Salzlaugen sind auftretende Li-Salzverluste durch die anhaftende Lösung mit schon hohen Li-Gehalten zwischen den Bischofitkristal-

**Tabelle 7.4** Typische Mengenverhältnisse am Beispiel der Lösung des Salar de Uyuni mit 0,5 g/L  $\text{Li}^+$

1 Tonne $\text{Li}_2\text{CO}_3$ erfordert Eindunsten von 270–330 m <sup>3</sup> Lösung, dabei Anfall von	
25 t	Carnallit ( $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )
1 t	Borsäure ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ )
8 t	Sulfate ( $\text{MgSO}_4 \cdot (7,6,5)\text{H}_2\text{O}$ )
85 t	Salz (Halit, NaCl)

len. Ein weiteres Problem stellen Anteile löslicher Sulfate des Magnesiums ( $\text{Mg}^{2+}$ ) und Kaliums ( $\text{K}^+$ ) dar, die noch vor dem Erreichen der Bischofitsättigung zu Ausscheidungen von Li-sulfathaltigen Doppelsalzen führen, die in reiner Form nicht gewonnen werden können und somit auch Verluste ergeben. Dem kann man durch Zumischen von  $\text{CaCl}_2$ -haltigen Lösungen und Fällung des Sulfates als Gips begegnen; sofern es günstige Quellen  $\text{CaCl}_2$ -haltiger



**Abb. 7.1** Typisches Prozessschema zur Herstellung von  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  aus Sole der Atacamasalzwüste

Lösung in der Nähe der Eindampfungsteiche gibt, wie es zumindest teilweise in der Atacama gegeben ist (Abb. 7.1 links oben). Ist Letzteres nicht der Fall, kann man versuchen, den Sulfatgehalt mit Löschkalk,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , abzusenken, wobei neben Gips auch mit einer unerwünschten Fällung von gelartigem Mg-Hydroxid zu rechnen ist, das wiederum eine Tendenz zur Li-Aufnahme zeigt. Mit der Li-Extraktion aus den Salzseen fallen gewaltige Mengen von in diesen Mengen und Qualitäten nicht verwertbaren Salzen und Mineralen wie Gips, NaCl und  $\text{MgCl}_2$  an (Tabelle 7.4). Bisher haben die damit verbundenen Abfallberge in der Atacamawüste noch keine größeren Probleme verursacht. Dies wird sich ändern, wenn die Li-Produktionskapazitäten vervielfacht werden.

Abgesehen von den Komplikationen mit dem Sulfatgehalt ist die größte Herausforderung die Abtrennung des Magnesiums vom Lithium, da beide Elemente sich chemisch ähnlich verhalten (Schrägbeziehung des Periodensystems der chemischen Elemente) und somit auch die Löslichkeitsunterschiede ihrer Salze nicht zu groß sind. Die Löslichkeitsverhältnisse zwischen Mg- und Li-Salzen sind auch stets so gelagert, dass die Mg-Salze für ein gegebenes Anion immer schwerer löslich sind als die Li-Salze. Daher müssen immer zuerst die Mg-Salze auskristallisiert werden und in der

Restlösung verbleiben, dann die Li-Salze, zu- meist in Form des LiCl. Der Aufwand für diese Trennung steigt mit dem Mg:Li-Verhältnis an. Während dieses Verhältnis in der Atacama bei 6:1 liegt, steigt es im Salar de Uyuni (Boli- vien) schon auf etwa 12:1 bis 20:1 und in den Salzseen Chinas im Qinghaibecken oder dem Tuz Gölü in der Türkei auf über 100:1. Mit dem klassischen Prozessschema kann hier das Lithium nicht abgetrennt werden. In China wurden bereits neue Trennverfahren in Pro- duktionsanlagen mit geplanten Kapazitäten bis 15.000 t/a  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  an den Taijinaier-Seen im Qinghaigebiet integriert. Die auf Mem- branverfahren oder thermischer Spaltung des  $\text{MgCl}_2$  beruhenden Verfahren konnten die Erwartungen nicht erfüllen, sodass die Anla- gen gegenwärtig zumeist nicht produzieren. Über ein Verfahren zur Mg-Fällung mit Am- moniak und anschließender Kristallisation des Ammoniumchlorids und Rückgewinnung des Ammoniaks gab es eine Erfolgsmeldung, doch keine Details. Ein auf Ionenaustausch an Gibb- sit,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , basierendes Verfahren betreibt die Firma FMC Lithium am Salar de Hombre Muerto (Argentinien). Details werden streng geheim gehalten.

Der Autor hat im Rahmen einer universi- tären Zusammenarbeit zwischen der TU Berg- akademie Freiberg mit der Universität Tomas

Stoffe, Parameter	Typische Werte (%)	Garantierte Werte (%)	
$\text{Li}_2\text{CO}_3$	99,6	99,3	min
$\text{H}_2\text{O}$	0,4	0,6	max
Na	0,03	0,050	max
Ca	0,01	0,040	max
$\text{SO}_4$	0,04	0,10	max
Fe	2	20	max
Cl	0,005	0,01	max
in Säure unlösliche	0,005	0,02	max
Malvern D50 ( $\mu\text{m}$ )	15		

**Tabelle 7.5** Typische Reinheitsangaben für die Batteriequalität von Li-Karbonat

7

Frias in Potosí (Bolivien) ein Verfahren entwickelt, das ohne erweiterten Chemikalieneinsatz unter Vermeidung großer Abfallberge die Mg-Li-Trennung realisiert (Voigt et al. 2010 a, b).

## Pegmatite und Glimmer

Mit dem Begriff Pegmatite werden Gesteine zusammengefasst, die aus Restschmelzen aufsteigender Magmen gebildet werden. Hauptkomponenten sind Quarz, Feldspäte und Glimmer in meist grobkörniger Form (Granite). Diese Restschmelzen enthalten hohe Anteile leichtflüchtiger und niedrigschmelzender Verbindungen mit den Elementen Fluor (F), Bor (B), Lithium (Li), Phosphor (P); oft auch größere Gehalte an Seltenen Erden (SEE), Molybdän

(Mo), Zinn (Sn) und Wolfram (W). Sie steigen in Rissen und Klüften bis nahe an die Oberfläche auf (Abb. 7.2).

Die Gewinnung der Wertstoffe erfolgt bergmännisch. Eine sehr gründliche geologische Erkundung ist notwendig, um nicht zu viel Ballastmaterial zu fördern. Die Abbildung 7.3 zeigt einen Überblick über die wichtigsten Verfahrensschritte bis zum Li-Karbonat. Spodumen ist in den allermeisten Fällen das Li-Hauptmineral ( $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ ). Nach einer möglichst selektiven Gewinnung wird das Gestein fein aufgemahlen, um dann über einen mechanischen Trennprozess (Klassieren, Flotieren) das Li-Mineral als Konzentrat zu gewinnen. Für viele Anwendungen wie in der Glas- und Keramikindustrie ist dieses Konzentrat bereits verwendbar. Deshalb muss bei Angaben über Kapazitäten von Li-Produzenten darauf

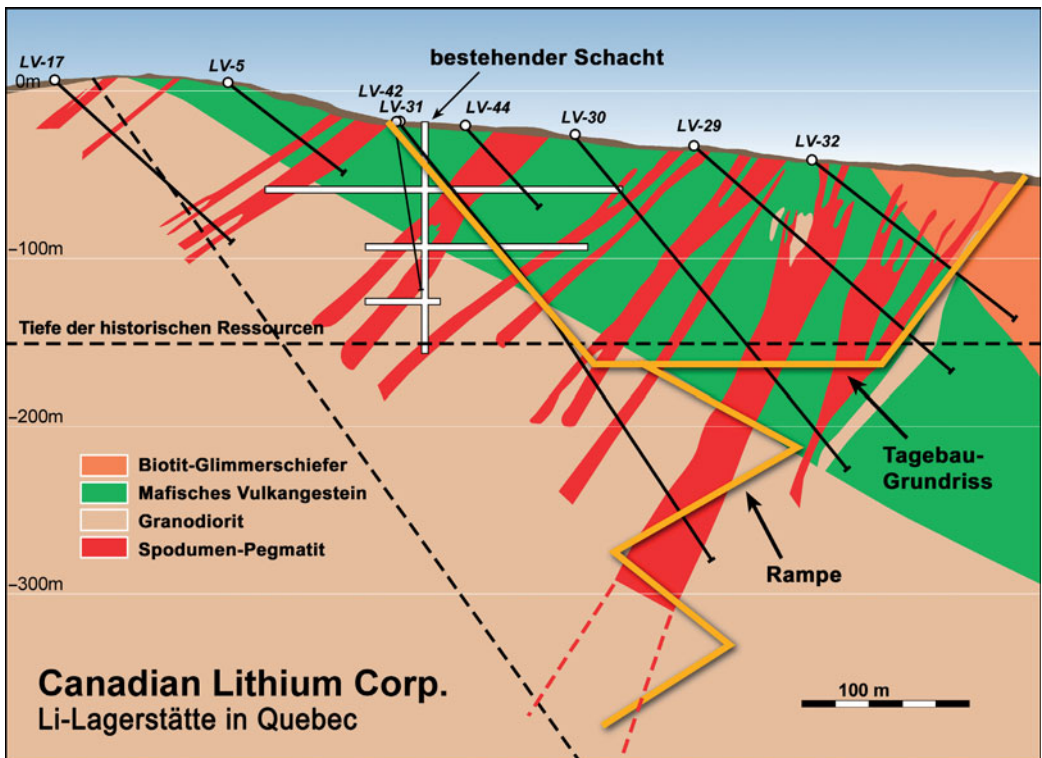


Abb. 7.2 Typische Spodumeneinlagerungen. Quelle: übersetzt nach ©Canada Lithium Corp. 2010

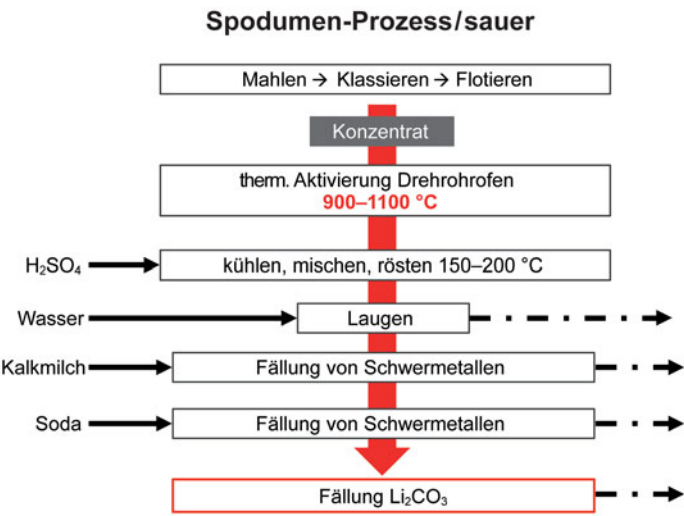


Abb. 7.3 Verfahrensschema zur Extraktion und Herstellung von  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  aus Spodumen

geachtet werden, ob tatsächlich  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  erzeugt wird oder aber Spodumenkonzentrat. Zur Li-Extraktion aus dem Silikatmineral ist eine Aktivierung bei hoher Temperatur erforderlich, da sonst ein Auslaugen selbst mit konzentrierten Säuren nicht möglich ist. Ist das Lithium einmal gelöst, werden durch die nachfolgenden Fällungsschritte störende Schwermetalle und Aluminium (Al) abgetrennt und letztlich das Li-Karbonat bei ca. 70 °C mittels

Soda kristallisiert. Die Li-Gewinnung aus den silikatischen Gesteinen ist durch einen hohen Energieeinsatz beim Mahlen und der thermischen Aktivierung gekennzeichnet. Dies ist gegenüber den Lösungen von Salzseen zunächst ein Nachteil. Für eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit sind jedoch weitere Kenngrößen einzubeziehen. Die Tabelle 7.6 zeigt eine Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen bei der Rohstofftypen.

Vorteile	Nachteile
Solen	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Li ist mobilisiert</li><li>• Nutzung solarer Energie</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Li sehr verdünnt</li><li>• viel Anfall an Salz, <math>\text{MgCl}_2</math></li><li>• Frischwasserproblem</li><li>• wenig Infrastruktur im Hochgebirge</li><li>• Nitrat (Südamerika)</li></ul>
Spodumen	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Li-Konzentrationen hoch</li><li>• reineres <math>\text{Li}_2\text{CO}_3</math></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vorkommen in Gang- u. Linsenform</li><li>• aufwendige Lokalisierung, Erkundung</li><li>• thermische Aktivierung • Energie</li><li>• kostenaufwendiger Bergbau</li></ul>

Tabelle 7.6 Vor- und Nachteile unterschiedlicher Rohstoffarten

## 7.4 Lithiumgewinnungsprojekte

### Die großen Vier

Aufgrund des zu erwartenden hohen Bedarfs erschließen weltweit viele Explorationsfirmen und Produzenten Lithiumvorkommen in etwa 85 Projekten (Abb. 7.4). Die gegenwärtigen Hauptproduzenten von Li-Karbonat sind die Sociedad Química y Minera de Chile SA, Chile (SQM), Rockwood Lithium (bis März 2012 Chemetall, USA, BRD) und FMC (Foote Mineral Corporation, USA). Für den weltweit größten Li-Produzenten Talison Lithium (Australien) trifft die obige Bemerkung zu, dass fast ausschließlich Spodumenkonzentrat erzeugt wird (2012 ca. 350.000 t) und eine größere  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ -Produktion erst anlaufen wird.

Rockwood Lithium hat eine klare und planmäßige Erweiterungsstrategie mit einer Verdopplung bis Verdreifachung der Kapazitäten aller Produktionsstandorte und Investitionen von 75 Mio. US\$ (Kings Mountain, NC, USA) bzw. 140 Mio. US\$ (Salar de Atacama; Tabelle 7.7). Besonders hervorzuheben ist der Anstieg in der Li-Hydroxid-Erzeugung in Kings Mountain. Mit dem Standort Clayton Valley bei Silver Peak (Nevada) besitzt Rockwood Lithi-



Abb. 7.4 Auswahl einiger Lithiumfirmen: Exploration, Produktion

um den historisch ersten Produktionsstandort von  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  aus einem Salzsee (ca.  $5 \times 4 \text{ km}^2$ ) mit einem Li-Gehalt von 400–600 mg/L bei einem Mg:Li-Verhältnis von nur 1:1.

FMC Lithium investiert ca. 50 Mio. US\$ zur Erweiterung der Kapazitäten am Salar de Hombre Muerto (Sal de Vida, Fenix; Provinz Salta, Argentinien). Die Reserven an diesem Salar werden auf 75 Jahre geschätzt. Der sogenannte FMC-Process der Li-Extraktion aus der Salzlösung beruht auf einer selektiven Li-Adsorption auf Gibbsit-Pellets,  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (Kapazität ca. 3–4 g Li/L Adsorbent). In einem zweiten Schritt wird  $\text{Li}^+$  durch Waschen mit Frischwasser wieder desorbiert, wobei eine Lösung mit 1%  $\text{Li}^+$  entsteht. Diese wird dann durch solare Eindunstung aufkonzentriert und sowohl  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  als auch LiCl produziert.

**Tabelle 7.7 a–b** Erweiterungsplanungen der Rockwood Lithium (Dr. Steffen Haber, Präsident); (a) basierend auf aktuellen Marktschätzungen (Salar de Atacama, Chile; Silver Peak, USA; Langelsheim-Anlage, Deutschland); (b) Neuinvestitionen an vier Produktionsstandorten

a	2008	2010	2015	2020
Lithiumkarbonate	>27.000 t	>33.000 t	>40.000 t	>50.000 t
Lithiumhydroxide	>4.000 t	>5.000 t	>10.000 t	>15.000 t

b	Produktionsstandorte	Neuinvestition
	Kings Mountain (NC, USA)	Spodumen → LiOH 75 Mio. US\$
	Clayton Valley (Silver Peak, NV, USA)	Sole
	Salar de Atacama (Chile)	Sole
	La Negra (Antofagasta, Chile)	♦ neu: 20.000 t/a $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 149 Mio. US\$



Von SQM sind dem Autor keine größeren Erweiterungspläne bekannt. Hier ist jedoch anzumerken, dass SQM nicht in erster Linie vom Lithium lebt, sondern dieses nur Nebenprodukt der Erzeugung von Kalidünger aus dem Salar de Atacama ist.

Talison Lithium will im letzten Quartal 2012 die Investitionsentscheidung für die Errichtung einer 20.000 t/a  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ -Anlage in Kwinana (Perth, Westaustralien) auf Grundlage der Pegmatitvorkommen in den Greenbushes (ca. 100 km<sup>2</sup>) mit Spodumengehalten bis 50 % fällen. Produktionsbeginn soll 2015 sein (Talison Lithium 2012). Über die Salares Lithium ist Talison auch intensiv im 7-Salares-Projekt (Chile) engagiert (96.600 ha Explorationsfläche), wobei der N1 43-101-Report bereits erstellt wurde. (Die nationale Vorschrift 43-101 beinhaltet die Normen für die Offenlegung von Informationen zu Bergbauprojekten).

Ebenfalls in Australien liegt die von Galaxy Resources betriebene zweitgrößte Spodumen-

mine, die Mt. Cattlin-Mine (Ravensthorpe), in der 137.000 t/a Spodumenkonzentrat produziert werden. Galaxy ist gleichzeitig größter  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ -Produzent mit Spodumen als Ausgangsmaterial in China mit einer Anlage in Jiangsu (17.000 t/a).

## 7.5 Projekte an den Salzseen Nordchiles und Argentiniens

In der Region Antofagasta und der Atacama-Region (Nordchile) sowie der argentinischen Puna mit den Regionen Salta, Catamarca und Jujuy befinden sich eine ganze Reihe von für die Li-Gewinnung interessanter Salare. Einen Überblick über Li-Gehalte und Ausdehnung auf der chilenischen Seite gibt Tabelle 7.8. Die Lage und die Projektbezeichnungen

**Tabelle 7.8** Salzseen in Chile mit Ausdehnung und Li-Konzentrationen. Datenquelle: © Signum Box (2011)

Region	Kategorie	Salar	Li-Konzentration (mg L <sup>-1</sup> )	Grundfläche (km <sup>2</sup> )
Antofagasta	II	Aguas Calientes Centro	0,8–220	134
Atacama	III	Aguas Calientes Norte	123–290	15
Atacama	III	Aguas Calientes Sur	1,8–205	19
Atacama	II	Aguilar	257–337	71
Atacama	I	La Isla	16–1.080	152
Atacama	I	Maricunga	1–1.050	145
Antofagasta	II	Pajonales	9,3–350	104
Atacama	II	Parinas	273–477	40
Atacama	I	Pedernales	130–423	335
Atacama	II	Pujsa	2,7–620	18
Antofagasta	II	Punta Negra	0,5–380	250
Antofagasta	I	Quisquiro	2,5–640	80
Atacama	III	Talar	2,5–280	27
Atacama	II	Tara	85–600	48
Antofagasta		Atacama	150–8.000	3.000

7

mit den beteiligten Firmen sowie Angaben zu den Mg- und Li-Gehalten zeigt Abbildung 7.5. An relativ dicht beieinander liegenden Standorten sind mehrere Firmen involviert. Das 7-Salares-Projekt von Talison Lithium wurde schon erwähnt. Wegen der nach dem Salar de Atacama zweithöchsten Li-Gehalte und relativ niedrigen Mg-Gehalte erscheint das Maricunga-Projekt hochinteressant, an dessen Exploration die Firma Li3 Energy seit 2010 arbeitet und im Februar 2011 die Phase I abgeschlossen hat. Für diesen Salar interessieren sich auch die Firmen Panamericum Lithium und Salares Lithium/Talison. Nach einer Bewertung von Sigmund Box (2011) könnte dies zu einem der erstrangigen Li-Salar-Projekte werden. Die Zahl neuer Li-Gewinnungsprojekte in Chile ist begrenzt, da der chilenische Staat Li bereits in den

1970er-Jahren als strategischen Rohstoff definiert hat und somit die Gewinnung in Staatsregie halten möchte. In Anbetracht der sprunghaft angestiegenen Aktivitäten im Nachbarland Argentinien hat man kürzlich (Juni 2012) eine begrenzte Anzahl von Lizenzen an neue Investoren vergeben. In Argentinien wurde Li durch den Gouverneur der Provinz Jujuy per Dekret vom 2. März 2011 zum strategischen Mineral erklärt, doch die Handhabung scheint nicht so restriktiv zu sein.

Ein bereits realisiertes Projekt in Argentinien liegt am Salar de Rincon, wo im März 2011 die Produktionsstufe erreicht wurde. Der Salar liegt in 3.700 m Höhe und hat eine Ausdehnung von 250 km<sup>2</sup>. Die Höhe begrenzt die Verdunstungsrate auf ca. 3–4 mm/d. Die gewinnbare Menge an Lithium soll 480.000 t Li betragen

Abb. 7.5 Lithiumprojekte an den Salaren Chiles und Argentiniens. Karte übersetzt: © Talison Lithium Limited



(Pavlovic 2004). Daneben sind 9 Mio. t K und 1,3 Mio. t Borsäure (als  $B_2O_3$ ) gewinnbar. Dieses Salarprojekt wurde über einen Zeitraum von mehr als zehn Jahren in wesentlichen Teilen von der australischen Firma Admiralty Resources Ltd. entwickelt, wobei es zwischenzeitlich zum Stillstand kam und 2008 in die Rincon Lithium Ltd. überging.

In Nachbarschaft zu FMC am Salar de Hombre Muerto liegt Sal de Vida, wo Lithium One Inc. (2012; seit Juli 2012 von Galaxy Resources Ltd. übernommen) eine Machbarkeitsstudie positiv abgeschlossen hat. Mit der Annahme einer 25.000 t/a  $Li_2CO_3$ - und einer 107.000 t/a KCl-Anlage mit Kosten von 1.600 US\$/t  $Li_2CO_3$  und 184 US\$/t KCl sollten die Investitionen bereits nach vier Jahren zurückbezahlt sein (Marketed 2011).

An der Exploration am Salar de Olaroz/ Cauchari sind besonders die australische Firma Orocobre Ltd. (Orocobre 2011) und Lithium Americas Ltd. aktiv. Orocobre schloss im Januar 2010 eine Partnerschaft mit Toyota. Letztere will die gesamte geplante Produktion von 15.000 t/a  $Li_2CO_3$  aufkaufen. In das Projekt sollen ca. 200 Mio. US\$ an Investitionen fließen, die sich bei Produktionskosten von 1.600 US\$/t  $Li_2CO_3$  mit einem angenommenen Preis von 6.160 US\$/t  $Li_2CO_3$  schon in drei Jahren amortisieren sollen. Lithium Americas Corp. mit Mitsubishi Corp. und Magna International

als Aktionäre und Abnehmer des Li-Karbonats betreiben seit 2011 eine kleine Pilotanlage. Ab 2013/14 soll die industrielle Produktion mit 20.000 t/a  $Li_2CO_3$  mit 99,5 % Reinheit beginnen und bis 2018 auf 40.000 t/a angehoben werden (Focus-Money-Magazin 2012). Die Produktionskosten wurden mit 1.300 US\$/t  $Li_2CO_3$  angegeben; ohne Verrechnung des ebenfalls zu produzierenden KCl würden es ca. 1.900 US\$/t. Die Investitionen belaufen sich auf 314 Mio. US\$ (Mining Markets 2012).

Seit März 2010 betreibt die Firma am Salinas Grandes (Argentinien, 40 km<sup>2</sup> Fläche) ein weiteres Li-Projekt. Die Lösungszusammensetzungen sind mit Li-Gehalten um 1 g L<sup>-1</sup> und einem Mg-Verhältnis von 3:1 sehr günstig (Mining Markets 2012).

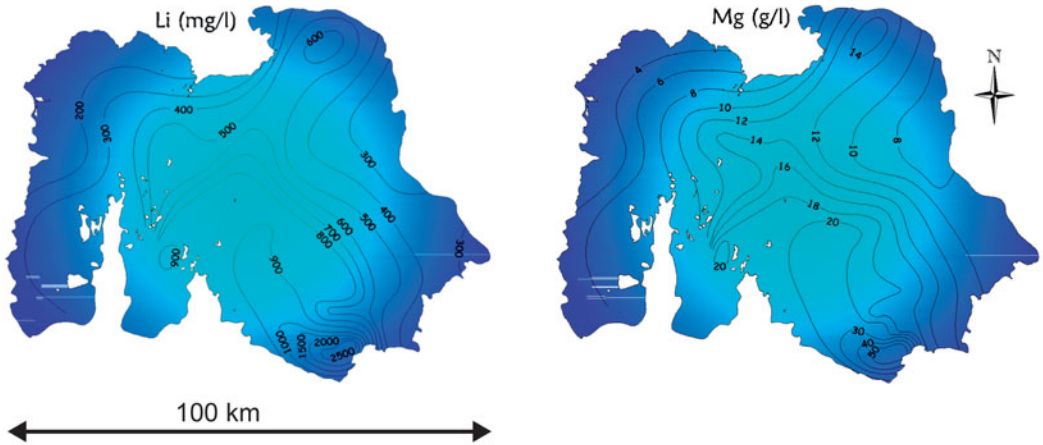
## 7.6 Bolivien

Die bei Weitem größte Li-Ressource bildet der Salar de Uyuni in Bolivien – ein in ca. 3.600 m Höhe liegender ausgetrockneter Salzsee von 100 x 100 km<sup>2</sup> Ausdehnung; der größte Salzsee der Erde. Seine zwischen den Kristallen der Salzkruste befindliche Salzlösung (Abb. 7.6) enthält zwischen 0,4 und 2,0 g/L Li<sup>+</sup> und etwa das 6–18-Fache an Magnesium (Abb. 7.7).



**Abb. 7.6** Glatte Salzoberfläche des Salar de Uyuni und ca. 40 cm tiefe Grube mit Salarsalzlösung. Fotos: © Wolfgang Voigt

7



**Abb. 7.7** Isokonzentrationslinien für Lithium (mg/L) und Magnesium (g/L) im Salar de Uyuni. Quelle: Ballivián (2010)

Im Gegensatz zu den meisten der anderen ausgetrockneten Salzseen bildet der Salar de Uyuni eine glatte, weiß glänzende Oberfläche, die jeden Betrachter erstaunen lässt und somit eine touristische Attraktion darstellt. Fast noch interessanter stellt sich der See nach der Überschwemmung mit Wasser in der Regenzeit zwischen Dezember und April dar, wenn Wolken und Wasser am Horizont glänzend ineinander übergehen (Abb. 7.8). Die möglichst geringe Beeinflussung dieses faszinierenden Naturwunders und die jährliche Regenperiode stellen wesentliche, erschwerende Randbedingungen für die Li-Gewinnung aus diesem Salar dar.

Die bisher genannten Zahlen bezüglich der Li-Mengen im Salar de Uyuni scheinen die tatsächlichen um Größenordnungen zu unterschätzen. Diese Unsicherheiten resultieren aus der Tatsache, dass in diesem Salar nur eine einzige geologisch-mineralogisch ausgewertete Tiefbohrung vorliegt. Nach diesem Ergebnis wären die Reserven sehr viel höher, als bisher angenommen (Tabelle 7.9).

Für eine nachhaltige Nutzung dieser gewaltigen Ressource muss Bolivien jedoch eine ganze Reihe objektiver, d. h. mit der regionalen Lage des Salares, der ungünstigeren Lösungs-

zusammensetzung und klimatisch (Regenzeit) bedingte Schwierigkeiten überwinden. Interessenskonflikte zwischen den unterschiedlichen regionalen indigenen Gruppierungen untereinander und zur Zentralgewalt in La Paz bilden die subjektiven und gegenwärtig weit gewichtigeren Herausforderungen. Aus der historischen Bewertung der Ausbeutung des rohstoffreichen Landes Bolivien wurde für Li der Schluss gezogen, die Erschließung und Nutzung ohne ausländische Hilfe



**Abb. 7.8** Salar de Uyuni (Südteil) nach der Regenzeit. Foto: © Wolfgang Voigt

**Tabelle 7.9a–b** (a) Mengen und Volumina des Salar de Uyuni und in der Nähe der Mündung des Río Grande de López; (b) Ressourcen (Elementkonzentrationen und -mengen) der Salzlösungen des Salar de Uyuni und im Bereich des Río Grande. Quelle: übersetzt nach © Ballivián (2010)

a	Salar de Uyuni <sup>1</sup>			Río Grande <sup>2</sup>	
	Daten 1981	Daten 1998	Fehler	Daten	Fehler
Oberfläche	10.000 km <sup>2</sup>	10.000 km <sup>2</sup>		276 km <sup>2</sup>	
durchschnittliche Dicke	4,7 m	70 m		2,5 m	
Volumen	470 × 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	7.000 × 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>		690 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3*</sup>	
Porosität	35%	20%	±5%	25%	±5%
Salzvolumen	305,5 × 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	5.600 × 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	±2 × 10 <sup>9</sup>	450 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	±60 × 10 <sup>6</sup>
Salztonnage	649,7 × 10 <sup>9</sup> t	11.928 × 10 <sup>9</sup> t	±5 × 10 <sup>9</sup>		
Volumen der Salzlösungen	164,5 × 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	1.400 × 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	±2,5 × 10 <sup>9</sup>	240,5 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	±40 × 10 <sup>6</sup>
Salz in Salzlösungen	5 × 10 <sup>9</sup> t	5 × 10 <sup>9</sup> t	±0,7 × 10 <sup>9</sup>		
gesamte Salzmenge	654,7 × 10 <sup>9</sup> t	11.933 × 10 <sup>9</sup> t	±4 × 10 <sup>9</sup>		

b	Salar de Uyuni <sup>1</sup>			Río Grande <sup>3</sup>	
	mittlere Konzentration (mg L <sup>-1</sup> )	Menge 1981 (Mio t)	Menge 1998 (Mio t)	Konzentration (mg L <sup>-1</sup> )	Menge (t)
Cl	191.000	3.140	57.213,7	200.000	48.000.000
SO <sub>4</sub>	16.900	278	5.067	30.000	7.200.000
B	466	7,7	140,3	1.500	360.000
Na	97.300	1.600	29.162,7	50.000	12.000.000
K	11.800	194	3.535,9	20.000	4.800.000
Li	542	<b>8,9</b>	<b>146</b>	<b>1.800</b>	<b>430.000</b>
Ca	468	7,7	140,3	150	36.000
Mg	12.800	211	3.845,8	40.000	9.600.000

<sup>1</sup> Salzsee Salar de Uyuni, Südwesten Boliviens. Daten nach Ballivián u. Risacher (1981)  
<sup>2</sup> In der Nähe der Mündung des Río Grande de López am Salar de Uyuni. Daten nach Ballivián u. Risacher (1981)  
<sup>3</sup> Im Bereich Río Grande de López  
\* Gesamtvolumen

selbst zu bewerkstelligen. Damit ist die bolivianische Bergbaubehörde COMIBOL bzw. deren Unterabteilung GNREB seit dem Jahre 2008 beauftragt. Letztere ist mit dieser Aufgabe völlig überfordert; sie hat bereits etwa 20 Mio. US\$ an Mitteln verbraucht und dabei kaum mehr als ein größeres Labor und einige kleinere Eindunstungsbecken aufgebaut. Ein planmäßi-

ges Vorgehen ist nicht zu erkennen und wird von der bolivianischen technischen Intelligenz (Carvajal 2012; Zuleta Calderón 2001) kritisiert, ohne zu Konsequenzen zu führen. Auf universitärer Ebene hat die TU Bergakademie Freiberg mit der dem Salar am nächsten gelegenen Universität in Potosí in der Zeit zwischen 2009–2010 erste Lösungen erarbeitet, wie eine



7 nachhaltige Li-Gewinnung an diesem Salar unter Einbeziehung der örtlichen Bevölkerung aussehen könnte (Abb. 7.9; Voigt et al. 2010 a, b). Leider sind die regionalen Einrichtungen zu schwach, um dies umzusetzen, und in La Paz hat man eigene Pläne. Unter diesen objektiven und subjektiven Randbedingungen muss davon ausgegangen werden, dass in Bolivien in den nächsten 15 Jahren keine erheblichen Mengen an Li-Karbonat produziert werden.

Direkt an den Salar de Uyuni grenzt der Salar de Coipasa, der immerhin noch ein Drittel der Größe des Salar de Uyuni aufweist. Hier haben die Salzlösungen Li-Gehalte zwischen 0,2 bis 0,5 g/L, was immer noch wirtschaftlich verwertbar wäre, abgesehen von den zusätzlich besonders hohen K-Gehalten. Eine weitere bolivianische Li-Quelle stellt der Pastos Grandes mit sehr hohem Li- und niedrigem Mg-Gehalt dar (Abb. 7.10). Die Exploration wurde hier bisher von der kanadischen Firma New World vorgenommen und liegt jetzt in den Händen von Li3 Energy.



Zusammensetzung der Sole (g L<sup>-1</sup>)

Li	K	B	Ca	Na	Mg
1,6	14,0	0,9	3,1	101	3,5

Abb. 7.10 Blick auf Pastos Grandes (oben) mit Angaben zur Sole-Zusammensetzung (unten); es findet z.Zt. nur ein einfacher Ulexitabbau (Borat) statt. Größe: 120 km<sup>2</sup>

## 7.7 Salzseen in China

Die Volksrepublik China verfügt im Gebiet des Qinghaibeckens und in Tibet auch über einige Salzseen mit erheblichen Li-Gehalten. Die bekanntesten sind die Salzseen Qarhan oder Chaerhan (die Schreibweisen unterscheiden sich je nach gewählter Sprache; chinesisch, mongolisch bzw. Version der Transliteration), der West- und Ost-Taijinaier-Salzsee und der Zabuye Salzsee. Ein neues Projekt ist am noch etwas nördlicher gelegenen trockenen Yiliping-Salzsee angesiedelt, an dem der Autor zusammen mit China Qinghai Minmetals Resources Ltd. ein Verfahren zur Li-Karbonatgewinnung entwickelt (Abb. 7.11). Die drei erstgenannten Seen befinden sich auf einer Höhe von 2.700 m, während der Zabuye See (Drangyer Tsaka) auf ca. 5.000 m Höhe liegt. Letzterer enthält als einziger See weltweit direkt gelöstes Li-Karbonat (Tabelle 7.10). Dieser Vorteil wird allerdings durch die besonders drastischen Bedingungen in der Höhe wieder teilweise zunichte gemacht.

Der Chaerhan-See ist mit ca. 160 x 40 km Ausdehnung der größte. Die bis 20 m mächtige



Abb. 7.9 Eindampfkugel im Salar de Uyuni (oben) und Erläuterung der Funktionsweise vor regionaler Bevölkerung (unten), hier anhand der solaren Stromversorgung der Pumpen, die die Lösung auf die Spitze der Kegel transportieren



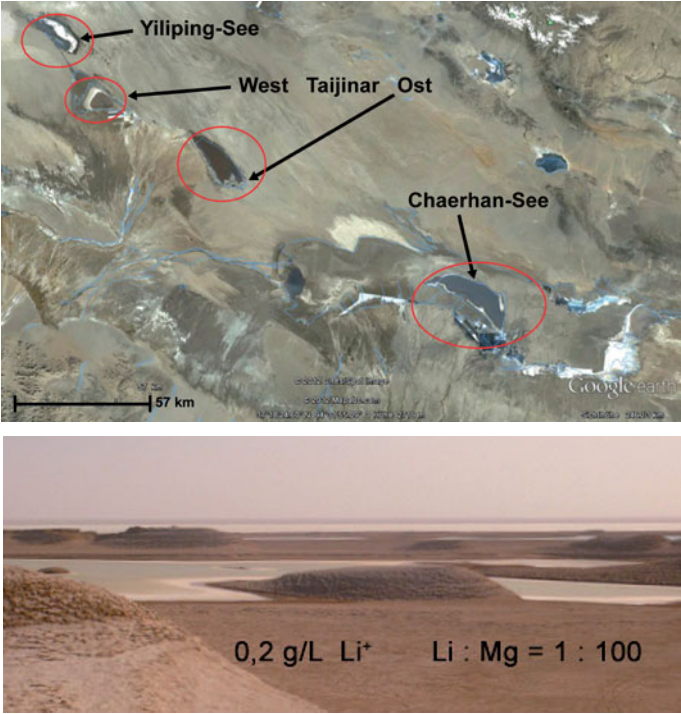


Abb. 7.11 Lage der Salzseen für die Lithiumgewinnung im Qinghaibecken Chinas (oben) und Blick auf den Yiliping-Salzsee (unten) März 2012. Karte: Google Earth © 2012 Cnes/Spot Image und © 2012 Mapabc.com

Salzkruste wurde mit ca. 3.000 km künstlichen, mehrere Meter tiefen Kanälen durchzogen. Hier wird die Salzlösung gesammelt und in ein riesiges Becken gepumpt, in dem bei solarer Eindunstung Kalisalze abgeschieden werden. Dies erlaubt eine Produktion von ca. 1 Mio.t Kali pro Jahr. Die Restlösung enthält dann noch Lithium, für dessen Gewinnung eine Anlage mit einer Kapazität von 10.000 t/a  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  errichtet wurde (CITIC, China International Trust and Investment Corp.).

Zwei weitere Anlagen (CITIC GuoAn und Qinghai Lithium Industry) befinden sich am Taijinaier-See; eine arbeitet nach dem Prinzip der

thermischen Hydrolyse von  $\text{MgCl}_2$  (große Umweltprobleme mit den  $\text{HCl}$ -Dämpfen, die nur unzureichend gewaschen werden) mit anschließender Auslaugung des  $\text{LiCl}$  und die andere nach einem Membranverfahren. Letzteres wurde am Qinghai-Forschungsinstitut für Salzseen der Akademie der Wissenschaften Chinas entwickelt. Die Kapazitäten werden mit in Summe 15.000 t  $\text{a}^{-1}$  angegeben, doch bei einem Besuch im März 2012 wurde dem Autor berichtet, dass beide Anlagen nicht produzieren. Die nächstgelegene Stadt ist Golmud, ansonsten ist das Gebiet kaum besiedelt.

Zusammensetzung des Salzsees (g L <sup>-1</sup> )						
Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Li <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
129,6	40,9	1,05	156	38,6	11,0	44,2

Tabelle 7.10 Die Hauptkomponenten der Lösungen des Zabuye-Salzsees

## 7

## 7.8 Kanada

In Kanada gibt es eine Reihe von Li-Projekten. So betreibt eine junge kanadische Gesellschaft, die Rock Tech Lithium Inc. (RTL), am Georgia Lake (im nordwestlichen Ontario bei Thunder Bay) ein Projekt. Es basiert auf einer Spodumenlagerstätte, dessen NI 43-101-Report im Juni 2011 abgeschlossen wurde und für das mit dem 3. Quartal 2014 Produktionsbeginn avisiert wird. Die Lagerstätte wurde bereits in den 1950er-Jahren erkundet, und die Vorräte werden auf 9,8 Mio. t mit durchschnittlich 1,2 %  $\text{Li}_2\text{O}$  geschätzt. Das ergibt umgerechnet etwa 40.000 t Li; in der gleichen Größenordnung der Zinnwaldit-Lagerstätte im Erzgebirge, Deutschland.

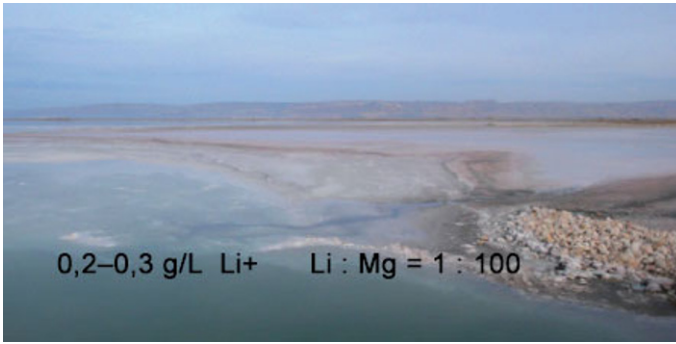
Ein noch relativ in den Anfängen stekendes Projekt wurde von Rock Tech Lithium bei James Bay im NW der Region Quebec begonnen (Kapiwak-Projekt; Berry 2011). An dieser ebenfalls auf Pegmatiten basierenden Lagerstätte sind eine Reihe weiterer Explorationsfirmen an Li-Projekten tätig: Lithium One, Canada Lithium, Dios Exploration/Sirios Resources, Nemaska, und Critical Elements Corp. (früher First Gold; Berry 2011).

Rock Tech Lithium hat darüber hinaus noch das Lacorne-Projekt in der Region Quebec (Pegmatite), in der weitere Firmen wie Vallee Lithium, Valor Lithium, Duval Lithium, Lacorne Lithium und International Lithium explorieren. Quebec Lithium/Canada Lithium scheinen hier am weitesten fortgeschritten zu sein; Machbarkeitsstudien und Umweltverträglichkeitsprüfungen wurden 2011 abgeschlossen. Man geht von einem Tagebau bis ca. 150 m Tiefe aus, wobei täglich bis zu 2.950 t Gestein gefördert und ab 2013 20.000 t/a  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  produziert werden sollen. Canada Lithium wäre damit der erste  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ -Produzent in Canada (Niles 2012).

## 7.9 Europa und Türkei

Direkt vor den Toren Europas in Zentralanatolien (Türkei) befindet sich der Tuz Gölü, ein ca. 60 km langer und ca. 15 km breiter Salzsee, der im Sommer teilweise austrocknet (besonders in seinem Nordteil; Abb. 7.12). An der Oberfläche enthalten die Lösungen bis 0,3 g/L  $\text{Li}^+$  (Analysen Institut für Anorganische Chemie, Institut für Geologie der TU Bergakademie Freiberg). Im Gegensatz zu den Salzseen in Südamerika und China beträgt die Höhe hier nur 900 m, und die verkehrstechnische Anbindung ist wesentlich besser ausgebaut. Gegenwärtig wird dort nur von drei kleinen einheimischen Firmen Salz ( $\text{NaCl}$ , Streusalz) gewonnen. Nach Anfragen einer der Firmen (Koyuncu AS, Konya) haben wir die Lösungen während der Eindunstung und  $\text{NaCl}$ -Gewinnung chemisch analysiert. Nach unseren Erfahrungen im Salar de Uyuni vermuteten wir auch hier in der Salzkruste Lösungen. In Zusammenarbeit mit der Koyuncu AS wurden von uns Bohrungen im Nordteil des Sees vorgenommen. Die Bohrungen bis etwa 15 m Tiefe bestätigten das Vorliegen frei strömender Lösungen in den Krustenhohlräumen mit Li-Gehalten von 0,2 bis knapp 0,3 g/L  $\text{Li}^+$ , allerdings auch einen 100fachen Mg-Anteil; vergleichbar mit den Salzseen im Qinghaibekken in China.

Auch Europa verfügt über Li-Quellen, die von den Mengen eine Eigenversorgung erlaubten. In Länntä (Westfinnland) gibt es ein Spodumenvorkommen mit einem Gehalt von 1 %  $\text{Li}_2\text{O}$  und einem Vorrat von 1,3 Mio. t. Für die Gewinnung der in geringer Tiefe (bis max. 85 m) gelegenen Spodumenlinsen wird ein Tagebau von etwas mehr als 300 m Länge ins Auge gefasst (Lovén u. Meriläinen 2011). Nach weiteren Erkundungsbohrungen bis Juli 2012 wurden neue Spodumenstrukturen gefunden, die auf eine größere Rohstoffbasis hoffen lassen als oben angegeben (Nordic Mining ASA 2012; Abb. 7.13).



**Abb. 7.12** Lage des Tuz Gölü und Blick auf den Nordteil des Sees. Karte: Google Earth  
© Basarsoft und  
© 2012 Cnes/Spot Image  
Foto: © Wolfgang Voigt

0,2–0,3 g/L  $\text{Li}^+$      $\text{Li} : \text{Mg} = 1 : 100$



**Abb. 7.13** Spodumenlinse bei Lantä (Finnland).  
Foto: © Nordic Mining ASA, <http://www.keliber.no>

Bei Bohrungen nach Boraten in Serbien stieß man 2004 auf ein neues, Li-haltiges Boratmineral,  $\text{LiNaB}_3\text{SiO}_7(\text{OH})$ ; benannt nach der in der Nähe liegenden Stadt Jadarit (Stanley et al. 2007).

Das Vorkommen umfasst einen Vorrat von 115 Mio. t mit 1,8 %  $\text{Li}_2\text{O}$  und 13,1 %  $\text{B}_2\text{O}_3$  (Boroxid) und liegt in Tiefen zwischen 200 und 600 m. Wie der Bergbaukonzern Rio Tinto mitteilt, ist er in der Abschlussphase der Machbarkeitsstudie und peilt eine Produktion ab 2016 an.

Ein weiteres bekanntes Spodumenvorkommen findet sich in der Koralpe im Gebiet zwischen der Steiermark und Kärnten, Österreich. Hier sind 10 Mio. t Gestein mit einem Gehalt von 1,6 %  $\text{Li}_2\text{O}$  nachgewiesen, und weitere 10 Mio. t werden vermutet. Das

7

Vorkommen wurde schon früher gut untersucht (Der Standard 2011).

Die Abbaurechte wurden an den australischen Bergbaukonzern East Coast Minerals (ECM) und an Exchange Minerals Limited (EML) mit Sitz in Dubai verkauft. Man will etappenweise eine Produktion aufbauen und dabei den größten Teil der Aufbereitung direkt unter Tage bewältigen. In der von Weinanbau und Tourismus geprägten Gegend war es den Firmen wichtig zu erklären, dass im Raum Wolfsberg eine Fabrik zur Li-Extraktion geplant wird, wobei der Prozess ohne gefährliche Chemikalien auskommen soll. Details des Prozesses wurden nicht genannt (Wirtschaftsblatt 2011). Eine ausführliche Beschreibung des Mineralbestandes der Koralpe geben Niedermayr u. Göd (1992).

## 7.10 Einheimisches Lithium

Im Jahr 1923 begann in der Hans-Heinrich-Hütte der Metallgesellschaft in Langelsheim (Harz; später Chemetall jetzt Rockwood Lithium) die Produktion des ersten technischen Li-Karbonats und von Li-Metall. Ausgangsstoff war der in Zinnwald (Erzgebirge) geförderte Zinnwaldit, ein Lithium-Eisen-Glimmer der ungefähren Zusammensetzung  $K_2Li_{3-1}Fe_{1-3}(Al,Fe)_2\{Al_{1-3}Si_{7-5}O_{20}\}F_4$ , der mit Sn- und W-haltigen Gesteinen vergesellschaftet vorkommt. Zinnwaldit verlor bald für die Li-Gewinnung seine Bedeutung. Mit dem zu erwartenden rasant steigenden Li-Bedarf rückten die Zinnwalditvorkommen wieder in den Blickpunkt des Interesses; auch die Abraumhalden der Sn-Gewinnung auf böhmischer Seite, die erhebliche Li-Gehalte aufweisen sollen. Mit geschätzten Vorräten von 40.000 t Li im Gebiet von Zinnwald und noch einmal 112.000 t Li auf der böhmischen Seite des Erzgebirges ist dies ein durchaus größeres Vorkommen (entspricht 5 Jahre der gegenwärtigen Weltproduktion), das derzeit im Hinblick auf die Gewinnung und Herstellung von Li-Karbo-

nat durch die Firma Solicium GmbH, eine Tochter der SolarWorld AG, untersucht wird. Durch den Fe-Gehalt des Zinnwaldits lässt er sich durch Magnetscheidung relativ leicht von den Nebengesteinen abtrennen. Allerdings sehen die bisher erprobten Technologien zur Li-Freisetzung aus dem Mineral ebenfalls wie beim Spodumen eine Hochtemperaturbehandlung (800–900 °C) entweder mit Gips, Alkalisulfaten oder Kalk vor (Jandová et al. 2008, 2009, 2010). Anschließend kann man das Lithium mit Wasser oder verdünnter Säure auslaugen. Kritisch sind dabei die maximalen Li-Konzentrationen, die beim Auslaugen zu erzielen sind. Sie sollten, um Eindampfschritte zu vermeiden, oberhalb von  $2 \text{ g L}^{-1} \text{ Li}^+$  liegen, was nicht einfach zu erreichen ist.

An der TU Bergakademie Freiberg forschen mehrere Institute an der Weiterentwicklung der Zinnwalditaufarbeitung, um den Energieeinsatz zu reduzieren. Dabei wird die gesamte Prozesskette erfasst, von der Erkundung über den selektiven Bergbau, die mechanischen Trennverfahren, die chemische Prozessierung bis zum Li-Karbonat und das Einbeziehen von Stoffströmen aus dem Batterierecycling (Lithium-Initiative Freiberg 2009).

## 7.11 Zusammenfassung

Nach anfänglichen Warnungen einer angeblich nicht ausreichenden Rohstoffbasis für den breiten Ausbau der Elektromobilität auf Basis von Li-Ionenakkus ist aus den zahlreichen neuen Erkundungen bekannter und neuer Vorkommen deutlich geworden, dass es diesen Engpass nicht geben wird. Die Produktion von Li-Karbonat wird sich in den nächsten Jahren vervielfachen, teils durch Kapazitätsausbau bei den etablierten Marktführern wie Rockwood Lithium, Talison oder FMC, teils durch neue Firmen wie Quebec Lithium, Qinghai Minmetals Resources oder Solicium. Bedeutende, neue Kapazitäten mit Anlagengrößen von jeweils zwischen 10.000 bis



20.000 t/a sollen schon ab 2013 Li-Karbonat in Batteriequalität produzieren. Die genaue Preisentwicklung wird von der Balance zwischen der Li-Karbonatproduktion und der Batterieproduktion abhängen, dürfte aber in der Größenordnung von 6.000 US\$/t  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  bleiben. Letzteres ermöglicht es, praktisch alle im Artikel benannten Li-Rohstoffquellen wirtschaftlich zu erschließen. Wenn auch die Ressourcen in den südamerikanischen Salzseen am größten sind und die geringsten Produktionskosten verursachen, so sind die Vorkommen doch weltweit so verteilt, dass praktisch politische Abhängigkeiten vermieden werden können, wenn entsprechende Versorge bei der Erschließung und Technologieentwicklung getroffen wird. Dies betrifft in erster Linie auch eine angewandte Grundlagenforschung zur Chemie der Li-Mineralien und Li-Salze, denn die Kenntnisse zum Löse- und Aufschlussverhalten dieser Minerale und Salze sind sehr unvollständig und entstammen entweder aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts oder einigen neueren auf Chinesisch verfassten Schriften (Song 2012).

## Quellenverzeichnis

- Ballivián O (2010) Salar de Uyuni: Technical, economic aspects and development prospects. Abstracts Freiburger Forschungsforum, 9.–11. Juni 2010, Freiberg, TU Bergakademie Freiberg
- Ballivián O, Risacher F (1981) Los Salares Del Altiplano Boliviano, O. R. S. T. O. M., Paris
- Berry C (2011) Rock Tech Lithium research report. 30. März 2011, House Mountain Partners, LLC, New York. <http://house-mountain.com/wp-content/uploads/2011/04/Rock-Tech-Lithium-Report.pdf>. Letzter Zugriff 30.05.2013
- Canada Lithium Corp. (2010) Lithium driving our growth. Presentation Februar 2010. <http://www.canadalithium.com/i/pdf/CorpPres-Feb.pdf>. Letzter Zugriff 25.06.2013
- Carvajal R (2012) Gobierno no precisa participación de Bolivia en innovadora patente del litio. Datum: 08-05-2012. <http://www.rebelion.org>. Letzter Zugriff 28.05.2013
- Der Standard (2011) Australier wollen auf der Koralpe Lithium abbauen. 11. Februar 2011, 13:11 Uhr. <http://derstandard.at/>. Letzter Zugriff 28.05.2013
- Eder SW (2012) Lithium-Ionen-Speicher sollen Stromversorgung stabilisieren. VDI-Nachrichten. 20.1.2012. <http://www.ingenieur.de/Themen/Energiespeicher/Lithium-Ionen-Speicher-Stromversorgung-stabilisieren>. Letzter Zugriff 25.06.2013
- Focus-Money Magazin (2012) Lithium Americas: Neuer Stern am Lithium-Himmel, Focus-Online, 28.03.2012, Ausgabe Nr. 14. [http://www.focus.de/finanzen/boerse/lithium-americas-neuer-stern-am-lithium-himmel\\_aid\\_728812.html](http://www.focus.de/finanzen/boerse/lithium-americas-neuer-stern-am-lithium-himmel_aid_728812.html). Letzter Zugriff 28.05.2013
- Garrett DE (2004) Handbook of lithium and natural calcium chloride, Elsevier Academic Press, Amsterdam, Boston, Heidelberg
- Jandová J, Dvorák P, Vu HN (2010) Processing of zinnwaldite waste to obtain  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . Hydrometallurgy 103, 1–4: 12–18
- Jandová J, Vu HN, Belková T, Dvorák P (2008) Utilization of zinnwaldite wastes for recovery of lithium and rubidium compounds. Chemické Listy 102, 6: 447–452
- Jandová J, Vu HN, Belková T, Dvorák P, Kondás J (2009) Obtaining  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  from zinnwaldite wastes. Ceramics – Silikáty 53, 2: 108–112
- Lithium One Inc. (2012) Defining a future low-cost lithium & potash producer. 25. Januar 2012. [http://www.theenergyreport.com/cs/new/download/co\\_file/2723/LithiumOneCorporate-web012512.pdf](http://www.theenergyreport.com/cs/new/download/co_file/2723/LithiumOneCorporate-web012512.pdf). Letzter Zugriff 26.06.2013
- Lithium-Initiative Freiberg (2009) Lithium-Zentrum der Technische Universität Bergakademie Freiberg. <http://lithium.tu-freiberg.de/> Letzter Zugriff 30.05.2013
- Lovén P, Meriläinen M (2011) Mineral resource and ore reserve estimates of Långgruvan and Outokumpu lithium deposits. Outotec Pre-feasibility Report, 8. Dezember 2011 für Keliber Nordic Mining Group

- Marketwired (2011) Lithium One announces positive preliminary economic assessment for the Sal De Vida Lithium and Potash Project, Argentina. 5 October 2011. <http://www.marketwire.com>. Letzter Zugriff 25.06.2013
- Mining Markets (2012) Lithium Americas delivers robust feasibility. Daily News 19. Juni 2012, The Northern Miner, Business Information Group. <http://www.miningmarkets.ca/news/lithium-americas-delivers-robust-feasibility/1001475196>
- Niedermayr G, Göd R (1992) Das Spodumen-vorkommen auf der Weinebene und seine Mineralien. In: Carinthia II, 182, 102: 21–35 Klagenfurt
- Niles T (2012) Canada Lithium will be Canada's sole producer by 2013. Press Release Summaries. 19. März 2012. <http://resourceclips.com/2012/03/19/just-as-the-name-has-it/>. Letzter Zugriff 28.05.2013
- Nordic Mining ASA (2012) Indication of new lithium structure south-west of Keliber's Lanttä deposit. 26. Juni 2012. <http://www.newsweb.no/newsweb/search.do?messageId=308419>. Letzter Zugriff 28.06.2013
- Orocobre (2011) Orocobre receives positive results for definitive feasibility study for flagship Salar de Olaroz Lithium-Potash Project, 4. Mai 2011. Orocobre Ltd. [http://www.orocobre.com.au/PDF/4May2011\\_DFS%20Results.pdf](http://www.orocobre.com.au/PDF/4May2011_DFS%20Results.pdf). Letzter Zugriff 27.05.2013
- Pavlovic P (2004) Final Report prepared for Admiralty Resources NL and Argentina Diamonds Ltd. by Pedro
- Roskill (2009) The economics of lithium. 11. Aufl.: 324 S. London, UK, Roskill Information Services Ltd.
- Signum Box (2011) Salar de Maricunga: Project review, Executive summary. <http://www.signumbox.com>
- Song P (2012) Solubility phenomena study concerning brines in China, ISSP 2012, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, P.R. China 23.–27. Juli 2012, wird in Kürze in Pure & Appl. Chem. erscheinen
- Stanley CJ, Jones GC, Rumsey MS, Blake C, Roberts AC, Sterling JAR, Carpenter GJC, Whitfield PS, Grice JD, Lepage Y (2007) Jadarite,  $\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$ , a new mineral species from the Jadar Basin, Serbia. Eur. J. Mineral. 19: 575–580
- Talison Lithium (2012) Investor Presentation Juni 2012, <http://www.talisonlithium.com/projects/greenbushes>.
- USGS (2009) Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey, January 2009, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2009-lithi.pdf>. Letzter Zugriff 27.05.2013
- USGS (2012) Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey, January 2012, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2012-lithi.pdf>. Letzter Zugriff 27.05.2013
- Voigt W, Heide G, Schmitt J, Beltz C, Hertam A, Jimenez CJT, Morales HR, Morales GM, Terceros LF (2010a) Anmelder: Technische Universität Bergakademie Freiberg, 09599 (DE) und Universidad Autónoma Tomas Frias (Potosí, BO), Patent: WO 2010/086375 A1. Verfahren und Vorrichtung zur solaren Eindampfung von Salzlösungen
- Voigt W, Jimenez CJT, Morales HR, Terceros LF (2010b) Anmelder: Technische Universität Bergakademie Freiberg, 09599 (DE) und Universidad Autónoma Tomas Frias (Potosí, BO), Patent: DE102010019554. Verfahren zur Abreicherung von Magnesium und Anreicherung von Lithium in chloridisch geprägten Salzlösungen
- Wirtschaftsblatt (2011) Rechte für Lithium-Abbau auf Koralpe verkauft. APA, 31.05.2011. <http://wirtschaftsblatt.at/home/nachrichten/oesterreich/1200347/index>. Letzter Zugriff 25.06.2013
- Zuleta Calderón JC (2001) Análisis y dudas sobre la política de lito Boliviana: Habrá golpe de timón? Datum 01-04-2011. <http://plataformaenergetica.org/content/2747>. Letzter Zugriff 28.05.2013



## Kernaussagen

- Die beiden wichtigsten Quellen für Lithium sind Salzseen und Silikatminerale in Form von Spodumen.
- Bolivien hat die weitaus größten Reserven, die aber erst langsam erschlossen werden können.
- Die Rohstoffbasis stellt keine Grenze für den steigenden Bedarf an Lithium dar. Sie ist zugleich breit über alle Kontinente verteilt.
- Geopolitische Abhängigkeiten können vermieden werden, wenn Vorsorge bei der Erschließung und Technologieentwicklung getroffen wird. Dies betrifft auch insbesondere die angewandte Grundlagenforschung zur Chemie der Löse- und Kristallisationsprozesse der Lithiumminerale.

# 8 Der globale Markt der Seltenen Erden – Ein Balanceakt

Dudley J. Kingsnorth

## 8.1 Die Seltenen Erden

Der Begriff „Seltene Erden“, auch „Seltenerd-elemente“ (SEE), bezieht sich auf eine Reihe von 17 chemisch ähnlichen Metallen. Davon sind 15 als Lanthaniden bekannt, die zwei weiteren sind Yttrium (Y) und Scandium (Sc). Diese Seltenerdmetalle und deren Oxide sind wegen ihrer einzigartigen magnetischen, chemischen und spektroskopischen Eigenschaften

von besonderem Interesse für Wissenschaft und Wirtschaft. Innerhalb der Industrie werden die Seltenen Erden meist als Seltenerdoxide (SEO) bezeichnet und in drei Gruppen untergliedert: leichte, mittlere und schwere Seltene Erden. Im englischen Sprachraum werden die leichten und schweren SEO manchmal auch gemeinsam als „Cerics“ und die schweren SEO als „Yttrics“ angesprochen. Tabelle 8.1 führt alle Seltenen Erden mit ihren Atomgewichten und Symbolen auf.

Element	Typ	Ordnungszahl	Symbol	Atomgewichte
Lanthan	leichte oder 'Ceric'	57	La	138,92
Cer		58	Ce	140,13
Praseodym		59	Pr	140,92
Neodym		60	Nd	144,27
Promethium*	mittlere	61	Pm	145,00
Samarium		62	Sm	150,43
Europium		63	Eu	152,00
Gadolinium		64	Gd	156,90
Terbium	schwere oder 'Yttric'	65	Tb	159,20
Dysprosium		66	Dy	162,46
Holmium		67	Ho	163,50
Erbium		68	Er	167,20
Thulium		69	Tm	169,40
Ytterbium		70	Yb	173,04
Lutetium		71	Lu	174,99
Yttrium		39	Y	88,92
Scandium		21	Sc	45,10

**Tabelle 8.1** Die Elemente der Seltenen Erden: Atomgewichte und Symbole.

\* Promethium kommt nicht natürlich als stabiles Isotop vor, kann jedoch künstlich hergestellt werden

## 8

Seltene Erden sind derzeit ein kritischer und begrenzender Zuschlagstoff bei vielen High-tech-Materialien, wie sie derzeit für die Herstellung von Hybridfahrzeugen, Mobiltelefonen, Computern, Bildschirmen sowie energieeffizienten Leuchtmitteln unabdingbar sind. Obwohl die SEE einen relativ hohen Preis pro Gewichtseinheit haben, spielen diese Kosten bei den meisten Anwendungen nur eine untergeordnete Rolle im Hinblick auf den Verkaufspreis des fertigen Produktes. Da die Konzentrationen in den Produkten so gering sind, werden die SEE in der Regel nicht wiederverwendet (rezykliert). Auch deshalb bezeichnet man SEE als kritische Materialien. In Japan werden sie oft als „Keime der Hochtechnologie“ bezeichnet. Einige der wesentlichen SEE-Anwendungen sind in Tabelle 8.2 zusammengefasst. Die Nutzung von SEE in Hybridfahrzeugen (mit etwa 10–15 kg pro Fahrzeug) ist die Anwendung mit der derzeit größten öffentlichen Aufmerksamkeit.

## Abhängigkeit von China

Das Aussetzen von Seltenerdexporten von China nach Japan im September 2010, um einen Territorialkonflikt über die Senkaku-Inseln zu beeinflussen, hat Chinas Rolle in seiner Verpflichtung zum SEE-Export ernsthaft infrage gestellt. Gekoppelt an diesen wesentlichen Rückgang der chinesischen Exporte drängt nun der Rest der Welt darauf, unabhängig von der chinesischen SEE-Versorgung zu werden.

Die Entwicklungen bei den Lagerstätten Mount Weld, Australien und Mountain Pass, USA (Abb. 8.1) innerhalb der letzten Monate, sowie die Ausweitung existierender Kapazitäten in anderen Lagerstätten zeigen, dass der Rest der Welt bis zum Jahr 2016 90% des globalen Marktes für leichte SEE decken könnte. Doch erscheint es unwahrscheinlich, dass dies ebenso für mittlere und schwere SEE innerhalb dieses Jahrzehntes gelingen kann; ein Grund zur Sorge

**Tabelle 8.2** Einige Haupttreiber der Nachfrage für Seltene Erden

Anwendung	Seltene Erden	Haupttreiber der Nachfrage
Magneten	Nd, Pr, Sm, Tb, Dy	Laufwerke für Rechner, Mobiltelefone, MP3-Geräte, Kameras, Windkraftanlagen, Schwingpulsomotoren, Hybridfahrzeug-Elektromotoren, Magnetschwebbahn, Sensoren, Schnurlose Elektrowerkzeuge, Medizinische Bildgebung (MRTs)
LaNiH-Akkus	La, Ce, Pr, Nd	Hybridfahrzeugbatterien, Legierungen mit Wasserstoffaufnahme für wiederaufladbare Batterien
Leuchtstoffe (Phosphore)	Eu, Y, Tb, La, Dy, Ce, Pr, Gd	Flüssigkristallanzeige, Plasmabildschirme, LEDs, energiesparende Leuchtstofflampen
Katalysatoren zur Fluid-Zersetzung	La, Ce, Pr, Nd	Stoffumwandlungsprozesse in der erdölverarbeitenden Industrie – höherer Gebrauch durch Schweröle und Teersande
Polierpulver	Ce, La, Nd	Mechanisch-chemisches Polieren von Fernseh- und anderen Bildschirmen, Spiegeln und (in Nanoform) Siliziumchips
Fahrzeug-Katalysatoren	Ce, La, Nd	strengere NO <sub>x</sub> - und SO <sub>2</sub> -Normen – Platin wird zurückgewonnen; dies ist noch nicht wirtschaftlich für Seltene Erden
Glaszusatzstoffe	Ce, La, Nd, Er	Ce reduziert UV-Strahlung, La verleiht Glas einen höheren Brechungsindex für Objektive von digitalen Kameras
Glasfasern	Er, Y Tb, Eu	Signalverstärkung



Abb. 8.1 Bergwerk Mountain Pass. Quelle: © Molycorp Minerals, LLC

für Firmen aus dem Rest der Welt, die solche SEE benötigen. Dennoch vertreten wir die Meinung, dass die Industrie mit zunehmender Vielfalt der Quellen wachsen und profitieren wird.

## Seltenerdkonzepte

Die Kosten von SEE-Produkten werden grundsätzlich auf der Basis von US\$ pro Kilogramm (kg) Seltenerdoxid (SEO) berechnet, unabhängig davon, in welcher chemischen Bindungsform die SEE tatsächlich verkauft werden.

Der SEE-Markt ist klein und hoch spezialisiert, so sehr, dass die größten und die mittelgroßen Bergbauunternehmen bis heute kein Interesse daran gezeigt haben, in diesen Markt einzutreten. Daher sind die meisten SEE-Projekte, die derzeit in Entwicklung sind, im Besitz kleiner, allein zu diesem Zweck gegründeten Firmen ohne weitere Einnahmequelle. Die dazu nötige Bilanzverlängerung, um ein Werk aufzubauen (normalerweise eine Mischung aus Schul-

den und Eigenkapital), muss dabei auf einem nachgewiesenen Projekt und verlässlichen Verkaufsverträgen basieren.

Seltene Erden sind keine normalen Handelswaren; es sind kundenspezifische Chemikalien; spezifiziert nach genauen chemischen und physikalischen Anforderungen. In Konsequenz muss der potenzielle Produzent seine Fähigkeit nachweisen, das Produkt nach diesen Spezifikationen und in sinnvollen Mengen im Rahmen einer kontinuierlich arbeitenden Pilotanlage herzustellen, um überhaupt Lieferverträge mit Kunden abschließen zu können. Dieser Nachweis, einen Kunden versorgen zu können, wird zusätzlich dadurch erschwert, dass dessen Bedarf sich stetig ändert. Deshalb müssen erfolgreiche Lieferanten zu einem integrierten Glied der Lieferkette werden. Dies resultiert meist in gemeinsamer Finanzierung der Forschung in neue Produkte und Prozesse durch beide Parteien, um konkurrenzfähig zu bleiben – eine nicht ganz einfache Aufgabe, wenn zugleich der SEE-Extraktionsprozess noch in Entwicklung begriffen ist.

## 8

Die Endlagerung radioaktiver Abfälle, die mit Seltenen Erden verbunden sind, ist ein weiteres Thema, das mit Umsicht angesprochen werden muss, da es oft mit Bedenken der lokalen Kommunen verbunden ist.

## 8.2 Die Dimensionen des globalen Seltenerdmarktes

- ▶ Geschätzter Umfang in 2012: 115.000 t SEO
- ▶ Wert: 4–6 Milliarden US\$ in 2012
- ▶ In den vergangenen vier Jahren gab es wegen der globalen Finanzkrise 2008/09 kein Wachstum in der Industrie, gefolgt von Einschränkungen der Lieferungen aus der VR China in den letzten zwei Jahren.
- ▶ China versorgte im Jahr 2012 etwa 94 % des globalen Bedarfs und konsumierte 69 % dieses Bedarfs (Tabelle 8.3).
- ▶ Um dazu beizutragen, dass Arbeitsplätze für Millionen von Chinesen geschaffen werden, die aus dem ländlichen Raum in die Städte wandern, hat das Land eine Politik der Förderung von SEE-Produzenten aufgelegt, um entlang der Wertschöpfungskette weiterzugehen und entsprechende Werte zu schaffen.

Damit stehen Chinas Seltenerdressourcen nun in erster Linie für die landeseigene Industrie zur Verfügung. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden die unten aufgeführten Maßnahmen umgesetzt:

- Exportquoten,
- Exportsteuern,
- Produktionsquoten,
- Verbot ausländischer Investitionen in Seltene Erden und Bergbaubetriebe,
- Bildung von SEE-Vorräten, um Preisschwankungen auszugleichen und die Versorgungssicherheit zu erhöhen,
- Ein umfassendes und gut verwaltetes Exportsystem mit dem Ziel, illegale Exporte zu reduzieren.

## 8.3 Globale Seltenerdressourcen

Die häufigsten Minerale, aus denen SEE extrahiert werden, sind in Tabelle 8.4 aufgeführt. Beinahe alle leichten SEE werden heute aus Bastnäsit-Mineralen [Ce, La, Y(CO<sub>3</sub>)F] und Monaziten [Ce, La, Th, Nd, Y(PO<sub>4</sub>)] gewonnen, während die meisten schweren SEE aus Xenotimen [Y,Yb(PO<sub>4</sub>)] und speziellen sorbierenden Tonmineralen (einer Besonderheit in Südchina) angereichert werden. Die dabei genutzten Trennprozesse, um SEE anzureichern, haben sich in den vergangenen 27 Jahren kaum geändert. Der jeweils gewählte Weg richtet sich nach der vor Ort gegebenen Wirtschaftlichkeit und den Kosten für Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), Salzsäure (HCl) und Natriumhydroxid (NaOH); den Basischemikalien für die SEE-Extraktion.

Festgesteins-Lagerstätten von Bastnäsit sowie Seifenlagerstätten von Monaziten und Xenotim führen global die meisten wirtschaftlichen Konzentrationen leichter SEE. Die Mehrheit der SEE-Abbaue basiert auf der Nutzung dieser Minerale. Wegen der weiten Verbreitung von Bastnäsit und Monazit dominieren die leichten SEE die weltweiten Produktionszahlen von Seltenerdoxid (SEO). Die Weltproduktion leichter und mittelschwerer SEE wird durch die Bastnäsit-Produktion bei Baotou in der Inneren Mongolei dargestellt, die dort ein Nebenprodukt des Eisenerz-Bergbaus ist.

Die weniger häufigen, jedoch wertvolleren Elemente Yttrium und die schweren Seltenen Erden stammen überwiegend aus den erwähnten Tonminerallagerstätten in Südchina. Die Tabelle 8.5 zeigt den relativen SEE-Anteil der weltweit bedeutendsten SEE-Produzenten.

Heutige Reserven an den weltweit verfügbaren SEE werden vom Geologischen Dienst der Vereinigten Staaten (USGS) auf ca. 115 Millionen Tonnen SEO geschätzt. Dies entspräche unter Voraussetzung vergleichbarer Verfügbarkeit und typischer metallurgischer Ausbeute einer theoretischen Versorgung für die nächsten

**Tabelle 8.3** Globale Nachfrage nach Seltenen Erden in 2012 (in t SEO ±15%). Quelle: © IMCOA und © Stakeholder der SEE-Industrie

Anwendung	China	Japan & SO Asien	USA	Andere	Gesamt	Marktanteil
Katalysatoren	12.000	2.000	5.000	2.000	21.000	18%
Glas	5.500	1.000	500	500	7.500	7%
Polieren	15.000	2.000	1.000	1.000	19.000	16%
Metall-Legierungen	16.000	4.000	1.000	1.000	22.000	19%
Magnete	18.000	3.500	500	500	22.500	20%
Phosphore*	7.000	1.500	500	500	9.500	8%
Keramiken	2.500	2.000	1.500	500	6.500	6%
Andere	3.500	1.500	1.500	500	7.000	6%
<b>Gesamt</b>	<b>79.500</b>	<b>17.500</b>	<b>11.500</b>	<b>6.500</b>	<b>115.000</b>	<b>100%</b>
<b>Marktanteil</b>	<b>69%</b>	<b>16%</b>	<b>10%</b>	<b>5%</b>	<b>100%</b>	<b>–</b>

\* inkl. Pigmente  
Anmerkung: Große Anteile sowohl der SEE-Legierungen für Batterien (NiMH) und für Magnete (NdFeB) werden von China nach Japan exportiert. Würden diese in der Statistik als japanischer Gebrauch aufgeführt, stiegen dessen Anteile signifikant. Diese Abhängigkeit von China als einzige Quelle vieler strategischer Materialien erklärt die starke Unterstützung der japanischen Industrie für nichtchinesische SEE-Projekte.

**Tabelle 8.4** Zusammensetzung der wesentlichen SEE-Mineralen. *SEO* Seltenerdoxid; *Ln* Lanthanoide

Mineral	Formel	Vorkommen	SEO max (%)
Bastnäsit	$\text{LnFCO}_3$	China, USA	75
Monazit	$(\text{Ln}, \text{Y}, \text{Th})\text{PO}_4$	China, Australien, Brasilien, Indien, Malaysia, Afrika	65
Loparit	$(\text{Na}, \text{Ca}, \text{Ln}, \text{Y})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_2\text{O}_6$	ehemalige Sowjetunion	32
Xenotim	$\text{YPO}_4$	China, Australien, Malaysia, Afrika	62
Tonminerale	verwitterte Xenotime und Apatite	China	k.A

k.A. keine Angaben



## 8

**Tabelle 8.5** SEE-Inhalt wesentlicher Quellminerale (Gesamt SEO in %). Quelle: © Roskill (2011)

Seltenerd-oxid	Bastnäsit		Xenotim	Tonminerale	
	Bayun Obo, Mongolei, China	Mountain Pass, Kalifornien, USA	Guangdong, China	Xunwu, Jiangxi, China	Lognan, Jiangxi, China
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,0	33,2	1,2	42,0	1,8
CeO <sub>2</sub>	50,0	49,1	3,0	2,3	0,4
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	6,2	4,3	0,6	8,8	0,7
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,5	12,0	3,5	30,8	3,0
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8	0,8	2,2	3,8	2,8
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	0,1	0,2	0,5	0,1
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,7	0,2	5,0	2,9	6,9
Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	0,1	Spuren	1,2	Spuren	1,3
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	Spuren	9,1	Spuren	6,7
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Spuren	0,1	59,3	8,0	65,0
<b>Gesamt</b>	<b>99,6</b>	<b>99,8</b>	<b>85,3</b>	<b>99,1</b>	<b>88,7</b>

Seltenerd-oxid	Monazit			Loparit
	zentrale Region, Mt. Weld, Australien	Indien	Guandong, China	Lovozerky, Russland
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,6	23,0	23,0	28,0
CeO <sub>2</sub>	45,7	46,0	42,7	57,5
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	5,4	5,5	4,1	3,8
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,6	20,0	17,0	8,8
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,4	4,0	3,0	1,0
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6	–	0,1	0,1
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0	–	2,0	0,2
Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	0,1	–	0,7	0,1
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	–	0,8	0,1
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4	–	2,4	Spuren
<b>Gesamt</b>	<b>100,0</b>	<b>98,5</b>	<b>95,8</b>	<b>99,6</b>

200 Jahre. Der größte Anteil dieser Reserven liegt in China (55 Millionen Tonnen) und entspricht etwa 50 % der globalen Reserven, während die USA für weitere 13 Millionen Tonnen, Indien für 3 Millionen Tonnen und Australien für 2 Millionen Tonnen stünden. Die globale Bergbauproduktion und die Reserven, definiert

vom USGS, sind in Tabelle 8.6 dargestellt. Ein Vergleich der bedeutendsten SEE-Vorkommen und Projekte zeigt Tabelle 8.7. Um die Daten richtig zu interpretieren, sollte auf die Hinweise zur Tabelle geachtet werden.

Die Angaben zu den Reserven in Tabelle 8.6 umfassen ein breites Spektrum von Erzqualitäten

**Tabelle 8.6** Geschätzte Bergbau-Produktion und Reserven für Seltene Erden (inkl. Yttrium) 2009 bis 2011. Quelle: USGS (2011a, b und 2012a, b)

Land	Bergbau-Produktion in Tonnen SEO			Reserven
	2009	2010	2011	
Vereinigte Staaten von Amerika	–	–	–	13.120.000
Australien	–	–	–	1.700.000
Brasilien	565	565	565	50.000
China	137.800	138.800	138.800	55.200.000
Gemeinschaft Unabhängiger Staaten	k.A.	k.A	k.A	19.000.000
Indien	2.750	2.800	3.000	3.100.000
Malaysia	300	30	30	30.000
Andere Länder	k.A	k.A	k.A	22.000.000
<b>Weltweit gesamt (abgerundet)</b>	<b>141.400</b>	<b>142.200</b>	<b>142.400</b>	<b>114.000.000</b>

k.A. keine Angaben

**Tabelle 8.7** Vergleich wichtiger SEE-Projekte. Quelle: © IMCOA, USGS (2011a und 2012a), © Webseiten der Firmen

Projekt, Unternehmen	Standort	Ressource <sup>1</sup> / Reserve <sup>2</sup>	SEE-Anteil in SEO	Anteil mittlerer und schwerer SEE <sup>5</sup>
Mt Weld*, Lynas Corporation <sup>4</sup>	Laverton, Australien	12 Mio. t @ 9,7% REO <sup>1 &amp; 2</sup> (Cut-off-Gehalt 2,5% REO)	1,2 Mio. t	3%
Mountain Pass*, Molycorp Minerals	Kalifornien, USA	20 Mio. t @ 9,2% REO <sup>1</sup> (Cut-off-Gehalt 5% REO)	1,8 Mio. t	1%
Bayan Obo*, Baotou Iron & Steel Group <sup>3</sup>	Innere Mongolei, China	1.460 Mio. t @ 3,9% REO <sup>1</sup> (Cut-off-Gehalt nicht verfügbar)	56 Mio. t	2%
Dubbo Zirconia, Alkane Resources Ltd	New South Wales, Australien	73 Mio. t @ 0,9% REO <sup>1 &amp; 2</sup> (Cut-off, basiert auf Zirkongehalt)	0,7 Mio. t	25%
Steenkampskraal, Great Western Minerals Group	Südafrika	0,2 Mio. t @ 13% REO <sup>6</sup>	0,03 Mio. t	10%

\* Das Projekt hat einen nachgewiesenen Entwicklungsplan, arbeitet bereits oder ist in Entwicklung.

<sup>1 & 2</sup> Jede(s) Projekt/Firma veröffentlicht seine Ressourcen/Reserven in verschiedenen Formaten, wenngleich normgerecht zu lokalen Regeln; deshalb müssen diese Daten mit Umsicht gelesen werden, da sie nicht notwendig direkt miteinander kompatibel sind. Die Zahlen wurden gerundet.

<sup>3</sup> Abgesehen von Bayan Obo (~60% der Ressourcen Chinas) liegen nur begrenzte Informationen zu Chinas weiteren SEE-Ressourcen vor, wenngleich die gesamten Ressourcen in Sichuan und den südchinesischen Provinzen mit etwa 30–40% von Chinas gesamter SEE-Produktion wesentlich sind.

<sup>4</sup> Lynas hat ebenfalls SEE-Ressourcen im Crown Project; 38 Mio. Tonnen @ 1,3% REO = 0,5 Mio. t REO (neben Mt. Weld) und dem Kangankundeprojekt in Malawi; 2,5 Mio. t @ 4,2% REO = 0,1 Mio. t REO.

<sup>5</sup> Der cut-off für mittelschwere und schwere SEE (MREs und HREs) liegt bei Samarium (Tabelle 8.1).

<sup>6</sup> Diese Zahlen sind nicht 43-101 normgerecht; es handelt sich um eine historische Einschätzung.

## 8

und stimmen nicht unbedingt mit den international anerkannten Definitionen von Reserven überein. Zudem ist die Höffigkeit (voraussichtliche Verfügbarkeit) einer Ressource von verschiedenen Einflussgrößen abhängig; darunter: Erzgehalt, Verarbeitungskosten, Verunreinigungen im Erz und die relative SEE-Konzentration der am meisten gefragten SEE – diese Angaben macht Tabelle 8.6 nicht.

Die SEE-Ressourcen in China, die weniger häufig sind und zugleich einen höheren Wert haben als die der leichten SEE, werden von den nationalen Behörden als begrenzt eingestuft (12 Jahre) und sind daher staatlichen Kontrollen unterworfen (Abschnitt 8.6). Daher sind jene SEE-Ressourcen und -Projekte von besonderem Interesse, die relativ hohe Konzentrationen der schweren SEE aufweisen. Mit Ausnahme der Bayan Obo Mine veröffentlichen die chinesischen Behörden keine Information zu den SEE-Ressourcen ihres Landes.

Ein Projekt, in dem die SEE ein Nebenprodukt eines wesentlichen Wirtschaftsgutes sind, könnte daher einen signifikanten Vorteil gegenüber Projekten haben, die einzig von SEE abhängig sind. Derzeit gibt es mehr als 400 SEE-Projekte, die sich um Gelder bemühen, um den Abbau vor dem Jahr 2020 aufzunehmen. Diese Projekte befinden sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Während einige bereits aufgebaut werden, müssen andere zunächst einmal die SEE-Ressource etablieren und einen sinnvollen Prozess zur Erzaufbereitung und SEE-Extraktion entwickeln. Tabelle 8.7 listet jene Projekte, die bereits in Produktion sind (es gibt dazu wenig Information aus China – siehe oben) oder die eine Ressource haben, einen nachweislich funktionierenden Aufbereitungs- und Verarbeitungsprozess auf Pilot- oder Industriemaßstab mit Anerkennung der Umweltrichtlinien sowie einen fortgeschrittenen behördlichen Genehmigungsprozess. Zusammenfassende Listen potenzieller Projekte lassen sich von verschiedenen Webseiten zusammentragen (einschließlich zum Thema Forschung zu Technologiemetallen).

## 8.4 Globales Angebot zu und globale Nachfrage nach Seltenen Erden

Die erste verbürgte kommerzielle Produktion Seltener Erden fand in Treibach, Österreich, im Jahr 1903 statt; es wurden Mischmetalle für Feuerzeugsteine (Flint) hergestellt. Fünfzig Jahre später war die globale Produktion auf diverse SEE und eine Größenordnung von 1.000 Tonnen SEO pro Jahr angewachsen – mit einem Marktwert von ca. 25 Millionen US\$. In den vergangenen zehn Jahren stiegen SEE-Produktion und Nutzung um 60 %.

### Prognostizierte Nachfrage nach Seltenen Erden im Jahr 2016

Nach Einschätzung der Industrial Minerals Company of Australia Pty Ltd (IMCOA) haben der Impakt der globalen Finanzkrise von 2008/09 und die jüngst stark gestiegenen Preise den längerfristigen Gebrauch um etwa vier Jahre zurückgesetzt (also kein Wachstum bis 2016).

Die Verminderung der chinesischen Exportquoten und die „inoffizielle zeitlich begrenzte Aufhebung“ chinesischer SEE-Exporte nach Japan in 2010 haben auf den internationalen Märkten Unsicherheit und mangelndes Vertrauen in die zukünftige Wahrnehmung von SEE-Exporten aus China ausgelöst. Darüber hinaus haben die verringerten Exportquoten zu einem dramatischen Preisanstieg geführt (>500 % in 2010/11), der teilweise zu Substitution sowie verstärkten Anstrengungen geführt hat, SEE effizienter zu nutzen.

Im Ergebnis hat IMCOA seine Prognose für die Nachfrage von 2011 bis 2016 verringert. Die größten Auswirkungen wird dies in der verminderten Nachfrage für LaNiH-

Batterien haben, weil nunmehr ein zusätzliches Argument vorhanden ist, diese durch Lithiumionen-Batterien zu ersetzen. Die aktuelle globale Voraussage für den Gebrauch in

2016 liegt bei 160.000 Tonnen SEO, im Vergleich zu Schätzungen von 200.000 Tonnen vor 3 Jahren. Das Wachstum pro Anwendung ist in Tabelle 8.8 zusammengefasst.

Tabelle 8.8 Wachstumsprognose der SEE-Nachfrage 2011 bis 2016

Anwendung	Kommentare zu prognostizierten Wachstumsraten 2011–2016
Katalysatoren	Geringe Erholung der Nachfrage in 2012 (5%), dann stetes Wachstum von 3–5% p. a. 2013 bis 2016
Glas	Minimales Wachstum in 2012; dann Wachstum von 4–8% p. a., sobald in 2013 bis 2016 mehr Ce verfügbar wird
Polieren	Starkes Wachstum in 2011 wegen der Poliernotwendigkeit von “touch screens”, doch werden die hohen Preise das Wachstum für einige Jahre bremsen. Wachstum von 5–10% p. a. in den Jahren 2013 bis 2016
Legierungsmetall	Leichte Erholung in 2012 (5%). Wachstum 2013 bis 2016 zurückhaltend bei 3–6% p. a. im Vergleich mit jüngsten Jahren wegen der intensiven Nutzung von Li-Ionenbatterien
Magnete	Preis und Verfügbarkeit limitierend. Geringes Wachstum in 2012. Prognose für 2013 bis 2016 bei 10–15% p. a.; dies könnte größer sein, wenn SEE für Permanentmagneten langfristig und zu vernünftigen Preisen verfügbar wären
Phosphore (inkl. Pigmente)	Neue Leuchten, Fernseh- und Computerbildschirme brauchen weniger SEE, doch werden sie größer und werden öfter ersetzt. Pigmente für Plastik, Textilien und Kosmetik sind ein stark wachsender Sektor. Daher eine stetige Wachstumsrate mit 6–8% p. a. in der Prognose
Keramiken	Stetige Wachstumsrate mit 6–8% p. a. in der Prognose
Andere	Die Nutzung von Ce für Wasserreinigungsanlagen wird als Wachstumsmarkt gesehen, mit starken Nachfragesteigerungen in 2013 und 2014. Andere neue Anwendungen sind unbekannt, doch könnten diese den Gebrauch von Gd in Kühlgeräten beinhalten. Wachstumsrate von 6–10% von 2015 bis 2016
Durchschnitt, gesamt	Einer geringen Nachfrageerholung von 5% in 2012 folgend, sagt IMCOA für 2013–16 einen CAGR von 7–11% voraus. Dies entspricht einer Erholung, die mit Chinas alternativen Quellen verbunden ist. Wenn jedoch China den SEE-Export reduziert, dann wird das Wachstum begrenzt sein

Anmerkungen: Geringere Nachfrage in 2009 und 2011 wegen der hohen Preise, der globalen Finanzkrise und den chinesischen Restriktionen. Es wird angenommen, dass Mountain Pass und Mt. Weld noch in 2013 in Produktion gehen. Weitere Projekte im Rest der Welt können zwischen 2014 und 2016 in Produktion gehen.

## 8

## Impakt von Windenergieturbinen

Studien von IMCOA zeigen, dass die Nachfrage im Windenergiesektor potenziell die Nachfrage nach Neodym (Nd) um 15–30 % steigern könnte (Tabelle 8.11). Dies hängt von der erfolgreichen Lösung laufender Diskussionen zur Akzeptanz von Windenergieanlagen zusammen und mit dem Erfolg der technischen Lösung, schwankende Leistungen von Windkraftanlagen dennoch gleichmäßig in die Energienetze einzuspeisen.

## Prognose zur Nachfrage 2016–2020

Mit der Verfügbarkeit alternativer Quellen außerhalb Chinas in der Dekadenmitte (2015/16), schätzt IMCOA ein Nachfragewachstum in gleicher Größenordnung ab wie in der vergangenen Dekade, nämlich von 8–12 % pro Jahr. Damit läge die Nachfrage im Jahr 2020 bei 200–240.000 Tonnen SEO; mit einem Bedarf im Rest der Welt von 70–90.000 Tonnen SEO. Das Nachfragewachstum in der VR China wird mit 8–10 % pro Jahr angesetzt, im Rest der Welt werden 5–7 % pro Jahr erwartet (Tabelle 8.10 und Abbildung 8.2).

**Tabelle 8.9** Geschätzte globale SEE-Nachfrage in 2016 († SEO  $\pm 20\%$ . Quelle: © IMCOA und © SEE-Industrie Stakeholder

Anwendung	China	Japan & SO Asien	USA	Andere	Gesamt	Marktanteil
Katalysatoren	14.500	2.500	6.500	1.500	25.000	15 %
Glas	6.000	1.000	1.000	1.000	9.000	6 %
Polieren	19.000	2.000	3.000	1.000	25.000	15 %
Legierungsmetall	20.000	2.500	2.000	1.500	26.000	16 %
Magnete	28.000	4.500	2.000	1.500	36.000	22 %
Phosphore (inkl. Pigmente)	9.000	2.000	1.000	500	12.500	8 %
Keramiken	4.000	2.000	2.000	1.000	9.000	6 %
Andere	6.500	3.500	8.000	2.000	20.000	12 %
<b>Gesamt</b>	<b>107.000</b>	<b>20.000</b>	<b>25.500</b>	<b>10.000</b>	<b>162.500</b>	<b>100 %</b>
<b>Marktanteil</b>	<b>66 %</b>	<b>12 %</b>	<b>16 %</b>	<b>6 %</b>	<b>100 %</b>	<b>–</b>

Anmerkungen: Große Anteile sowohl der SEE-Legierungen zur Herstellung von NiMH-Batterien und von NdFeB-Magneten werden von China nach Japan exportiert. Wenn diese in der Statistik japanischen Verbrauchs geführt würden, käme es zu einem wesentlichen Anstieg des japanischen Verbrauchs und einer Doppelzählung. Wie oben angesprochen, ist die Abhängigkeit von China als nahezu einzige Bezugsquelle für viele strategische Materialien die Motivation hinter der Unterstützung der japanischen Industrie für nichtchinesische SEE-Projekte.

**Tabelle 8.10** Globale SEE-Angebots- und Nachfragesituation 2005 bis 2016 (Tonnen, SEO ±20%). f steht für Prognose (forecast). Quelle: © IMCOA

Jahr	Nachfrage			Angebot			China: Export Quota	Überschuss
	Gesamt	China	Übrige Welt	Total	China	Übrige Welt		Defizit
2005	98.000 †	52.000 †	46.000 †	114.500 †	110.000 †	4.500 †	65.000 †	16.500 †
2006	110.000 †	60.000 †	50.000 †	125.500 †	120.000 †	5.500 †	62.000 †	15.500 †
2007	120.000 †	67.000 †	53.000 †	125.500 †	121.000 †	4.500 †	60.000 †	5.500 †
2008	124.000 †	68.000 †	56.000 †	129.000 †	125.000 †	4.000 †	56.000 †	5.000 †
2009	85.000 †	60.000 †	25.000 †	125.000 †	120.000 †	5.000 †	50.000 †	40.000 †
2010	123.000 †	74.000 †	49.000 †	114.500 †	109.000 †	5.500 †	30.250 †	8.500 †
2011f	110.000 †	75.000 †	35.000 †	104.500 †	98.000 †	6.500 †	30.200 †	5.500 †
2012f	115.000 †	80.000 †	35.000 †	110.000 †	95.000 †	15.000 †	30.000 †	5.000 †
2013f	125.000 †	85.000 †	40.000 †	122.500 †	100.000 †	22.500 †	28.000 †	2.500 †
2014f	136.000 †	91.000 †	45.000 †	141.000 †	105.000 †	36.000 †	26.000 †	5.000 †
2015f	148.000 †	98.000 †	50.000 †	158.000 †	110.000 †	48.000 †	24.000 †	10.000 †
2016f	162.500 †	107.000 †	55.500 †	180.000 †	117.500 †	62.500 †	22.000 †	17.500 †

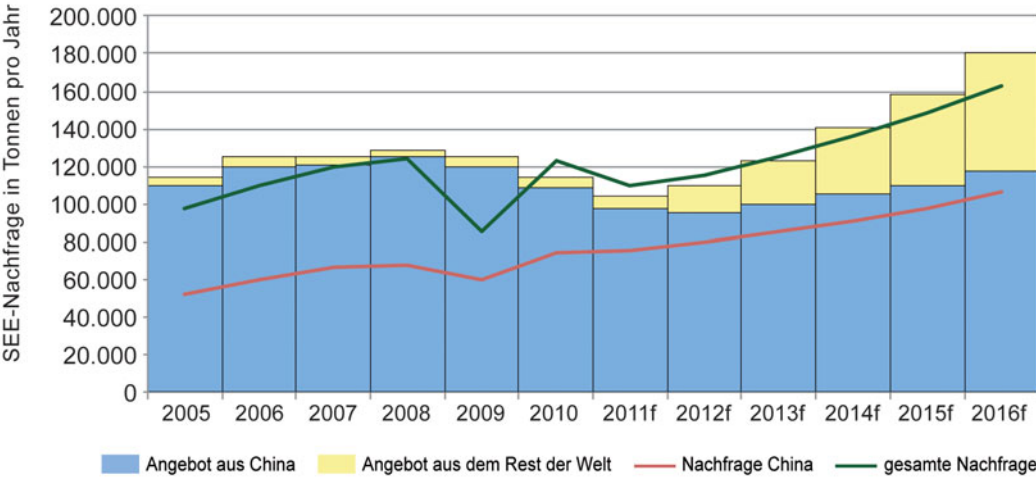


Abb. 8.2 Seltenerdangebot und -nachfrage von 2005 bis 2016



## 8

### 8.5 Angebot und Nachfrage zu einzelnen Seltenerdelementen

Das Hauptthema für die SEE-Industrie ist mit dem Wort „Gleichgewicht“ gekennzeichnet. Dahinter steht das Missverhältnis zwischen dem Anteil der individuellen SEE, die produziert werden, gegenüber dem Anteil, der davon gekauft und gebraucht wird.

Die Tabelle 8.11 zeigt deutlich, dass die mittelschweren und schweren SEE bald knapp werden, selbst wenn die gesamte Produktion die Nachfrage um etwa 10–20% überschritte. Das liegt daran, dass die bedeutendsten nichtchinesischen Projekte (Mount Weld und Mountain Pass), die sehr wahrscheinlich in 2016 produzieren werden, vornehmlich leichte SEE mit nur

wenig mittelschweren SEE auf den Markt bringen. Basierend auf der Analyse von IMCOA zu Angebot und Nachfrage wird deutlich, dass Europium (Eu), Terbium (Tb), Erbium (Er) und Yttrium (Y) knapp sein werden, und falls der Bedarf an Windkraftanlagen deutlich steigt, wird dies auch für Neodym (Nd) gelten.

Es muss angemerkt werden, dass die chinesischen Behörden angezeigt haben, dass die nationale Produktion gesteuert wird, um die Ressourcen an schweren SEE zu bewahren. Es ist auch aus jüngeren Präsentationen chinesischer Funktionäre bekannt, dass die chinesische SEE-Industrie ihren Vorsprung nicht einfach aufgeben wird; obwohl man dort vermutlich Zugeständnisse machen müssen, um die Umweltprobleme, die mit Abbau und Verarbeitung der Tonminerallagerstätten in Südchina verbunden sind, erfolgreich in den Griff zu bekommen. Reduziert China darüber hinaus

**Tabelle 8.11** Prognose globalen Angebots und Nachfrage für individuelle SEE in 2016 ( $\pm 20\%$ ).  
Quelle: IMCOA-Annahmen

Seltenerdoxid (SEO)	Nachfrage		Angebot/Produktion	
	SEO Tonnen	%	SEO Tonnen	%
Lanthan	34.300	21,1	49.500	27,5
Cer	71.700	43,1	77.750	43,1
Praseodym	7.525	4,6	8.650	4,8
Neodym	30.025	18,5	28.000	15,6
Samarium	1.150	0,7	3.275	1,8
Europium	500	0,3	450	0,3
Gadolinium	2.650	1,6	2.175	1,2
Terbium	500	0,3	250	0,1
Dysprosium	900	0,6	1.100	0,6
Erbium	1.050	0,7	550	0,3
Yttrium	11.950	8,4	7.300	4,1
Ho-Tm-Yb-Lu	250	0,1	1.000	0,6
<b>Gesamt</b>	<b>162.500</b>	<b>100,0</b>	<b>180.000</b>	<b>100,0</b>

Anmerkung: Die Daten zur chinesischen Produktion basieren auf Daten des NRDC (2012), CREIC (2011a) und IMCOA, basierend auf vergangenen Produktionsraten; während dies keine Sicherheit für zukünftige Produktionsraten geben kann, ist es ein guter Indikator und begründet die Genauigkeit der Zahlen der Tabelle  $\pm 20\%$ .

weiterhin seine SEE-Exportquoten (Abschnitt 8.6), dann könnte dies auf längere Sicht eine zusätzliche Belastung der Versorgung mit schweren Seltenen Erden bedeuten.

Die größte Unsicherheit, mit der SEE-Käufer im Rest der Welt mittelfristig (bis 2020) konfrontiert sind, liegt in der künftigen Exportquote Chinas. Dies wurde zusätzlich verkompliziert, als China beschloss, die Quoten nach spezifischen Volumina leichter, mittelschwerer und schwerer SEE zu differenzieren, was die Verfügbarkeit schwerer SEE effektiv verringert hat. Wenn China die Produktion schwerer SEE für seine eigenen Zwecke zurückhielte, dann könnte der Rest der Welt nur noch 10% seines Bedarfs bis 2016 decken. Daher liegt der Fokus von SEE-Nutzern und Projektmanagern im Rest der Welt auf den schweren SEE.

## 8.6 China

Die derzeitige Dominanz Chinas auf dem Weltmarkt als der „Hauptspieler“ in der

SEE-Industrie bleibt unwidersprochen, da das Land 95% des globalen Bedarfs produziert und 65–70% des Bedarfes nutzt. Als Hauptlieferant und Nutzer wird das Land auch einen wesentlichen Einfluss auf die Zukunft der Branche haben, mit eindeutigen Signalen, dass China seine Vormachtstellung nutzen wird, um seine eigene Industrie zu fördern.

### Nutzung Seltener Erden in China

Die detaillierte Nutzung und das Wachstum in China lassen sich aus Daten des Chinesischen Zentrums für Seltenerdinformationen (CREIC) ableiten. Dabei ist zu beachten, dass die chinesische Weise der Differenzierung sich von der von IMCOA unterscheidet – so erscheinen die Daten in den Tabellen 8.12 und 8.13 in absoluten Mengen der Elemente, nicht als SEO.

Zwischen 2010 und 2011 gab es wegen der hohen Preise kein Wachstum beim Bedarf an Seltenen Erden in China.

Anwendung	Einsatzgebiet	Verbrauch (t)	%
Fünf fortgeschrittene Werkstoffe	Dauermagnete	36.600	44,0%
	Polierpulver	4.800	5,8%
	Wasserstoff-Speichermaterialien	4.430	5,3%
	Fluoreszierende Materialien	4.800	5,8%
	Fahrzeug-Katalysatoren	4.380	5,3%
	Teilsomme	55.010	66,2%
Andere	Metallurgie	10.100	12,1%
	Petrochemische Industrie	7.500	9,1%
	Glas und Keramik	7.000	8,4%
	Andere	3.500	4,2%
	Teilsomme	28.100	33,8%
Gesamt		83.110	100,0%

**Tabelle 8.12** Zusammenbruch des chinesischen SEE-Verbrauchs in 2011 (in Gesamttonnen). Quelle: © China Rare Earth Industry Association (2012)

Anmerkung: Zahlen gerundet

## 8

**Tabelle 8.13** Produktion von 'Added Value' SEE-Produkten in China, 2008 to 2011 (absolute Tonnen oder Einheiten). Quelle: © CREIC (2011b)

Fortgeschrittene Werkstoffe	2008	2009	2010	2011
Dauermagnete	49.300	55.600	82.600	88.500
Wasserstoff-Speichermaterialien	17.300	17.500	17.800	12.500
Phosphore	7.270	7.235	9.400	8.860
Polierpulver	10.000	12.000	13.900	15.500
Fahrzeug-Katalysatoren (je 1.000 Einheiten)	11.500	13.000	15.200	k. A.

Anmerkung: Zahlen gerundet

## Chinesische Steuern, Quoten und Handelseinschränkungen

Innerhalb der vergangenen 8–9 Jahre hat China fundamentale Veränderungen bei Steuern und Quoten zum SEE-Export eingeführt (Tabelle 8.14). Diese Veränderungen haben japanische, europäische und nordamerikanische Kunden dazu gezwungen, sich stärker um alternative, nichtchinesische Anbieter zu kümmern und diese zu unterstützen. Die speziellen Entwicklungen in China, mit dem Ziel, die eigenen Industrien zu befördern, die eine Erweiterung der Wertschöpfungskette erreichen, werden im Folgenden konkreter dargestellt:

**Rückerstattung der Mehrwertsteuer auf SEE-Exporte aus China.** Im Jahr 2007 zog China die Rückerstattung der Mehrwertsteuer (16 %) auf Exporte von nicht weiter veredelten SEE zurück, während die Rückerstattung für höherwertige Produkte wie Magnete und Phosphore erhalten blieb. Die Konsequenz dieser Entscheidung, die im Zusammenhang mit den Exportsteuern gesehen werden muss, zeigt sich in einer Erhöhung der Kosten um 31 % für die nichtchinesische SEE-verarbeitende Industrie, wie z. B. Cer (Ce) Polierpulver-Hersteller und SEE-Magnet-Produzenten für ihre SEE-Rohstoffe (zuzüglich Transport- und Lagerkosten).

**Exportsteuern auf SEE-Exporte aus China.** Die chinesische Regierung führte Ende 2006 eine Steuer auf SEE-Exporte in Höhe von 10 % ein. Diese wurde im Jahr 2007 auf 15 % für ausgewählte SEE erhöht. Im Dezember 2007 steigerten die chinesischen Autoritäten die Exportsteuern noch einmal – jetzt für alle SEE – und mit Wirkung ab 1. Januar 2008 auf die folgenden Niveaus:

- Europium (Eu), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy), Yttrium (Y) als Oxide, Karbonate oder Chloride: 25 %
- Alle anderen Seltenerdoxide, -karbonate und -chloride: 15 %
- Neodym (Nd) als Metall: 15 %
- Alle anderen Seltenerdmetalle: 25 %
- Alle Seltenerdlegierungen: 20–25 %

**Auftragsgebundene Aufbereitung von SEE.** Die Aufbereitung von SEE in China für Fremde wurde seit November 2006 untersagt.

**Chinesische Exportquoten für Seltene Erden.** Die chinesischen Exportquoten für Seltene Erden werden in Tonnen pro Produkt ausgedrückt, nicht pro Tonne SEO. Im Juli 2010 kündigte das chinesische Handelsministerium (MofCom) die SEE-Exportquoten für die zweite Jahreshälfte von 2010 an; sie betrugen demnach 60–70 % weniger als die entsprechende

**Tabelle 8.14** Geschichte chinesischer SEE-Exportquoten 2005 bis 2012 in Gesamttonnen. Quelle: © MIIT (2012)

Jahr	Seltenerdexport-Quoten				
	inländische Unternehmen	ausländische Unternehmen	Gesamt	jährliche Veränderung	übrige Welt: Nachfrage
2005	48.040	17.659	65.609	0 %	46.000
2006	45.752	16.069	61.821	−6 %	50.000
2007	43.574	16.069	59.643	−4 %	50.000
2008	Effektiv: 34.156	Effektiv: 13.293	Effektiv: 47.449	−5,5 % <sup>1</sup>	50.000
	Angepasst: 40.987 <sup>1</sup>	Angepasst: 15.834 <sup>1</sup>	Angepasst: 56.939 <sup>1</sup>		
2009	33.300	16.845	50.145	−12 %	25.000
2010	22.512	7.746	30.258	−40 %	48.000
2011	22.712	7.472	30.184	0 %	35–40.000
2012	22.406 <sup>2</sup>	8.590 <sup>2</sup>	30.996 <sup>2</sup>	+2,7 %	35–40.000

<sup>1</sup> alle Daten umgerechnet auf Kalenderjahre

<sup>2</sup> Die Unterscheidung zwischen nationalen und ausländischen Gesellschaften muss noch bestätigt werden

Periode im Jahr 2009. Im Netto-Ergebnis be-  
trugen die Exportquoten 2010 zuzüglich der  
Produktion im Rest der Welt weniger als der  
geschätzte Bedarf im Rest der Welt, was das  
Thema Nachhaltigkeit der Bedarfsdeckung auf  
die Agenda zwingt.

Die Quoten für 2012 entsprechen denen für  
2011, doch da die chinesischen Verantwort-  
lichen kontinuierlich die Zahl der SEE-Pro-  
dukte erhöhen, die von den Quoten betroffen  
sind, reduziert dies am Ende effektiv diese  
Quoten. Zudem wurden im Frühjahr 2012 die  
Exportquoten durch das MofCom in leichte  
sowie mittelschwere und schwere Anteile un-  
tergliedert, was den Druck im Hinblick auf  
Lieferengpässe bei den schweren SEE nur noch  
erhöhen dürfte. Diese von China ausgehenden  
Aktivitäten erhöhen den Druck auf Firmen wie  
Lynas und Molycorp, ihre Projekte zeitig und  
bereits in 2012/2013 zu starten.

Die Auswirkungen der chinesischen Aktivi-  
täten auf den nicht-chinesischen SEE-Nutzer  
haben nicht nur den Zugang zu SEE beein-  
trächtigt – und damit deren Fähigkeit zur ge-  
schäftlichen Expansion –, sondern haben einen

wesentlichen Impact auf die Preisentwicklung  
gehabt (Abschnitt 8.8; ► Kap. 3).

### Konsolidierung der SEE-Industrie

Auf dem Höhepunkt der Produktion im Jahr  
2008 gab es mehr als 150 chinesische Firmen,  
die mit Bergbau, Verarbeitung und Vermark-  
tung von SEE zu tun hatten. Die chinesische  
Regierung erkannte, dass es für so viele Firmen,  
von denen einige sehr klein sind, schwierig ist,  
wirtschaftlich zu arbeiten. Um hier eine Kon-  
solidierung zu bewirken, wurden die folgenden  
Maßnahmen eingesetzt:

- Umverteilung der Abbau-Lizenzen an  
eine begrenzte Zahl großer Unternehmen  
im Staatsbesitz.
- Vergabe von Exportquoten nur an solche  
Firmen, die auch die erforderlichen Um-  
weltstandards erfüllen.
- Definition von Minimalzahlen für Produk-  
tion und Rückgewinnung (Tabelle 8.15).
- Strenge Durchsetzung von Umweltstan-  
dards.

## 8

Ziel dieser Maßnahmen ist es, die Zahl der SEE-Firmen bis 2015 auf 20–30 zu verringern, von denen nur 4–5 als globale Spieler aktiv sein sollen und der Rest hochspezialisierte Firmen.

### SEE-Vorräte

Während des „Nachbebens“ der globalen Finanzkrise, als die Nachfrage signifikant zurückging (Tabelle 8.10), finanzierte die chinesische Regierung die Bevorratung (leichter) SEE in Baotou. Dies wiederholte sich in 2012 für die schweren SEE, um deren Produzenten zu unterstützen, die auf einen starken Nachfragerückgang zu reagieren hatten. Diese Vorräte sollten sowohl der Nachfragesicherung dienen als auch der Stabilisierung der Preise. In jedem Fall zeigt sich die langfristige Unterstützung der Industrie durch die chinesische Regierung.

### Die Baotou-SEE-Handelsplattform

Im August 2012 bildeten die zehn stärksten SEE-Firmen (die zusammen 88 % der gesamten chinesischen Produktion liefern) die Baotou-

SEE-Handelsplattform. Deren Ziel ist es, eine transparente Plattform zu etablieren, die als globale Referenz für SEE-Preise dienen könnte. Diese Plattform soll im Jahr 2013 ihre Arbeit aufnehmen und auf Tagesbasis Preise und Volumina für ausgewählte SEE aktualisieren.

### Illegaler/Unkontrollierter Bergbau in China

Da die SEE einen relativ hohen Preis pro Einheit haben und in US\$ gehandelt werden, sind sie ein beliebtes Objekt für illegalen Bergbau, Produktion und Export. Chinesische Behörden haben bestätigt, dass das Gesamtvolumen illegaler Exporte (als „unkontrollierte Exporte“ deklariert) in den letzten Jahren auf 10–20.000 Tonnen SEO gestiegen ist. Dies ist eine wesentliche Größe, wenn man dies mit der Export-Gesamtquote in 2012 von 30.200 Tonnen SEO vergleicht.

Deshalb führte das MofCom im Jahr 2012 ein strenges Export-Rechnungswesen ein; mit hohen Strafen für nichtkonformes Verhalten. Dies scheint den gewünschten Effekt in der Reduktion illegaler Exporte zu erreichen.

**Tabelle 8.15** Neue Minimalproduktion und Ausbeuten chinesischer SEE-Firmen. **LREE** leichte Seltenerdelemente; **HREE** schwere Seltenerdelemente. Quelle: © MIIT (August 2012)

Minimum LREE Bergbaukapazitäten:	5.000 t p. a. SEO
Minimum HREE Bergbaukapazitäten:	500 t p. a. SEO
Minimum LREE Kapazitäten zur Trennung von Metallen:	500 t p. a. SEO
Minimum HREE Kapazitäten zur Trennung von Metallen:	3.000 t p. a. SEO
Minimale Trenn- oder Schmelzkapazitäten von Mischkonzentraten:	8.000 t p. a. SEO
Minimum Seltenerdmetall-Schmelzkapazitäten:	2.000 t p. a. SEO
Kein Bergbau auf Monazite, (es sei denn, sie kommen mit einem anderen SEE-Mineral vor)	
Minimale Gewinnung von SEE-Mischkonzentraten aus Bastnäsit:	90%
Minimale Gewinnung von SEE-Mischkonzentraten aus Tonen:	92%
Minimale Gewinnung von Metallen aus chemischen Konzentraten von LREE:	95%
Minimale Gewinnung Metallen der SEE aus Oxiden:	92%

# Chinas Balanceakt

China entwickelt seine reiche Ausstattung mit SEE vornehmlich zum Nutzen des eigenen Landes. Dessen ungeachtet haben die USA, Japan und die EU kürzlich eine Beschwerde bei der Welthandelsorganisation (WTO) vorgebracht mit dem Ziel, diese Quoten und Steuern zurückzunehmen, da sie im Widerspruch zu den WTO-Prinzipien stünden. China wird eine ausgewogene Reaktion darauf entwickeln müssen, um Strafen zu verhindern, die anderenfalls ausgesprochen werden könnten (► Kap. 3).

Im Juli 2012 publizierte China ein Weißbuch zur SEE-Industrie. Darin bekräftigt es das Bekenntnis der Regierung zu den oben erwähnten Veränderungen, um die globale Wettbewerbsfähigkeit der eigenen Industrie vor den neuen Projekten im Rest der Welt zu erhalten.

# 8.7 Japan

Während China etwa 65–70 % des globalen SEE-Bedarfs nutzt, folgt Japan als zweitgrößter Nutzer mit etwa 20 % des globalen Bedarfs (Tabelle 8.16). Dieser Bedarf Japans wird von dem starken Wachstum im globalen Markt für „Hightech“ Produkte wie Hybridfahrzeuge, Videorekorder und Laptop-Computer getrieben. Entsprechend wird Japan ein Hauptzielland für den SEE-Export sein, die im Rest der Welt durch geplante, nichtchinesische Projekte entwickelt werden.

Der gesamte durchschnittliche jährliche Anstieg bei den Importen über die Jahre 2002 bis 2007 lag bei 15 % pro Jahr. In 2008 wurde kein Wachstum verzeichnet, und im Jahr 2009 gab es einen Rückgang um 15 %. Nach einer Erholung um 10 % im Jahr 2010 zeigen die Statistiken deutlich einen weiteren Rückgang um 33 % im

**Tabelle 8.16** Japanischer Gebrauch von SEE-Produkten 2008 bis 2012 (in Tonnen SEO). Quelle: © Rare Earth Metal News (2012)

Endverwendung	2008	2009	2010	2011	2012 <sup>f</sup>
Poliermaterial	12.850	12.850	10.000	3.000	2.000–3.000
Glaszusatzstoffe	2.160–2.770	2.360–2.770	3.700–3.900	2.050–3.200	250–1.670
Phosphore	1.020–1.470	870–1.180	1.160–1.250	875–1.230	870–1.090
Katalysatoren	3.840–4.000	3.540–3.650	4.200–4.710	4.130–4.730	4.640–5.290
Magnete	7.900–8.560	4.080–4.440	6.790–8.080	6.330–6.690	4.940–6.380
Batterien	2.930	3.050–3.170	3.340–3.370	3.340–3.390	3.740–3.840
Eisen, Stahl und Gusserzeugnisse	1.210–2.420	1.210–2.420	1.210–2.420	1.210–1.810	1.210–1.810
Keramiken	150	100–150	200–250	200–300	200–300
Andere	800–900	400–500	400–900	400–700	400–700
Total	32.860–36.050	28.400–31.200	31.000–34.880	20.110–23.480	16.960–22.560



## 8

Jahr 2011 als Folge der chinesischen Restriktionen für Japan und für 2012 die Prognose eines weiteren Rückgangs um 10 %. Auf dieser Basis prognostiziert IMCOA, dass der Bedarf in Japan und Nordostasien sich von 27.500 Tonnen in 2010 auf 21.500 Tonnen in 2016 verringern wird; während der Bedarf in China im selben Zeitraum von 72.500 Tonnen auf 107.000 Tonnen SEO ansteigen wird.

Japan fing bereits zu Anfang dieser Dekade an, wesentliche Mengen von SEE-Magnet- und Batterielegierungen zu kaufen, als diese noch nicht als SEE-Exporte deklariert waren – um seine Abhängigkeit vom chinesischen Markt zu verringern. Jetzt, wo viele dieser Materialien in die Exportquoten integriert sind, verlegen Firmen wie Showa Denko und Hitachi einen Teil ihrer SEE-Produktionskapazitäten nach China und Vietnam, um ihren Zugang zu den SEE zu sichern.

## 8.8 Preise für Seltene Erden

Die Preise stiegen in den Jahren 2010 und 2011 erheblich, vor allem als temporäre Folge steigender globaler Nachfrage, der Verringerung der chinesischen Exportquoten und der stärkeren Durchsetzung von Umweltrichtlinien in China, was zu Kostensteigerungen führt. Diese sind erst in 2012 wegen des exzessiven Preisanstiegs gefallen, was wiederum die Nachfrage abgekühlt hat (Tabelle 8.17). Unserer Meinung nach war 2012 gekennzeichnet durch einen starken Rückgang der Vorräte. Dies bedeutet, dass die Preise kaum weiter fallen werden, weil die Vorräte irgendwann aufgefüllt werden müssen.

China hat bestätigt, dass auch zukünftig SEE-Exportquoten definiert werden. Das

**Tabelle 8.17** Vergleich aktueller SEE-Preise 2011 und 2012. Quelle: © Metal-Pages Ltd (2011–2012). FOB frei an Bord

SEE-Produkte	SEE-Preise US\$/kg FOB China			
	4Q 2011	1Q 2012	2Q 2012	3Q 2012
Lanthanoxid	65	40	25	20
Ceroxid	55	35	25	20
Praseodymoxid	200	155	115	100
Neodymoxid	235	170	115	100
Samariumoxid	90	70	70	60
Europiumoxid	3.750	3.575	2.500	2.000
Gadoliniumoxid	135	100	100	95
Terbiumoxid	2.900	2.600	2.000	1.850
Dysprosiumoxid	2.000	1.350	1.100	950
Yttriumoxid	125	100	125	85

Anmerkung: Zahlen gerundet

Land erweitert zugleich den Umfang dieser Quoten (z. B. schließt dies neuerdings auch Eisen-SEE-Legierungen ein), während diese nach leichten und mittelschweren bis schweren SEE differenziert sind; beide Maßnahmen werden den Nachschub von SEE eingrenzen. Wenn Lynas und Molycorb noch Zeit benötigen, um die Zielkapazitäten zu erreichen, werden die Preise für einige Zeit auf dem derzeitigen Stand verharren.

Der jüngste Rückgang der SEE-Vorräte in der gesamten Versorgungskette wird die Preise vor weiterem Verfall schützen. Daher nimmt IMCOA an, dass die aktuellen Preise auch die zukünftigen repräsentieren – mit Ausnahme von Cer (Ce) und Lanthan (La), von denen ein Überschuss existiert (Tabelle 8.11), was zu weiterem Preisverfall führen wird.

Wie in dem Abschnitt zu Japan gezeigt werden konnte, verursachten die hohen Preise einen deutlichen Rückgang der Nachfrage in den vergangenen drei Jahren. Dessen ungeachtet sollte die Nachfrage tendenziell global weiter steigen, sobald alternative Anbieter zu China verfügbar sind.

## 8.9 Ein Seltenerd-Projekt entwickeln

Die Verringerung der chinesischen SEE-Exportquoten, verbunden mit der unterbrochenen SEE-Versorgung Japans durch China im Jahr 2010, machten das Thema „diversifizierte Versorgung“ zu einem Schlüsselbegriff zur Sicherung der Versorgungsketten, in der die SEE eine kritische Rolle spielen. Die folgende Panik, die besonders den Fürsprechern einiger sich entwickelnder SEE-Projekte helfen mag, wurde bei Themen, die mit dem Aufbau von SEE-Projekten verbunden sind, unterschätzt. Es dauert nämlich in der Regel zwischen sieben und zwanzig Jahren, um ein solches Projekt zu entwickeln. Die Mt. Weld SEE-Lagerstätte wurde zum Beispiel von Molycorp im Jahr 1970 entdeckt. Detaillierte Entwicklungsstudien durch

Ashton Mining fanden von 1990 bis 2000 statt. Eine Produktion wird nicht vor 2013 beginnen – unter Leitung der Lynas Corporation.

### Zehn Schritte von Entdeckung einer Seltenerdlagerstätte bis zu deren Arbeitsfähigkeit

**Schritt 1: Den Nachweis einer Ressource erbringen.** Genau wie bei anderen Bergbau- und Erzverarbeitungsprojekten auch, verlangt der erste Schritt stets, den Nachweis zu führen, dass diese Ressource die Anforderungen des lokalen Aktienmarktes erfüllt sowie die eines professionellen geologischen Instituts. Die Höflichkeit der Ressource und die Verteilung der SEE sind ein Schlüssel für die Verwirklichungschancen des Projektes. Dabei ist eine hohe Konzentration der hochwertigen schweren SEEs äußerst hilfreich. Die Lage des Vorkommens im Hinblick auf verfügbare Infrastruktur (Energie, Wasser, Reagenzien, erfahrende Arbeitskräfte) sind weitere Argumente. Dieser Schritt kann allein 2–5 Jahre oder mehr beanspruchen.

**Schritt 2: Ein Verständnis für die Mineralogie des Vorkommens entwickeln.** Dies kann der problematischste Schritt in der frühen Projektevaluation sein und muss gemeinsam mit der Ressourcenermittlung durchgeführt werden. Die Identifikation der Minerale, die SEE enthalten, ist ein wichtiger Schritt um die Zugänglichkeit des Erzes zu kosteneffizienter Verarbeitung einzuschätzen. Bastnäsit, Monazit und Xenotim sind wohlbekannte SEE-Minerale, und daher wird auch deren weitere Verarbeitung gut verstanden; während die Verarbeitung „neuer“ Minerale sehr wahrscheinlich in hohen Kosten und zeitaufwendigen Entwicklungsversuchen resultiert.

Dabei ist es auch von Vorteil, wenn die Seltenerdminerale nicht zu fein verteilt vorliegen, sodass sie in konventionellen Aufbereitungsschritten wie Flotation, Schweretrennung und Magnettrennung verarbeitet werden können.

## 8

Nach Einschätzung von IMCOA muss eine Erzaufbereitung ein Seltenerdkonzentrat mit nicht weniger als 30 % SEO ergeben, um wirtschaftlich sein zu können; bzw. von etwa 20 %, wenn es sich um schwere SEE handelt. Niedrigere Konzentrationen im Erz haben in der Regel höhere Kosten für die Aufbereitungsschemikalien zur Folge.

**Schritt 3: Studien zur Festlegung des Untersuchungsrahmens.** Dieser Schritt ist nötig, um die Kosten für eine nachfolgende abschließende Durchführbarkeitsstudie (*Definitive Feasibility Study*, DFS) rechtfertigen zu können. Eine solche Studie umfasst:

- eine Ressourcenabschätzung bis zu einem daraus abgeleiteten Niveau,
- einen Prozess, der im Labormaßstab nachweislich funktioniert (möglichst mit zwei Alternativen, die in einer Pilotanlage getestet werden können),
- Vorauswahl einer Lokalität für die Verarbeitungsanlagen,
- grundlegende Umweltstudien,
- eine Abschätzung des Investitionsaufwandes und des Betriebsaufwandes in der korrekten Größenordnung ( $\pm 30\%$ ), um die Durchführbarkeit des Projektes nachzuweisen.

Dieser Schritt benötigt etwa ein bis drei Jahre, besonders wenn ein neuer Prozess für einen neuen Erztyp zu entwickeln ist.

**Schritte 4–6: Pilotanlage – Aufbereitung, Extraktion und Separation.** Der erfolgreiche Betrieb einer (dreistufigen) Pilotanlage ist das Kernstück eines erfolgreichen Projektes. Es ist eine zeit- und geldaufwendige Operation, mit den folgenden Zielen:

- Demonstration der technischen Machbarkeit des Projektes,
- Datenbeschaffung für die DFS,
- Produktion von Proben für Kunden, um den Nachweis zu führen, dass die dreistufige Pilotanlage für mindestens zehn Tage kontinuierlich gearbeitet hat,

- Zusammentragen der Daten für die Umweltverträglichkeitsprüfung, einschließlich ggf. des Nachweises, dass alle SEE Uran und Thorium enthalten, für die akzeptable Entsorgungstechniken nachgewiesen sind.

Dieser Schritt kann 2–10 Jahre in Anspruch nehmen, da der kontinuierliche Betrieb einer Pilotanlage in der Regel eine Reihe technischer Probleme ans Tageslicht bringt, die zunächst gelöst werden müssen, um anschließend den Nachweis der problemlosen Funktion zu führen.

**Schritt 7: Umweltzulassung.** Die Vorbereitung, die öffentliche Begutachtung und die Umweltzulassung eines SEE-Projektes sind keine einfache Angelegenheit. Dennoch sind die Vorteile des darauf basierenden Langzeit-Arbeitsverhältnisses erheblich. Der Extraktionsprozess, die Trennprozesse und damit verbundener Transport und Lagerung von Chemikalien sowie die Aspekte des Umgangs mit radioaktivem Abfall eines Projektes unterliegen jeweils detaillierten Studien der lokalen Umweltbehörden und der Öffentlichkeit. Daraus können zusätzliche Studien der Pilotanlage resultieren, um die detaillierten spezifischen Anforderungen erfüllen zu können.

**Schritt 8: Absichtserklärungen (LOIs).** Um erfolgreich sein zu können, muss eine SEE-Firma ihre eigenen Aktivitäten in die Versorgungskette ihrer Kunden einbinden; dafür bedarf es gegenseitigen Vertrauens. Demzufolge muss der Aufbau von Kundenbeziehungen in der Frühphase des Projektes aufgenommen werden, da Kundenwünsche die Basis für den Betrieb der Pilotanlage sein werden. Deshalb sind grundsätzlich Absichtserklärungen für einen wesentlichen Teil der vorgeschlagenen Produktionsschritte erforderlich, bevor die Pilotanlage schließlich arbeitet und eine abschließende Durchführbarkeitsstudie angefertigt wird.

**Schritt 9: Abschließende Durchführbarkeitsstudie (DFS) und Finanzierung.** Die DFS ist das Dokument, auf dessen Basis die Akquise von Geldern für die Projektweiterführung und -umsetzung erfolgt und wo aus Absichtserklärungen reale Verkaufsverträge werden. Die erforderliche Genauigkeit ( $\pm 15\%$ ) von Investitions- und Betriebsaufwand verlangen, dass 25 % der Entwicklungsarbeit bis zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen sind. Damit können Kosten für die DFS bis zu 8–12 % der Investitionskosten betragen und 18–30 Monate in Anspruch nehmen (in diesem Zeitraum kann eine gewisse Überlappung mit der Arbeit der Pilotablage verbunden sein). So können zum Beispiel die Kosten für eine DFS für ein Projekt mit einer Kapazität von 10.000 Tonnen SEO pro Jahr ohne Weiteres bei 30–50 Millionen US\$ liegen. Darüber hinaus benötigt die SEE-Ressource eine höherwertige Einstufung mit Angaben der gemessenen Reserve, bevor das Projekt finanziert werden kann. Die Finan-

zierung eines SEE-Projektes ist eine komplexe Aufgabe, die 6–12 Monate in Anspruch nehmen kann.

**Schritt 10: Entwicklung, Beschaffung, Konstruktion und Anlaufen der Anlage.** Wie die Abbildung 8.3 zeigt (Lynas Advanced Materials Anlage), ist eine SEE-Produktionsanlage eine komplexe chemische Prozessoperation, die ein fortgeschrittenes Ingenieurniveau verlangt, das mehr einer chemischen Fabrik als einer typischen Bergbaufbereitung ähnelt. Deshalb erfordern die Schritte Entwicklung, Beschaffung, Konstruktion und Anlaufen der Anlage ein hohes Niveau chemischer Kenntnisse sowie der Erfahrung mit Seltenen Erden, die heute außerhalb Chinas nicht ohne Weiteres vorhanden sind. Dieser letzte Schritt der Entwicklung kann durchaus 2–3 Jahre in Anspruch nehmen und der folgende Aufbau der Anlagen bis zur vollständigen Kapazität weitere 2–3 Jahre (Abb. 8.4).

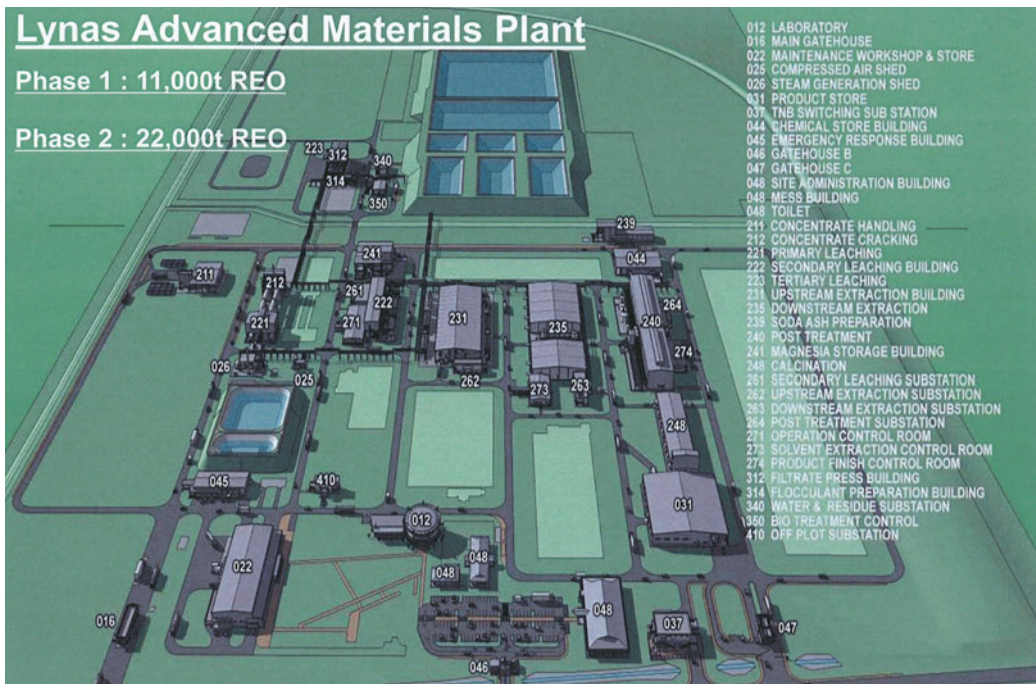
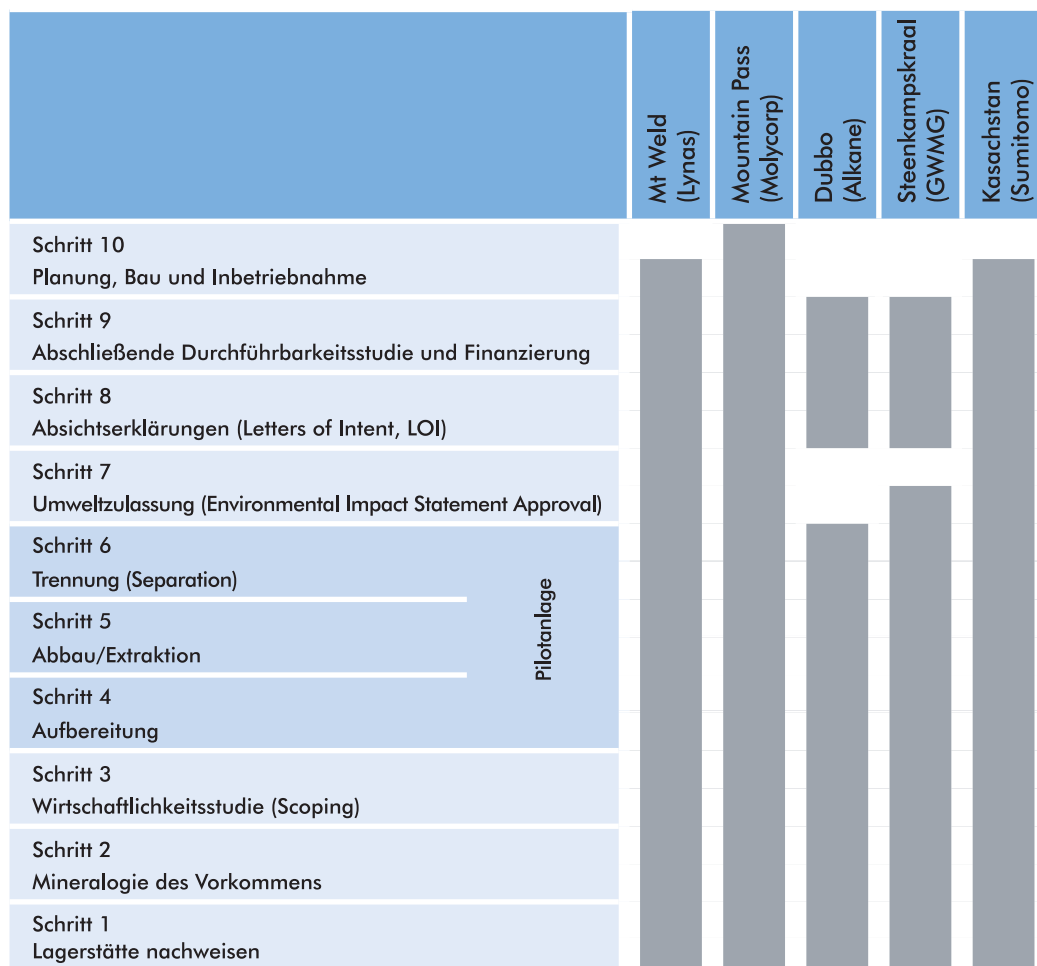


Abb. 8.3 Advanced Materials Anlage. Quelle: © Lynas Corporation Ltd.

## 8

Abb. 8.4 Zehn Schritte bis zur kommerziellen SEE-Produktion



## Kapitalkosten

Die Kapitalkosten (einschließlich des Betriebsvermögens, das nicht außer Acht gelassen werden darf) eines SEE-Projektes sind erheblich; nach Daten der Mountain Pass und Mount Weld Projekte kann dies eine Größenordnung von 40–50.000 US\$ pro Tonne SEO-Jahresproduktion erreichen. Dieser Betrag muss zusätzlich zu den Entwicklungskosten, die oben dargestellt sind, aufgebracht werden.

## Technologien

Die für SEE-Extraktion und -Trennung benötigte Technologie ist einzigartig. Wenn ein Projekt in der Lage ist, technische Unterstützung bei Entwurf, Konstruktion und Betrieb von Bergwerk und Aufbereitungsanlagen zu erhalten, so wird dies Projektrisiken deutlich verringern und die Finanzierung sichern helfen.



## Zeitplan

Die folgende Abschätzung basiert auf der Erfahrung mit derzeit laufenden SEE-Projekten und beginnt mit der Definition einer SEE-Ressource. Um ein Projekt bis zum Abschluss der Machbarkeitsstudie zu führen (einschließlich der Umweltverträglichkeitsprüfung), vergehen schnell sechs Jahre. Zusätzlich ist an die Zeit für Finanzierung und Konstruktion zu denken, so dass mit einem Zeitaufwand von mindestens neun Jahren gerechnet werden muss, bis ein Projekt selbsttätig arbeitet.

Vor dem Hintergrund all dieser Einflussgrößen schätzt IMCOA, dass vor 2016 außer Mt. Weld und Mountain Pass kein weiteres größeres Projekt in Produktion gehen wird. Dennoch mag es durchaus Beiträge zur Produktion im Rest der Welt geben, zum Beispiel durch die Projekte „Dubbo“ (Australien), „Indian Rare Earths“ (Erweiterung finanziert durch Toyota Tsusho) sowie „Steenkampskraal“ (Südafrika). Siehe dazu auch die Abbildung 8.4: Zehn Schritte bis zur kommerziellen Seltenerdproduktion.

## Offenlegung

Dudley J. Kingsnorth erarbeitet durch IMCOA Seltenerdmarkt und -projektentwicklungsberatung für die Firmen: MolyCorp Minerals, LLC (Besitzer des Mountain Pass Projektes), Alkane Resources Ltd (Besitzer des Dubbo Zirconia Projektes), Rare Element Resources Ltd (Besitzer des Bear Lodge Projekt) und Northern Minerals Ltd (Besitzer der John Galt und Browns Range Projekte). Er berät gelegentlich andere Seltenerdfirmen. Diese Beratung ist kostenpflichtig und enthält keine Sonderzahlungen für Erfolg oder Werbung. Mit diesen Formen werden Vertraulichkeitsvereinbarungen getroffen, was jedoch Kommentare zur Information

der Öffentlichkeit nicht ausschließt. IMCOA besitzt Anteile an der Northern Minerals Ltd. und Dudley J. Kingsnorth ist ein Non-Executive Direktor der Northern Minerals Ltd.

## Haftungsausschluss

Die Aussagen in diesem Überblicksbeitrag sind begründete Ansichten der Industrial Mineral Corporation of Australia (IMCOA). Dies schließt Voraussagen, Projektionen, Absichten und Erwartungen ein, die sich so, wie im Folgenden dargestellt, realisieren – oder auch nicht („Zukunftsorientierte Aussagen“). Dies betrifft alle Aussagen in diesem Beitrag, mit Ausnahme der Darstellung historischer Fakten, also zu künftiger Marktentwicklung, Regierungshandeln oder speziellen Ereignissen. Obwohl IMCOA davon überzeugt ist, dass diese Aussagen auf rationalen Annahmen beruhen, können diese zukünftiges Verhalten nicht garantieren. Tatsächliche zukünftige Ergebnisse und Entwicklungen können sich deutlich von den Inhalten der Aussagen unterscheiden. Einflussgrößen, die zu solchen Abweichungen der zukünftigen Wirklichkeit führen, schließen neben Regierungshandeln neue Anwendungen für Seltene Erden, die Entwicklung von Substituten für Seltene Erden oder auch grundsätzliche Veränderungen wirtschaftlicher und geschäftlicher Bedingungen ein. Daher sollten die Stellungnahmen und Aussagen in diesem Beitrag als Leitlinie verstanden werden – weder der Autor noch IMCOA kann für die Richtigkeit garantieren noch irgendwelche Verantwortung für resultierendes Handeln Dritter übernehmen.



## 8

**Quellenverzeichnis**

- MIIT (2012) July/August. Ministry of Industry and Information Technology of the Government of the People's Republic of China. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/index.html>
- Rare Earth Metal News (2012) Japan. <http://rareearthmetals.einnews.com>
- CREIC (2011a) China Rare Earth Information Newsletter Juli 2011 Band 18 Nr. 7. China Rare Earths Information Centre
- CREIC (2011b) China Rare Earth Information Newsletter August 2011 Band 17 Nr. 8. China Rare Earths Information Centre
- Roskill (2011) The Economics of Rare Earths & Yttrium, 14<sup>th</sup> edition, (Roskill Reports on Metals and Minerals). Roskill Information Services Ltd
- USGS (2011a) Mineral Commodity Summaries, January 2011. Rare Earths. S. 128. US Geological Survey. [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare\\_earths/mcs-2011-raree.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2011-raree.pdf). Letzter Zugriff 7.05.2013
- USGS (2011b) Mineral Commodity Summaries, January 2011. Yttrium. S. 184. US Geological Survey. [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare\\_earths/mcs-2011-raree.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2011-raree.pdf). Letzter Zugriff 7.05.2013
- USGS (2012a) Mineral Commodity Summaries, January 2012. Rare Earths. S. 128. US Geological Survey. [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare\\_earths/mcs-2012-raree.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2012-raree.pdf). Letzter Zugriff 7.05.2013
- USGS (2012b) Mineral Commodity Summaries, January 2012. Yttrium. S. 184. US Geological Survey. [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare\\_earths/mcs-2011-raree.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2011-raree.pdf). Letzter Zugriff 7.05.2013
- China Rare Earth Industry Association (2012) China Rare Earth Information (Newsletter) August 2012 Band 18, Nr. 8
- Metal-Pages Ltd (2011–2012) <https://www.metal-pages.com/metalprices/historical/rare-earths/>
- NRDC (2012) National Development and Reform Commission, People's Republic of China. <http://en.ndrc.gov.cn/>
- IMCOA (Industrial Minerals Company of Australia Pty Ltd) Mt Claremont WA, Australia, Estimates and information are taken from IMCOA internal files and personal communication

## Kernaussagen

- Hybridfahrzeuge benötigen z. B. 10–15 kg Seltene Erden (SEE) pro Auto.
- Seltene Erden sind hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit kritische Metalle; rein mengenmäßig kommen sie auf der Erde jedoch gar nicht so selten vor.
- China beherrscht derzeit den Markt für Seltene Erden; die Exportquoten des Landes werden jedoch auch wegen eines höheren Eigenbedarfes sinken.
- Neue Projekte in der westlichen Welt werden helfen, die Abhängigkeit von China zu senken.
- Schwere Seltene Erden (HREE) sind besonders gefragt; sie sind eine wesentliche Voraussetzung für Grüne Technologien. Natürlich sind die HREE sehr viel seltener als die leichten Seltenen Erden.
- Die zu erwartete Entwicklung von Angebot und Nachfrage lässt eine Unterdeckung bei HREE erwarten.
- Das Interesse der Industrie richtet sich auf die HREE; hier muss man mit nochmals 12–20 Jahren für deren Entwicklung rechnen, nachdem eine Lagerstätte gefunden wurde.
- Die technischen Anforderungen für die Trennung der SEE sind enorm; jede Lagerstätte erfordert eigene Lösungen. Die notwendige Metallurgie kann nicht als fertiger Verfahrensprozess eingekauft werden.

# 9 Lagerstätten Seltener Erden in Namibia

*Helmut Mischo*

## 9.1 Namibia als Bergbauland

Namibia als Entwicklungsland im südlichen Afrika erzielt nach offiziellen Verlautbarungen des namibischen Ministry of Mines and Energy (MME 2007–2013) einen wichtigen Teil seines Bruttosozialproduktes und über ein Drittel seines Steuereinkommens aus den Gewinnen bergbaulicher Aktivitäten. War dies in historischer Zeit vor allem die Gewinnung von Diamanten und Halbedelsteinen, Gold (Au), Kupfer (Cu) und Zinn (Sn), so hat sich in den letzten Jahren auch der Uranbergbau als wichtiges Bergbaufeld etabliert (MME 2007–2013; Mischo u. Ellmies 2012).

Bereits vor dem Eintreffen der ersten weißen Siedler wurden verschiedene Reicherzlagerrstätten von lokalen Stämmen gezielt abgebaut und bis über die heutigen Landesgrenzen hinaus vermarktet; so z. B. die Kupferlagerstätten der Region Otavi (Söhne 1967; Vedder 1934). Doch erst während der deutschen Kolonialzeit kam es zu einem ersten regelrechten Bergbauboom im Land. Hier sind insbesondere die Kupferbergwerke in Tsumeb sowie die ab 1908 in der südlichen Namib einsetzende Diamantengewinnung hervorzuheben (Söhne 1967; Schneider 2009). Seit dieser Zeit wurden die bergbaulichen Aktivitäten im Land kontinuierlich auf andere Felder ausgeweitet, wobei der Metallerzbergbau rezessionsbedingt im-

mer wieder unter starken Einbußen zu leiden hatte; zuletzt Ende 2008 mit der zeitweisen Schließung der vier namibischen Kupferbergwerke des Londoner Weatherly International PLC Konzerns, für die jedoch seit 2010 teilweise eine Wiederaufnahme der Fördertätigkeit durchgeführt wird, wenn auch in geringem Umfang und konzentriert auf besonders reichhaltige Lagerstättenteile in den einzelnen Gruben (Mischo 2011).

Trägt der Bergbausektor alleine schon 20 % zum Bruttosozialprodukt und zu über 50 % zu den Exporterlösen bei, so geht circa die Hälfte dessen ausschließlich auf das Konto der Diamantenindustrie. Im Jahr 2008 betrugen die Exporterlöse aus der Diamantengewinnung circa 7,44 Milliarden Namibia Dollar (über 750 Millionen EUR), bei circa 2,2 Millionen Karat an gewonnenen Diamanten. Nach der rezessionsbedingten Flaute im Diamantengeschäft Anfang 2009 und einem Rückgang der Gewinnung auf 0,93 Millionen Karat hat sich der Sektor sehr schnell wieder erholt. Im Jahr 2011 wurden die Zahlen von 2008 noch übertroffen. Bemerkenswert dabei ist, dass über 90 % der in Namibia gefundenen Diamanten Schmuckqualität besitzen und aus diesem Grund pro Karat mit durchschnittlich 370 USD die höchsten Verkaufserlöse weltweit erbringen. Dies liegt bis zu viermal höher als beispielsweise der durchschnittliche Verkaufserlös für südafrikanische Diamanten (MME 2007–2013; Schneider 2009; Mischo 2011).

Relativ unbeschadet vom Auf und Ab auf den Weltmärkten hat sich seit den 1970er-Jahren der Uranbergbau stetig zu einem weiteren wichtigen Bergbauzweig in Namibia entwickelt. Neben den Bergwerken Rössing Uranium (Produktionsbeginn 1976) und Langer Heinrich (Produktionsbeginn 2007) sind zurzeit mit den Projekten Trekoppje, Valencia, Etango und Husab weitere Uranbergwerke in der konkreten Planung bzw. bereits in der Versuchsproduktion, während zeitgleich auf weiteren Lagerstätten intensiv exploriert wird (MME 2007–2013; Mischo u. Ellmies 2012).

Des Weiteren werden in Namibia in je zwei Bergwerken (Scorpion und Rosh Pinah) Zink (Zn), bzw. Mangan (Mn; Otjozondou und Purity Mine) abgebaut, sowie in je einem Betrieb Bergbau auf Flussspat ( $\text{CaF}_2$ ; Okorusu Mine) und Gold (Au; Navachab) betrieben. Ein weiteres Goldbergwerk befindet sich zurzeit im Aufschluss (Auryx). Für die Wiederaufnahme des Zinn-/Tantalbergbaus (Sn/Ta) in Uis liegt ein Bergbau- und Investitionskonzept vor. Gleiches gilt für den Phosphatabbau ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) auf mehreren terrestrischen und marinen Lagerstätten sowie für mehrere Lagerstätten auf Nichteisenmetalle. Hinzu kommt eine Vielzahl von Gewinnungsbetrieben auf Industriemineralen und Werkstein (CoM 2006–2012; MME 2007–2013). Die Abbildung 9.1 zeigt eine Übersicht über die aktuell im Land vergebenen Bergbaulizenzen.

Dieser Beitrag beschäftigt sich vor allem mit den Lagerstätten der Seltenen Erden (SEE) in Namibia, sowie mit den lokalen Gegebenheiten und technisch-infrastrukturellen Herausforderungen, denen sich ein neues Bergbauprojekt in einem afrikanischen Entwicklungsland wie Namibia zu stellen hat. Anhand der Lagerstätte Lofdal, die zurzeit von dem kanadischen Unternehmen Namibia Rare Earth Inc. intensiv exploriert wird, sollen die unterschiedlichen Einflussgrößen und Einschränkungen beispielhaft diskutiert werden.

## 9.2 Die Lagerstätten Seltener Erden Namibias – Ein Überblick

Die SEE-Lagerstätten in Namibia, englischsprachig auch *Rare-Earth-Element (REE) deposits* genannt, kommen sowohl als primäre als auch als sekundäre Lagerstätten vor. Die Primärlagerstätten wurden überwiegend in den Erdzeitaltern Proterozoikum (2.500–540 Mio. Jahre) und Mesoproterozoikum (1.600–1.200 Mio. Jahre), mit dem Schwerpunkt im Damara Orogen gebildet, sowie während einer weiteren Mineralisationsphase im Perm (Schneider 2009). Die Lagerstätten sind hierbei vornehmlich an Karbonatite gebunden, aber auch an granitische und pegmatitische Intrusivgesteine. Diese Lagerstätten finden sich in ganz Namibia in den entsprechenden Intrusivkomplexen, vom Kaokoveld im äußersten Nordwesten über die großen Strukturen im Landesinneren bis in die Region Karasburg und Warmbad im äußersten Süden. Ihre Fortsetzung finden diese Lagerstätten in der nördlichen Karoo-Region Südafrikas.

Die sekundären Lagerstätten wurden bei der Erosion der primären Lagerstätten im Erdzeitalter des Tertiärs (60–2 Mio. Jahre) gebildet, als zeitweise in Namibia ein sehr viel feuchteres Klima herrschte als heute. Diese Seifen-Lagerstätten (*placer deposits*) finden sich vornehmlich in den Nahbereichen der Primärlagerstätten als Schuttmassen oder auch als Ablagerungen von Flüssen, Seen oder dem Meer, z.B. in den Paläo-Flussläufen in der zentralen und nördlichen Namibwüste in den Bereichen des Ugab-Riviers oder der „Langer-Heinrich“ Formation (Burger 1965). Analog zur Bildung der bekannten marinen Diamantvorkommen aus Flusssedimenten nördlich der Oranjemündung, eingetragen durch die Benguela Strömung, finden sich auch nördlich der Mündung der tertiären Flusssysteme marine Sedimente mit abbauwürdigen Mineralgehalten, zum Beispiel bei Cape Cross oder im Baufeld Toscanini. Auch weiter nördlich an der Skelettküste wurden entspre-

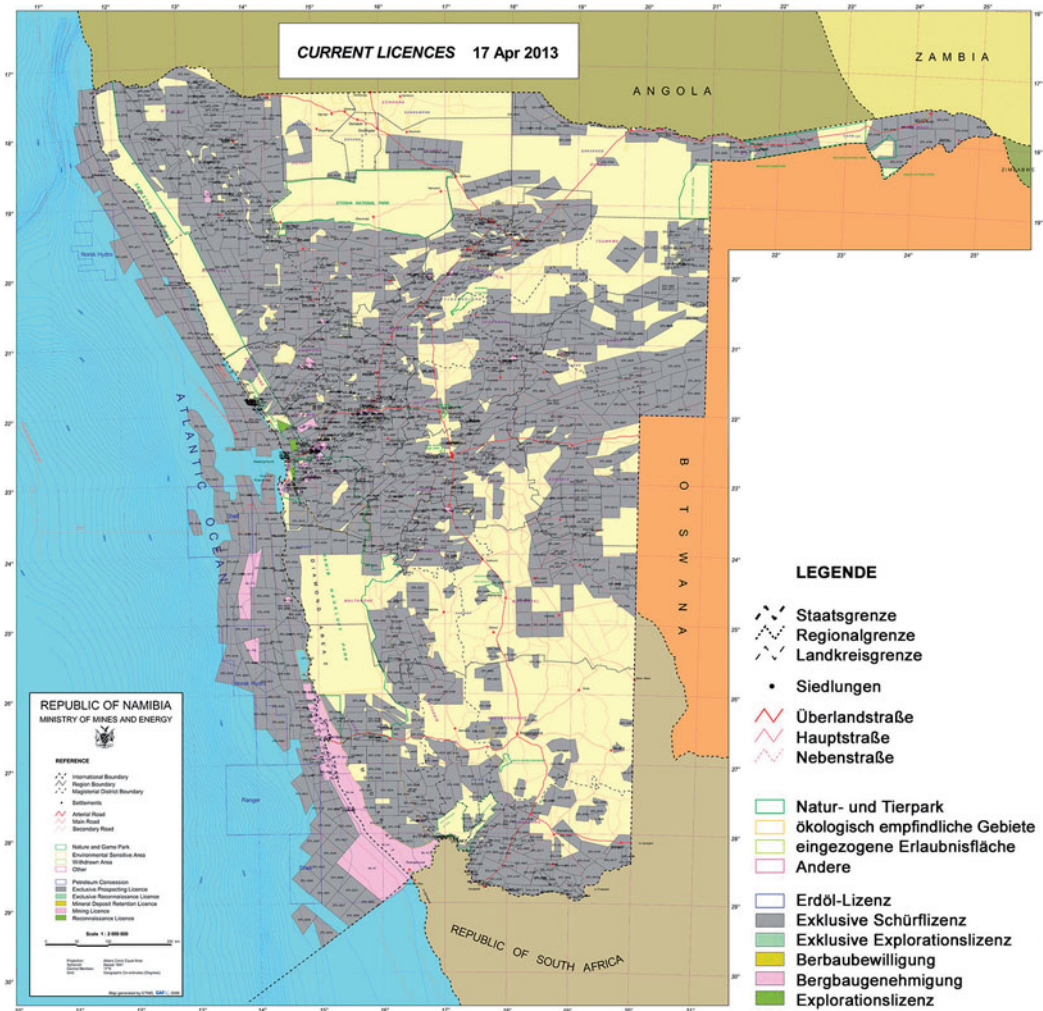


Abb. 9.1 Bergbaulizenzen in Namibia. Quelle: © MME (2013)

chende Lagerstätten nachgewiesen (Diehl 1990; GSN 2008–2011); Schneider 2009).

Betrachtet man die weltweite Versorgungssicherheit mit Rohstoffen, so zeigt sich, dass die verschiedenen politischen und wirtschaftlichen Organisationen für einige der SEE für die kommenden Jahre ein hohes Versorgungsrisiko errechnet haben (► Kap. 8). So hat beispielsweise die Europäische Union ebenso wie die Bundesregierung diese Elemente in die Liste der kritischen Rohstoffe mit aufge-

nommen, und auch das *U.S. Department of Energy* hat z.B. die Elemente Dysprosium (Dy), Terbium (Tb), Neodym (Nd), Europium (Eu) und Yttrium (Y) für die weitere Entwicklung der *Clean-Energy*-Technologien mit einem hohen bis sehr hohen mittel- und langfristigen Versorgungsrisiko (Zeiträume > fünf Jahre) gekennzeichnet (Abb. 9.2).

Generell ist im weltweiten Vergleich der großen SEE-Bergbauprojekte ein Ungleichgewicht zugunsten der leichten SEE zu sehen.



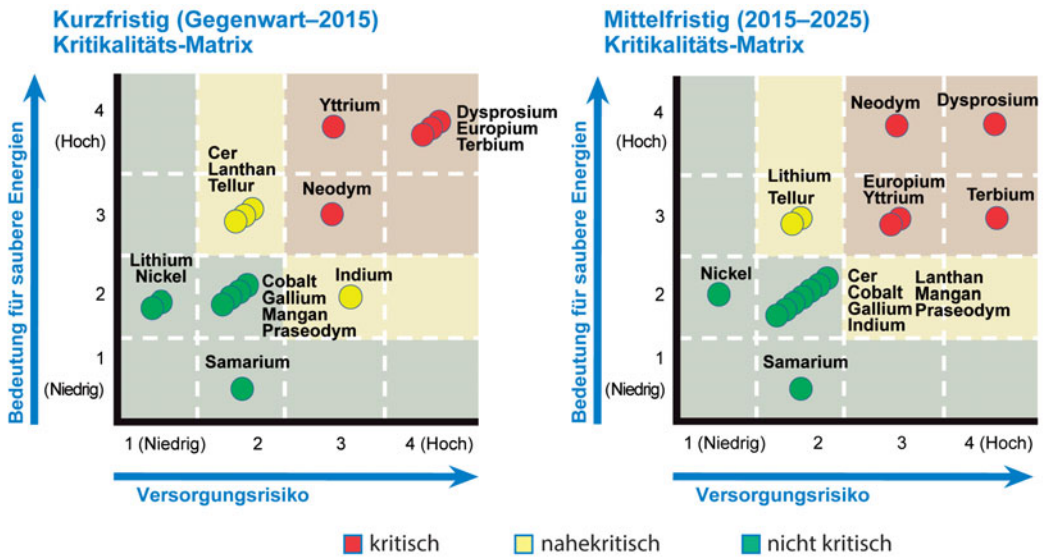


Abb. 9.2 Versorgungsrisiko bezüglich SEE für Clean-Energy-Technologien. Quelle: übersetzt nach DOE (2011)

Die folgende Tabelle 9.1 gibt einen Überblick über die Erzvorkommen und damit die SEE-Verteilung bekannter SEE-Bergwerke und entsprechender neuer Projekte. Bei den in dieser Arbeit betrachteten Lagerstätten in Namibia ist in diesem Zusammenhang hervorzuheben, dass der Anteil der schweren SEE vergleichsweise sehr hoch ist. Hier sticht insbesondere die im Nachfolgenden genauer vorgestellte Lagerstätte Lofdal hervor.

## 9.3 Ausgesuchte SEE-Lagerstätten in Namibia

### Granitische und pegmatitische Lagerstätten

Bei vielen der zahlreichen granitischen und pegmatitischen Intrusivgesteine in Namibia kann eine erhöhte Mineralisation im Gestein selbst oder auch im Nahbereich der

Gangsysteme festgestellt werden. So wurden zum Beispiel entsprechend reiche Vorkommen an Cassiterit (Zinnstein,  $\text{SnO}_2$ ) und Columbit-Tantalit (Koltan:  $[(\text{Fe}, \text{Mn})[\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Sb}]_2\text{O}_6]$ ) bergmännisch abgebaut, zum Beispiel im Tantalite Valley in der Region Warmbad nahe der südafrikanischen Grenze oder in den Tagebauen der Bergwerke Strathmore und Uis auf dem gleichnamigen Pegmatitschwarm in der zentralen Namib, der sich von der Atlantikküste in nordöstlicher Richtung am Brandberg vorbei bis nach Uis zieht. Die Abbildung 9.3 zeigt die Lage der mineralführenden Pegmatitfelder im Schwarm sowie die SEE-reichen Einzelpegmatite im Bereich des ehemaligen Bergwerks Uis in Abbildung 9.4.

In den meisten Pegmatiten sind die Sn-Ta-Mineralisationen auch mit SEE vergesellschaftet; dies wurde insbesondere in Uis und Strathmore nachgewiesen (Genam GmbH 2007–2008). Trotz der teilweise sehr intensiven Bergbautätigkeit – das Bergwerk Uis war bis zum Verfall der Metallpreise in den frühen 1990er-Jahren und der nachfolgenden Schließung des Bergwerks der größte Festgesteins-



**Tabelle 9.1** Erzvorkommen (Gew.%) und SEE-Verteilung bekannter SEE-Bergwerke und neuer Projekte weltweit. Vorkommen mit SEO-Anreicherungen von >10% sind rot dargestellt. Weder Tonnage noch Wirtschaftlichkeit wurden berücksichtigt. Quelle: übersetzt nach © TMR (2011)

Projekt Firma	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	HREO	TREO	H:T
Bear Lodge, USA Rare Element Resources Ltd.	1,08	1,63	0,14	0,41	0,08	0,02	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,11	3,45	3,3%
Cummins Range, AUS Navigator Resources Ltd.	0,46	0,80	0,08	0,27	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,07	1,72	4,0%
Dubbo Alkane Resources Ltd.	0,17	0,33	0,04	0,13	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,14	0,21	0,89	23,3%
Hoidas Lake, CAN Great Western Minerals Group	0,49	1,12	0,14	0,49	0,07	0,01	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	0,09	2,40	3,7%
Kangankunde, MWI Lynas Corp.	1,26	2,11	0,20	0,59	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	4,24	0,7%
Kutessay II, KGZ Stans Energy Corp.	0,03	0,09	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,09	0,17	0,34	48,7%
Kvanefield, GRL Greenland Minerals & Energy	0,29	0,45	0,05	0,14	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,08	0,13	1,07	11,8%
Mount Weld, AUS Lynas Corp.	2,03	3,63	0,40	1,39	0,20	0,05	0,12	0,01	0,05	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,17	0,43	8,08	5,4%
Mountain Pass, USA Molycorp Inc.	2,18	3,22	0,28	0,79	0,05	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	6,57	0,6%
Nechalacho, CAN Avalon Rare Metals Inc.	0,23	0,54	0,07	0,26	0,05	0,01	0,04	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,11	0,21	1,36	15,5%
Nolans Bore, AUS Arafura Resources Ltd.	0,55	1,33	0,16	0,60	0,07	0,01	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,09	2,81	3,3%
Norra Kärr, SWE Tasman Metals Ltd.	0,05	0,12	0,02	0,06	0,01	0,00	0,02	0,00	0,03	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,19	0,29	0,54	52,7%
Sarfartoq, GRL Hudson Resources Inc.	0,32	0,76	0,09	0,29	0,03	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	1,51	2,2%
Steenkampskraal, ZAF Great Western Minerals Group	2,52	5,42	0,58	1,94	0,29	0,01	0,18	0,01	0,08	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,58	0,89	11,65	7,7%
Strange Lake, CAN Quest Rare Minerals Ltd.	0,13	0,27	0,03	0,11	0,03	0,00	0,03	0,01	0,04	0,01	0,03	0,01	0,03	0,00	0,28	0,43	1,00	43,2%
Zandkopsdrift, ZAF Frontier Rare Earths Ltd	0,55	0,96	0,10	0,34	0,05	0,01	0,03	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,09	0,17	2,16	7,8%
Zeus, CAN Matamec Explorations Inc.	0,03	0,07	0,01	0,03	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,05	0,09	0,24	36,9%

**HREO** Schwere Seltenerdoxide; **LREO** Leichte Seltenerdoxide; **TREO** Gesamt Seltenerdoxide (TREO = LREO + HREO); **H:T** Verhältnis von HREO:TREO als prozentualer Anteil

tagebau auf Zinn weltweit – hat die Gewinnung von SEE als beibrechendem Mineral bei den damaligen Bergbauaktivitäten keine Rolle gespielt. In den aktuell durchgeführten Machbarkeitsstudien zur Wiederaufnahme der Bergbauproduktion, jetzt vornehmlich auf Ta, wird diese Möglichkeit, in Verbindung mit einer selektiven Sn-Gewinnung, jedoch intensiv untersucht (Abbn. 9.4 u. 9.5).

Weitere SEE-Mineralisationen in Graniten und Pegmatiten finden sich auch in den Leukograniten der Uranlagerstätte des Bergwerks Rössing sowie im Wlotzkasbaken-Komplex

an der Atlantikküste nördlich Swakopmunds. (SACS 1980). Einige weitere Primärlagerstätten für Uran (U), die im Zuge des aktuellen U-Booms in der Erongo-Region Namibias intensiv prospektiert werden, weisen deutlich erhöhte SEE-Gehalte auf. Auch die Gebiete um Omaruru, Kalkfeld und Sorris-Sorris weiter im Landesinneren, sowie insbesondere der Brandberg-Komplex mit seinen zonierten, phosphatreichen Graniten, weisen hohe SEE-Gehalte auf (Diehl 1992) insbesondere an Yttrium (Y, bis 2000 mgkg<sup>-1</sup>) und Thorium (Th, bis 700 mg kg<sup>-1</sup>).

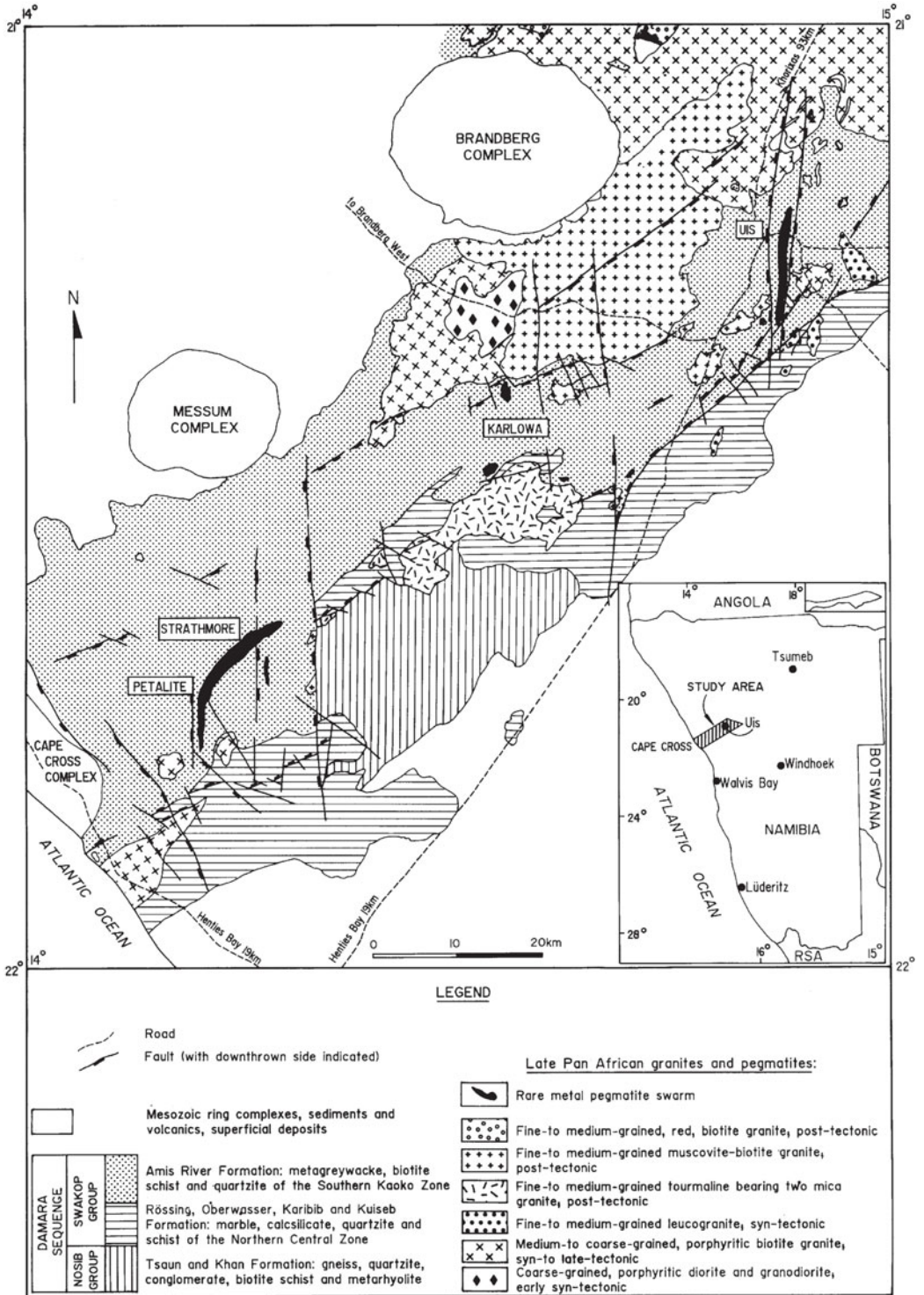


Abb. 9.3 Uis-Strathmore-Pegmatitschwarm. Quelle: Diehl (1990) In: Diehl (1992)

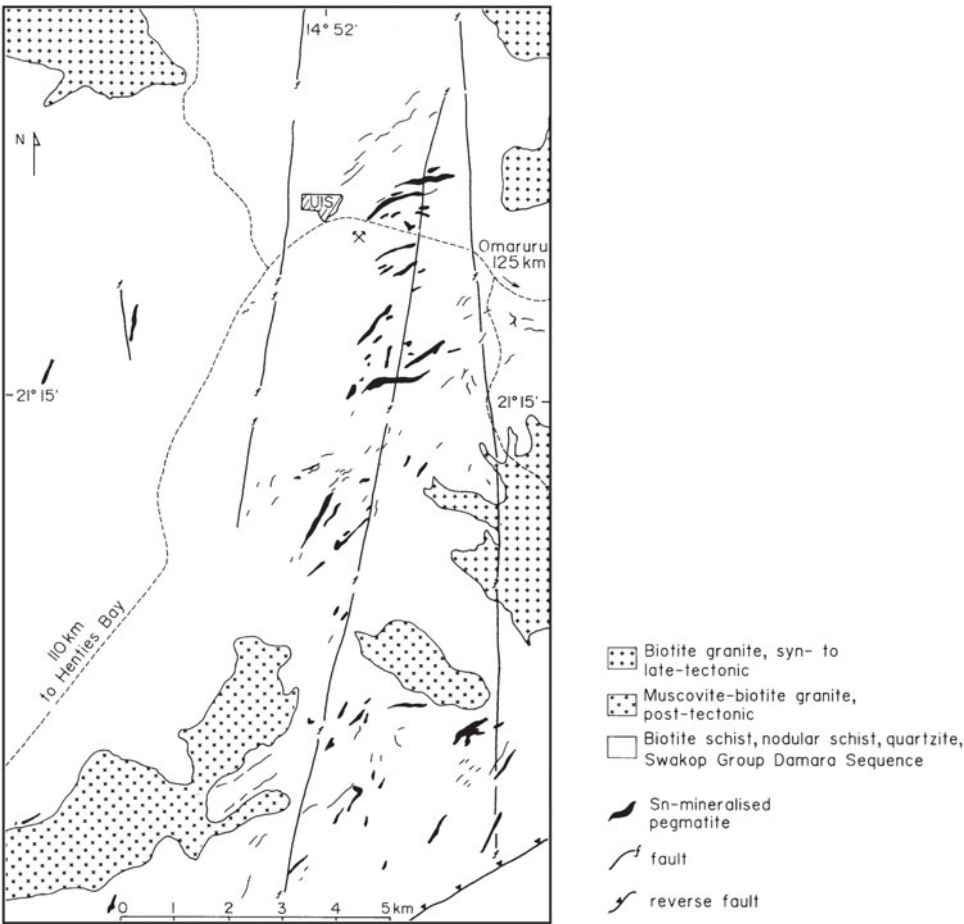


Abb. 9.4 Lage der Zinn-Tantal-Pegmatite mit SEE Vererzung in Uis. Quelle: Diehl (1990) In: Diehl (1992)



Abb. 9.5 Ehemalige Zinn-Tantal-Tagebaue in Uis. Foto: © Helmut Mischo

## 9

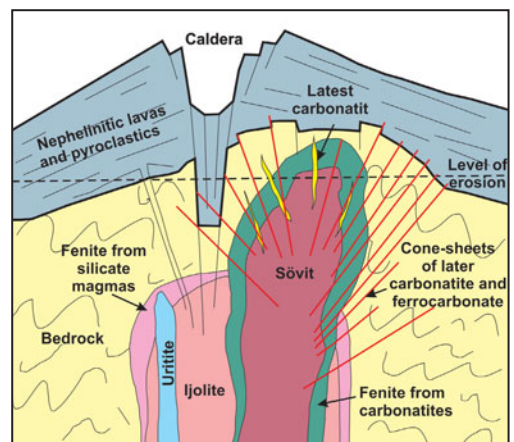
## Karbonatitische Lagerstätten

Der Lagerstättentyp mit dem nach aktuellem Kenntnisstand höchsten SEE-Konzentrationen in Namibia sind die karbonatitischen Lagerstätten (Schneider 2009). Während, wie zuvor dargestellt, die Mehrzahl der lokalen Intrusivgesteine SEE enthalten, treten die ökonomisch interessanten Vorkommen überwiegend in Karbonatiten (Karbonatreiches magmatisches Gestein), Ijoliten (Nephelin- und Augitführendes magmatisches Gestein) und Pyroxenen (Kettensilikat-Minerales magmatischer und metamorpher Gesteine) auf, die ihrerseits häufig mit alkalischen Ringstrukturen verbunden sind. In Namibia finden sich solche großräumigen Strukturen vom Kaokoveld im äußersten Nordosten über die Regionen Okorusu, Kalkfeld und Otjisazu bis zu Marinkas Quelle im äußersten Süden. Deutlich kleinere Intrusivkörper, Dykes und gangartige Strukturen finden sich darüber hinaus im selben Erstreckungsgebiet, z. B. in Swartbooisdrift im Kaokoveld, in Lofdal und Bergville westlich von Khorixas, in der Lagerstätte von Eureka bei Usakos bis hin zur Lagerstätte Garub bei Karasburg im Süden. Einige dieser Lagerstätten werden im Folgenden kurz vorgestellt. Die Abbildung 9.6 zeigt einen Schnitt durch einen karbonatitischen Intrusivkomplex mit assoziierten Gangstrukturen. Die gestrichelte, horizontale Linie stellt dabei exemplarisch das aktuelle Erosionsniveau dar.

**Der Otjisazu-Komplex.** Der Otjisazu-Alkaline-Komplex auf den Farmen Otjisazu 53, Otjisazu Noord 264 und Okarupa 48 (Abb. 9.7) liegt circa 20 km östlich von Okohandja und wurde erstmals in den frühen 1970er-Jahren im Zuge der intensiven Kupferexploration der damaligen Tsumeb Copper Limited (TCL), die damals als Betreiber der Gruben in Tsumeb, Kombat, Matchless und Otjihase sowie der Kupferhütte in Tsumeb der größte Kupferproduzent Namibias war. Nachdem im Zuge einer Explorationsbegehung an der Südwestflanke

des Intrusivkomplexes oxidische Kupfererze geklaubt worden waren, führte man ein oberflächennahes Bohrprogramm mit einer maximalen Bohrlochteufe von 30 m über eine Fläche von circa 1,5 km<sup>2</sup> durch. Die nachgewiesenen Cu-Konzentrationen von 200–600 g je Tonne Erz (= mg kg<sup>-1</sup>) ließen diese Vorkommen als Cu-Lagerstätte als unwirtschaftlich erscheinen. Im selben Bohrprogramm wurden jedoch, vergesellschaftet mit den Cu-Mineralisationen, auch großräumig Apatitkonzentrationen von 3 bis 9 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nachgewiesen, die mit einem errechneten Lagerstätteninhalt von circa 35 Mio. t Erz allein im Bohrfeld in den vergangenen Jahren erneut zu verstärkter Explorationstätigkeit, diesmal auf Phosphate geführt haben. Bei einem geschätzten Alter der Erz-Mineralisation von circa 130 Mio. Jahren geht man heute davon aus, dass die Vererzung erst nachfolgend in den deutlich älteren Karbonatitkomplex eingedrungen ist, wobei generell eine direkte Beziehung von Phosphor (P) und Kupfer (Cu) angenommen wird (Genam 2009).

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass das durchgeführte Bohrprogramm ausschließlich die vordergründig Cu-höflichen Bereiche des Otjisazu-Komplexes erbohrt hat, und dies



**Abb. 9.6** Schematischer Schnitt durch eine karbonatitische SEE Lagerstätte. Quelle: nach © Namibia Rare Earth Inc. (2012)



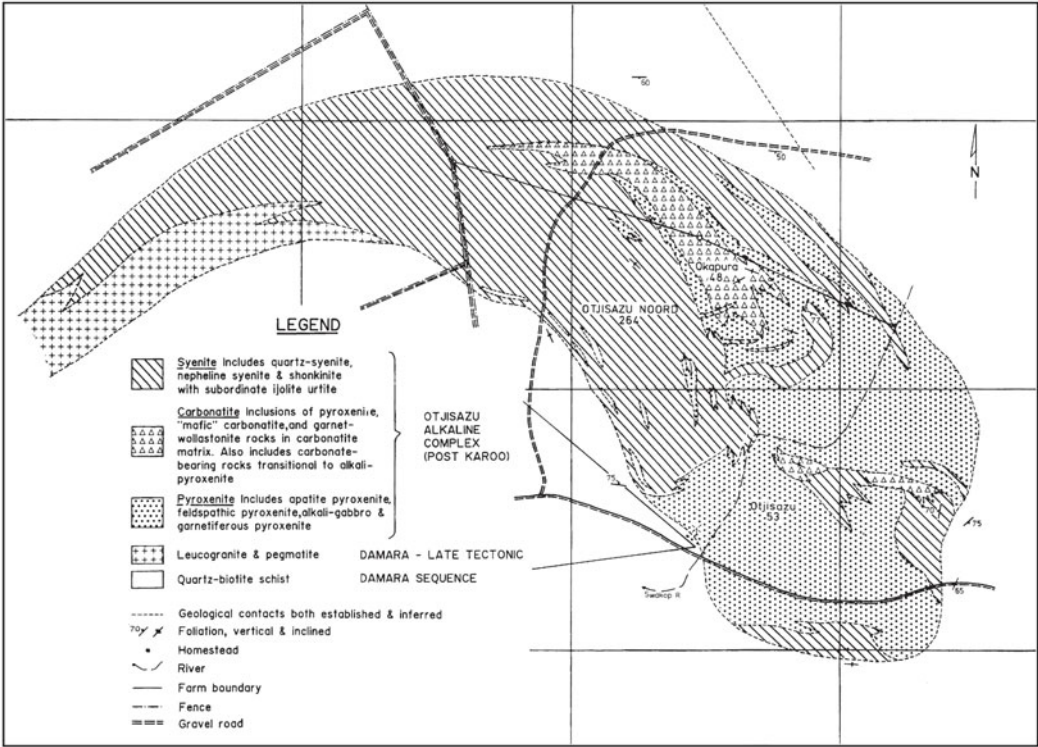


Abb. 9.7 Otjisazu Alkaline Komplex. Quelle: nach Gunthorpe u. Buerger (1977) In: Schneider u. Schreuder (1992)

auch nur bis zur relativ geringen Teufe von 30 m ab Geländeoberkante, erscheint eine deutlich größere Lagerstättenausdehnung der Apatitlagerstätte über den Untersuchungsbe- reich hinaus zumindest wahrscheinlich.

Die in Windhuk ansässige Induberg Otjisazu Pty Ltd, die seit 2008 die Explorationsrechte für diese Lagerstätte innehat, verwies in ihren ersten Explorationsberichten, die hauptsächlich der Validierung der vorgefundenen Alt-Ergebnisse und ersten Probenanalysen dienen, auf deutlich erhöhte Konzentrationen an schweren SEE (*Heavy Rare Earth Elements – HREE*). Diese HREE wurden in der Regel in denjenigen Proben gefunden, in denen Erz mit Cu-Gehalten größer  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  und Apatitgehalten größer 3 Gewichts-% nachgewiesen wurden (Genam GmbH 2007–2008; Induberg Otjisazu 2009, 2010). Eine ge-

plante intensive Exploration des Gesamt-intrusivkörpers und eine neue Bohrkampagne sind allerdings nach Kenntnis des Verfassers bis dato nicht durchgeführt worden.

Die Lage der nachgewiesenen Cu- und Apatitzerzkörper direkt im und am Flussbett des Swakop Riviers und 10 km stromaufwärts des Von-Bach-Dammes als zentralem Element der Trinkwasserversorgung der Hauptstadt Windhuk lassen es allerdings als fragwürdig erscheinen, ob hier trotz der vergleichsweise guten infrastrukturellen, logistischen und sozioökonomischen Randbedingungen ein intensivierte Explorations- oder sogar ein Bergbauprojekt genehmigungsfähig und durchführbar wäre (Anm. des Verfassers: Ein Rivier ist ein Trockenfluss, der i. d. R. nur nach Starkregenereignissen Wasser führt, dann allerdings häufig als Hochwasserlage).

9

Eine besondere Herausforderung aus bergtechnischer Sicht ist es, eine bergbauplanerisch und maschinentechnisch nachhaltige Betriebsorganisation zu entwickeln, die mit gleichbleibend hoher Produktivität auch bei Starkregenereignissen (bis  $80 \text{ mm h}^{-1}$ ) eine langfristig sichere Beherrschung des die Lagerstätte durchfließenden Swakop-Trockenflusses gewährleistet. Neben den Umweltschutzgesichtspunkten bei Aufbereitung, Lagerung und Haldenwirtschaft – die Lagerstätte liegt stromaufwärts des größten Trinkwasserstausees Namibias – ist insbesondere die Sicherstellung einer langfristigen und unterbrechungsfreien Stromversorgung zu nennen. Auch wenn die Otjisazu-Lagerstätte infrastrukturell leicht an das bestehende namibische Stromnetz angebunden werden kann, muss davon ausgegangen werden, dass die akuten Versorgungsengpässe im südlichen Afrika in den kommenden Jahren auch Namibia erfassen werden.

**Die Eureka-Karbonatite.** Eine weitere bekannte SEE-Lagerstätte sind die Eureka-Karbonatite auf der Farm Eureka, circa 38 km westlich der Stadt Usakos am östlichen Rand der Namibwüste. Mitte der 1950er-Jahre im Zuge einer landesweiten Explorationskampagne auf Uran (U), Thorium (Th) und Blei (Pb) entdeckt, wurde diese Lagerstätte auch aufgrund ihrer außergewöhnlich großen Monazitkristalle (SEE-reiche Phosphatmineralgruppe) in Fachkreisen diskutiert. Ursprünglich als Skarnlagerstätte (Skarn = metamorphes Gestein) identifiziert, zeigten nachfolgende Untersuchungen auf Basis der Strontium (Sr)-Isotopenverhältnisse die Entstehung der karbonatitischen Dykes aus Mantelmaterial. Um einen zentralen Sövit-Dyke gruppieren sich mehrere karbonatitische Dykes (von Knorring u. Clifford 1960). Hier konnten zwei Hauptmineralisationsphasen nachgewiesen werden, die sich hauptsächlich in ihren Absolutgehalten an SEE unterscheiden. Vereinzelt wurden dabei in dem unzonierten Erzkörper SEE-Gehalte von bis zu 33–40 Gewichts-% nachgewiesen (Schneider 2009). Der

durchschnittliche SEE Gehalt der Dykes ist in Tabelle 9.2 wiedergegeben.

Ein Bohrprogramm im Jahre 1989 hat für die Eureka-Karbonatite ein Gesamtvorkommen von 30.000 Tonnen Erz bis zu einer Teufe von 20 m nachgewiesen. Daraus errechnet sich ein SEE-Gehalt von etwa 1.900 Tonnen. Eine planmäßige bergmännische Gewinnungstätigkeit hat mit Ausnahme von Kleinbergbau auf Halbedelsteine auf dieser Lagerstätte bisher nicht stattgefunden.

**Der Okorusu-Alkaline-Komplex.** Der Okorusu Alkaline-Komplex liegt etwa 50 km nord-nord-östlich von Otjiwarongo. In der großflächigen Intrusivstruktur von ca. 12 km Durchmesser sind insbesondere die Flussspatgänge ( $\text{CaF}_2$ ) des südlichen Ringabschnittes, die in mehreren Tagebauen durch die Solvay Okorusu Ltd gewonnen werden, sowie in Zukunft möglicherweise auch die limonitischen Eisenerzlager von wirtschaftlicher Bedeutung (Limonit = Fe-haltiges Mineral:  $[\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}]$ ). Die SEE-führenden Dykes im Okorusu-Komplex

**Tabelle 9.2** Mittlere SEE-Konzentration (Gewichts-%) in den Monaziten der Eureka-Karbonatite. Quelle: nach © Dunai (1992)

Element	Konzentration in Gewichts-%
La	20,6
Ce	22,7
Pr	2,4
Nd	5,9
Sm	0,4
Eu	0,06
Tb	0,00508
Dy	0,00840
Lu	<0,0017
$\text{ThO}_2$	0,7
$\text{U}_3\text{O}_8$	0,01



haben teilweise eine streichende Erstreckung von bis zu 300 m bei bis zu 20 m Mächtigkeit. Der SEE-Inhalt in den unzonierten Erzkörpern liegt bei relativ geringen 1,7 bis 7%, mit hohen Y- und Th-Gehalten. Bezogen auf den SEE-Gesamtinhalt zeigt die Tabelle 9.3 die typische Elementverteilung. Hervorzuheben ist der hohe Gehalt an schweren SEE.

Zurzeit liegen keine Konzepte zur bergmännischen Gewinnung der primären SEE-führenden Erzkörper vor. Da sich jedoch auch, ähnlich wie in Otjisazu, eine hohe Affinität der SEE-Oxide zu den Phosphaten in der Lagerstätte nachweisen lässt, sind jedoch Machbarkeitsstudien über ein selektives Aushalten der SEE als beibrechendes Mineral bei einer möglichen Phosphatgewinnung aus den Tailings der Flussspataufbereitung durchgeführt worden (Abb. 9.8).



**Abb. 9.8** Flussspatbergwerk Okorusu mit Aufbereitungsanlage und Tailings. Foto: © Mark Dawe

**Tabelle 9.3** Verteilung des mittlerer Gehalt innerhalb der SEE-Oxide der Okorusu-Lagerstätte. Quelle: nach © Hoffmann (1992)

Element	Gehalt Probe 1	Gehalt Probe 2	Gehalt Probe 3
La	36,12	35,75	28,67
Ce	48,17	46,49	45,53
Pr	3,18	3,35	2,56
Nd	9,50	10,17	14,33
Sm	0,68	0,78	1,50
Eu	0,15	0,18	0,36
Gd	0,39	0,40	0,87
Tb	0,05	0,06	0,15
Dy	0,26	0,33	0,79
Ho	0,05	0,07	0,17
Er	0,10	0,17	0,53
Tm	0,01	0,03	0,17
Yt	0,03	0,12	0,59
Lu	0,01	0,01	0,08

## 9

**Der Lofdal-Komplex.** Eine der bekanntesten und in den vergangenen Jahren am intensivsten explorierten und publizierten SEE-Lagerstätten im südlichen Afrika ist der Lofdal Karbonatitkomplex auf den Farmen Lofdal und Bergville, ca. 30 km westlich von Khorixas im Damara-land und etwa 400 km nordwestlich von Windhuk gelegen (Abb. 9.9). Die Firma Namibia Rare Earth Inc., welche die Explorationsrechte hält und das Gebiet zurzeit untersucht, ist ein Spin-Off der kanadischen Etruscan Resources Inc. Gruppe, die das Areal ursprünglich auf der Suche nach Goldlagerstätten prospektierte. Namibia Rare Earth Inc. exploriert darüber hinaus auch auf anderen Lagerstätten in Namibia.

Als das aktuell hinsichtlich seiner möglichen technischen Realisierung am weitesten entwickelte SEE-Projekt in Namibia sollen an diesem Beispiel auch die Aufgaben und Herausforderungen, denen sich ein solches neues Bergbauprojekt in einem afrikanischen Entwicklungsland wie Namibia ausgesetzt sieht, kurz dargestellt werden.

Der Lofdal-Lagerstättenkomplex erstreckt sich über eine Fläche von etwa 20 x 10 km. Die

Lagerstätte wurde 1969 erstmals beschrieben, und eine Anreicherung mit SEE ist seit 1982 bekannt (Schneider 2009). Bis heute wurden drei karbonatitische Hauptintrusive, eine Vielzahl von schlauchförmigen Kleinintrusiven (sogenannten Plugs) und mehrere Dutzend steilstehender Erzgänge identifiziert. Im Zuge der ersten Prospektionskampagnen der kanadischen Firma Etruscan Resources Inc. wurden die Ausbisse der Erzgänge, die sich aufgrund der höheren Erosionsfestigkeit im Vergleich zu den benachbarten Sedimenten mauerartig aus der Landschaft erheben (Abb. 9.10), mittels Handklauung beprobt. Die Mächtigkeit dieser Erzgänge schwankt dabei von einigen Dezimetern bis zu wenigen Metern, die Mehrzahl liegt im Meterbereich. Die Streichlänge am Ausbiss liegt bei



**Abb. 9.9** Lizenzgebiete der Namibia Rare Earth Inc. Quelle: © Namibia Rare Earth Inc.



**Abb. 9.10** Ausbiss der Erzgänge auf Lofdal. Foto: © Rainer Ellmies

den meisten Erzgängen bei mehreren Dutzend bis Hunderten Meter, einzelne Erzgänge wurden aber auch über mehrere Kilometer verfolgt.

Insgesamt wurden über 3.400 Proben durch Handklaubung gesammelt (*boot and hammer*) und in verschiedenen Laboren in Südafrika, in Kanada und auch in Deutschland bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) untersucht. Gerade die BGR hat im Rahmen der technischen Entwicklungszusammenarbeit zwischen Deutschland und Namibia mit ihren Fachleuten vor Ort maßgeblich die ersten Phasen der Exploration begleitet.

Bei einer Vielzahl der im Feld gesammelten Proben konnten teilweise sehr hohe SEE-Anreicherungen mit einem bemerkenswert hohen Anteil an Schweren Seltenen Erden (HREE), nachgewiesen werden. Die Abbildung 9.11 zeigt die Verteilung der HREE-Anreicherungen im Untersuchungsgebiet. Auffallend ist, dass sich die hochmineralisierten Zonen zumeist be-

stimmten Erzgängen zuweisen lassen, während andere ebenfalls beprobte Erzgänge in der direkten Nachbarschaft deutlich geringere und teilweise auch nur marginale Anreicherungen aufweisen.

Auch wurden teilweise hohe HREE-Konzentrationen in den Erosionszonen um die Hauptintrusivkörper gefunden. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden in den Jahren 2008 und 2011/2012 zwei Bohrkampagnen mit insgesamt 9.500 m beziehungsweise 6.000 m Kernbohrungen durchgeführt, um die Lagerstätte weiter zu erkunden (Etruscan Resources 2009–2012). In einigen der untersuchten Areale wurden auch hierbei hohe HREE-Konzentrationen nachgewiesen. Allerdings musste festgestellt werden, dass sich die Vererzung im Überblick als sehr unsystematisch darstellt. Insgesamt ist die Lagerstättenstruktur im gesamten Untersuchungsareal als sehr komplex zu bezeichnen. Zurzeit werden auf Basis der Untersuchungsergebnisse zwei

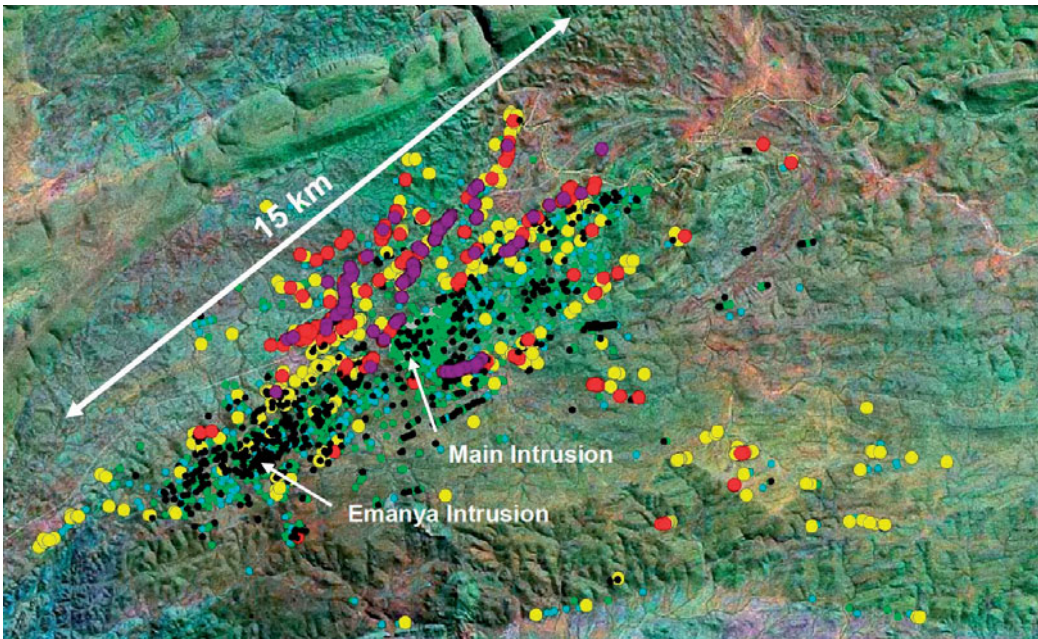


Abb. 9.11 Räumliche Verteilung der Anreicherungen an HREE auf Basis der Feldbeprobung. HREE Anreicherung: Gelb = >50%; Rot = >75%; Lila = >90%. Pfeile zeigen die Hauptintrusionskörper und Emanya Intrusionskörper. Quelle: © Namibia Rare Earth Inc. (2012)



9

Theorien zur Mineralisation diskutiert, nach denen entweder die Hauptintrusivkörper und Plugs selbst oder aber die benachbarten Erzgänge, die vermutlich jüngeren Ursprungs sind, die Haupterzbringer darstellen. Insgesamt konnten im untersuchten Areal bis dato 16 Reichvererzungen identifiziert werden. Aufgrund der hohen Komplexität der Lagerstätte konzentrieren sich die aktuellen Untersuchungen auf das Areal 4, zu dem Ende des zweiten Quartals 2013 der IN 43-101 kompatible Lagerstättenbericht mit einer stichhaltigen Bewertung des Lagerstätteninhalts vorgelegt werden soll. Die Abbildungen 9.12 und 9.13 zeigen einen Ausschnitt der Untersuchungen des Plugs im Areal 4.

Die bestehenden Unsicherheiten über Entstehung und geologische Strukturierung der Lagerstätte lassen zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Aussage über die Gesamtinhalte und

Ausdehnung der wirtschaftlich gewinnbaren Lagerstätte zu (Long 2013). Namibia Rare Earth Inc. verweist in seinen periodischen Veröffentlichungen auf die herausragend hohe Mineralisation mit HREE, die auch aufgrund des hohen Anreicherungsgrades im Erz zu den höchsten der Welt zählen sollen. Die Daten der vorliegenden Probenanalysen stützen diese Vermutung. Stellt man die SEE-Gehalte von Lofdal denen von Norra Karr, einer ebenfalls hochmineralisierten HREE Lagerstätte der kanadischen Tasman Metals in Schweden gegenüber, so zeigt sich, dass die Mineralisation in Lofdal zwar sehr viel höher liegt (94,5 % HREE gegenüber 52,7 %), dies allerdings zu einem guten Teil dem hohen Y-Gehalt geschuldet ist, dessen zukünftige wirtschaftliche Bedeutung zurzeit noch nicht abgeschätzt werden kann (Abb. 9.14).

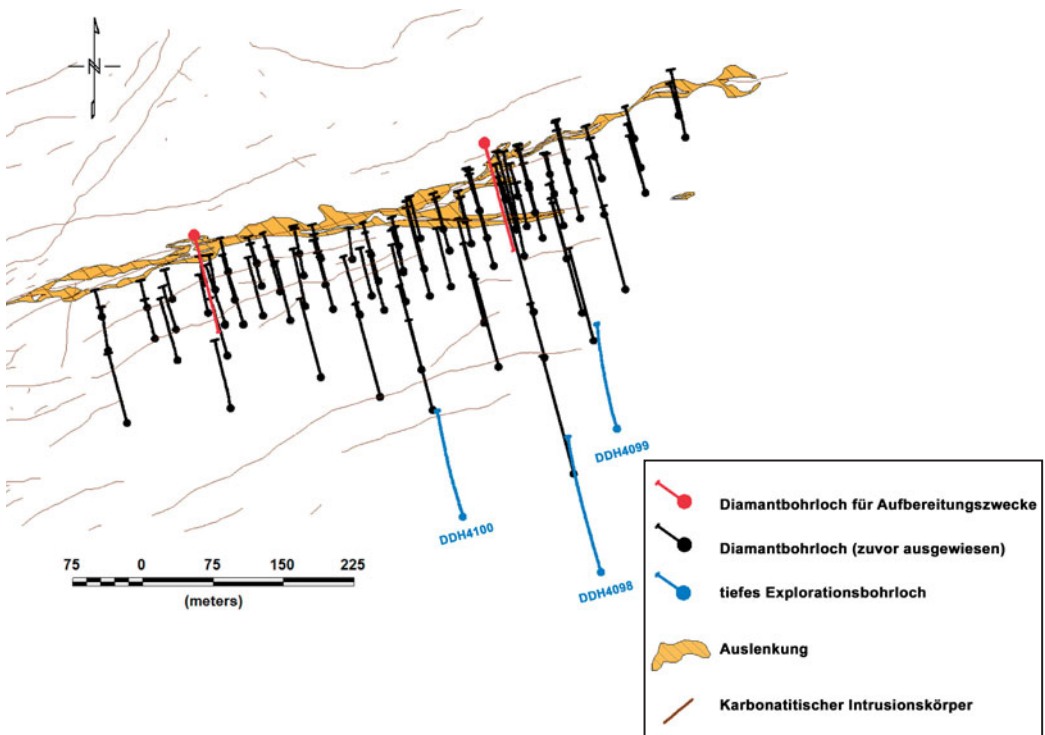


Abb. 9.12 Ergebnisse der Bohrkampagne im Areal 4. Quelle: übersetzt nach © Namibia Rare Earth Inc. (2012)

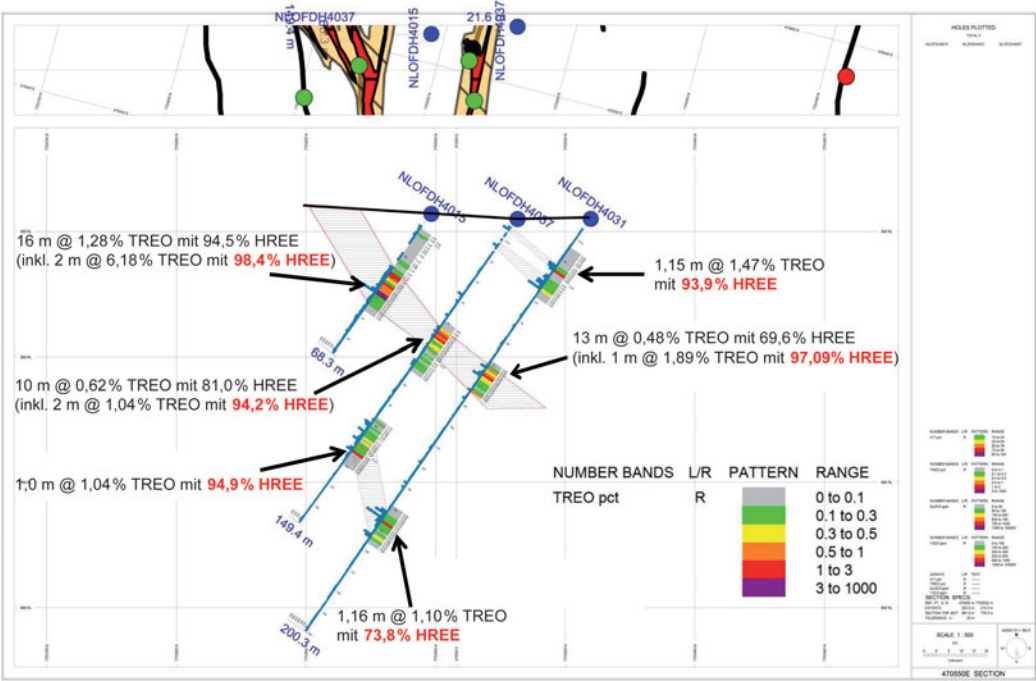


Abb. 9.13 Ergebnisse der Bohrkampagne im Areal 4. Quelle: übersetzt nach © Namibia Rare Earth (2012)

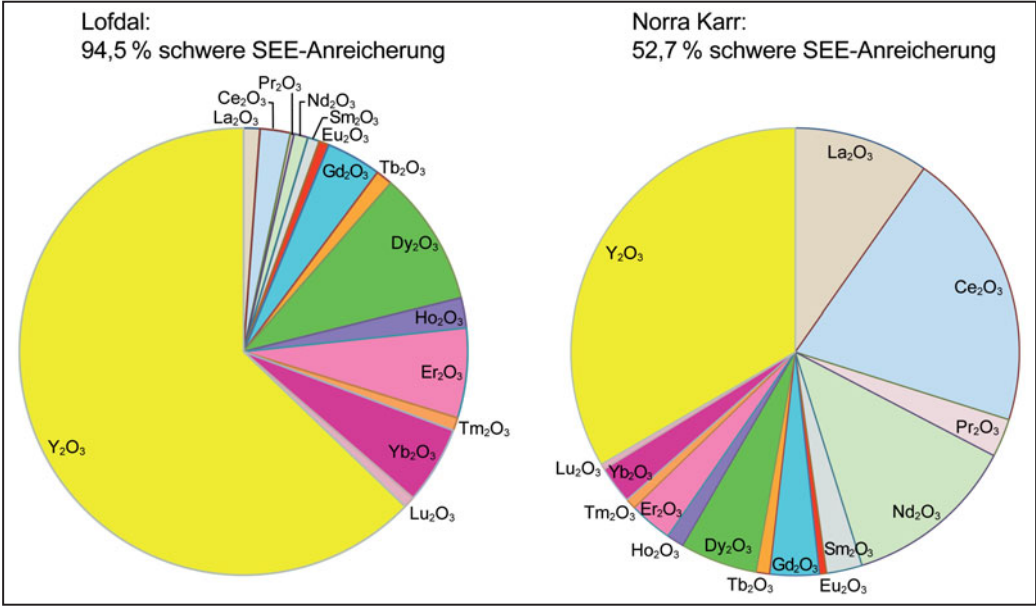


Abb. 9.14 Vergleich der schweren SEE-Gehalte von Lofdal (Namibia Rare Earth Inc.) mit denen von Norra Karr (Tasman Metals Ltd.). Quelle: übersetzt nach © Namibia Rare Earth Inc. (2012)



## 9 9.4 Entwicklung einer SEE-Lagerstätte zu einem Bergwerksprojekt in einem Entwicklungsland

### Gewinnungstechnik

Die Auswahl geeigneter Gewinnungsmethodik und der entsprechenden Bergbautechnologie hängt in erheblichem Maße von den weiterführenden Explorationsergebnissen und der damit

einhergehenden Bestätigung der Hauptvererzung in den Intrusivkörpern, in den Plugs bzw. in den Gangstrukturen ab.

In den Hauptintrusivkörpern würden mit einer herkömmlichen Tagebautechnik bereits erhebliche Erzmassen erschlossen, ehe die Geometrie eines solchen Tagebaus und das Abraum-zu-Erz-Verhältnis eine Weiterführung der Gewinnung in die Tiefe unrentabel werden lassen. Bei den lang gestreckten, geringmächtigen Plugs würde diese Grenzteufe sehr viel schneller erreicht werden (Abb. 9.15), während in den geringmächtigen, allerdings hoch-

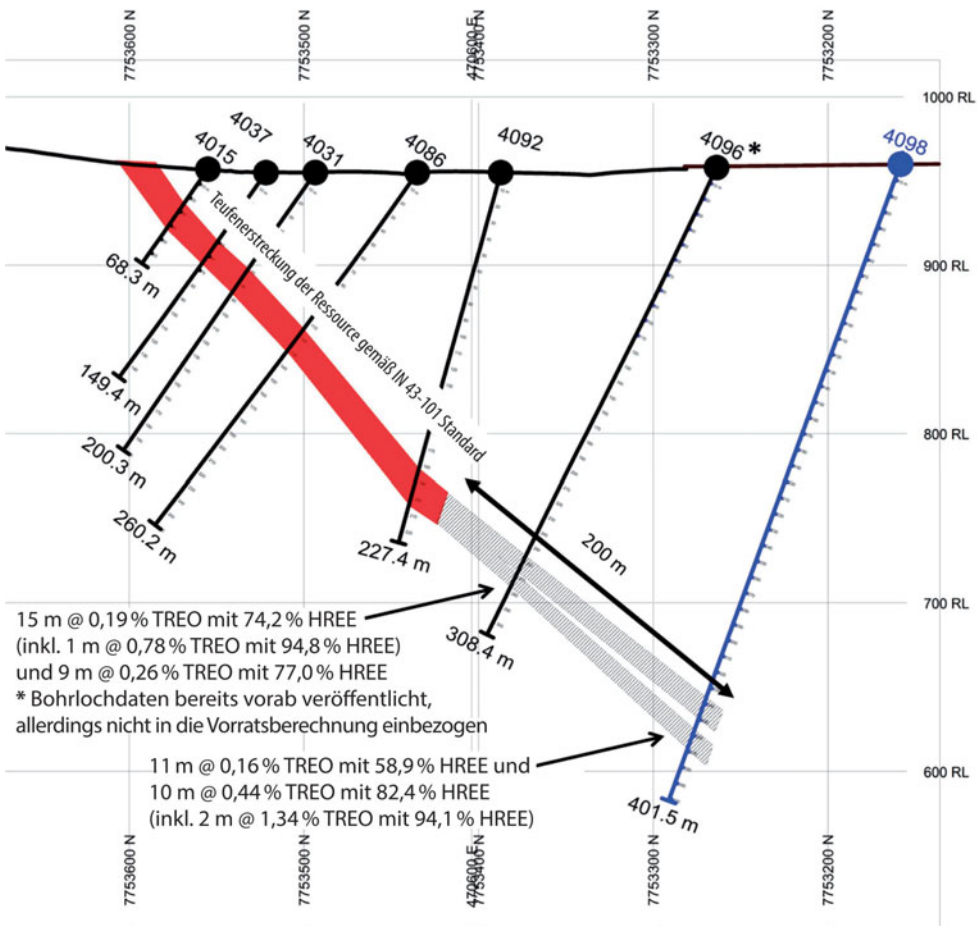


Abb. 9.15 Ergebnisse der Bohrerkampagne im Areal 4. Grenzen für die erste 43-101 Ressource werden in rot markiert. Die 200 m Teufenerstreckung im Einfallen des Erzganges in grau schraffiert. Quelle: © Namibia Rare Earth Inc. (2012)

vererzten Gangstrukturen eine Gewinnung im Tagebau nur im direkten Nahbereich der Ausbisse sinnvoll erscheint, ehe die zu bewegendes Abraummassen eine solche Abbaumethode unwirtschaftlich werden lassen. Die Abbil-

dung 9.16 zeigt beispielhaft solche Ausbisse. Den überproportionalen Anstieg der zu bewegendes Abraummassen bei zunehmender Teufe eines Tagebaus auf steilstehenden Ganglagerstätten zeigt die Abbildung 9.17.



Abb. 9.16 a–b Ausbiss eines (a) geringmächtigen Reicherzganges in Lofdal und (b) mächtigen Reicherzganges in Lofdal. Fotos: © Namibia Rare Earth Inc.

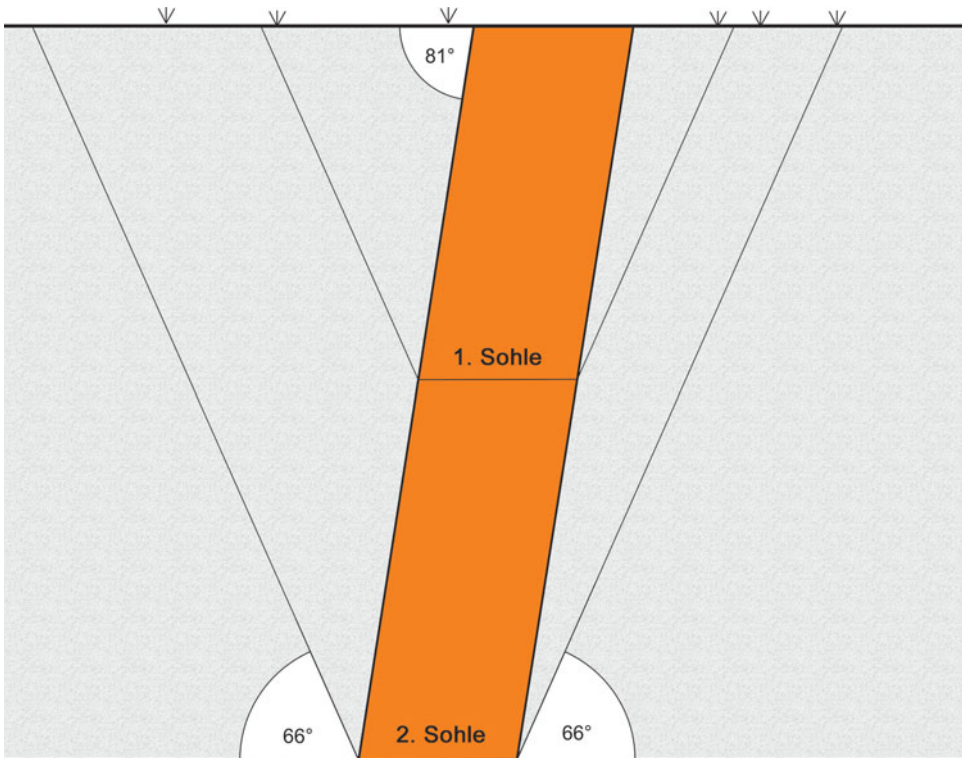


Abb. 9.17 Zunahme der Abraummassen (grau) im Grabenaufschluss zunehmender Teufe bei Gewinnung eines steilstehenden Erzganges im Tagebau

9

Für die Gewinnung einer solchen Ganglagerstätte im Tiefbau würde sich nach heutigem Stand der Technik ein modifizierter Teilsohlenbau (*cut and fill*) anbieten. Aufgrund der sehr geringen Mächtigkeit des Erzkörpers wäre aber selbst beim Einsatz kleinster Maschinengrößen das Hereingewinnen zusätzlichen Nebengesteins zur Schaffung eines ausreichenden Arbeitshohlraumes notwendig. Um die hierdurch hervorgerufene Verdünnung des gewonnenen Erzes zu minimieren, müsste entweder in mehreren Verfahrenszügen selektiv gewonnen werden, oder es käme ein modifizierter Teilsohlenbau zum Einsatz, bei dem neben den Ausrichtungsgrubenbauen nur die horizontalen Teilsohlenstrecken im Erzkörper in ausreichender Breite aufgefahren werden, während der geringmächtige Erzkörper selbst zwischen

den Teilsohlen durch entsprechende akkurate Bohr- und Sprengtechnik hereingewonnen würde. Das Schema eines solchen Abbaus zeigt Abbildung 9.18.

Neben der Notwendigkeit, zur Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit eines solchen Verfahrens eine sehr anspruchsvolle und qualitativ sehr hochwertige bergmännische Gewinnungstätigkeit durchzuführen, ist auch die Bewetterung einer Tiefbaugrube ein Problem eines solchen Verfahrens. Neben der Versorgung der Belegschaft unter Tage mit Frischwettern erfordert der Einsatz moderner dieselgetriebener Technik gewisse Mindestwettervolumenströme. Hinzu kommt die Wettermenge, die notwendig ist, um das im Erz enthaltene radioaktive Thorium (Th), das bei der mit der Gewinnung einhergehenden Kornzerstörung als Staub frei-

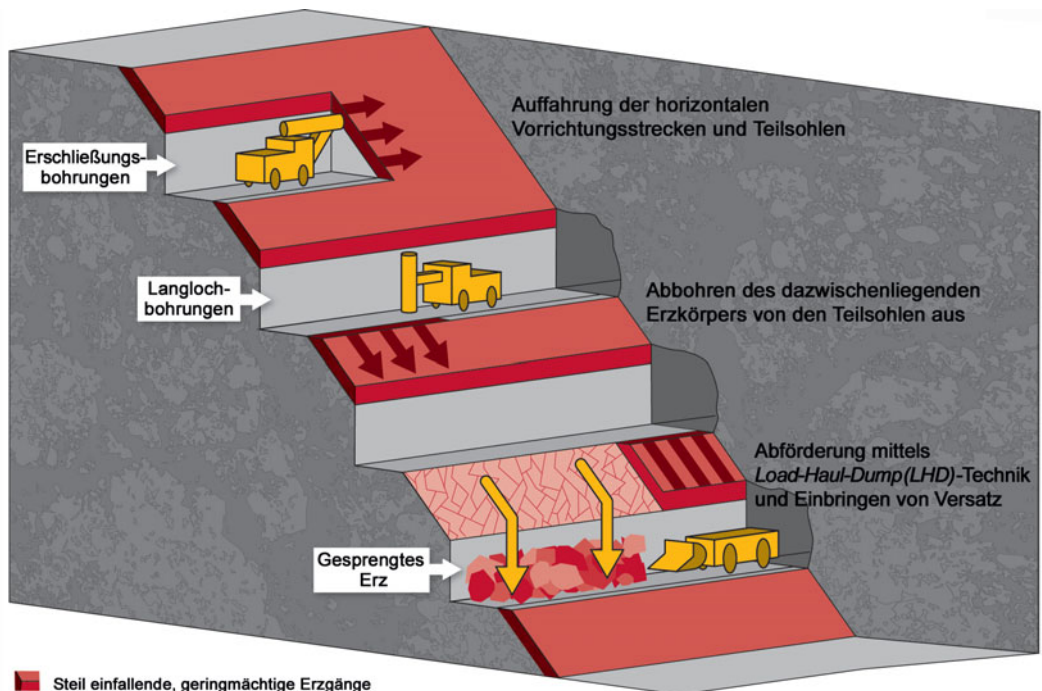


Abb. 9.18 Teilsollenbau mit Versatz auf geringmächtigen Erzgänge. Quelle: übersetzt nach © MMG Limited (2013)

gesetzt wird, auf die geltenden Grenzwerte und damit auf ein unschädliches Maß zu verdünnen. Thorium ist sowohl ein  $\alpha$ -Strahler als auch ein  $\gamma$ -Strahler und aufgrund dieser Strahlungsarten gefährlich bei Inhalation und Ingestion. Insbesondere die Feinstäube der Oxide sind aufgrund ihrer Lungengängigkeit radiotoxikologisch besonders gefährlich und können Krebs verursachen.

Die Sicherstellung dieser notwendigen Wettervolumenströme bedingt insbesondere in Grubenbauen geringer Mächtigkeit einen hohen planerischen und finanziellen Aufwand, und ist in der Regel nur über hohe Wettergeschwindigkeiten realisierbar. Insbesondere bei der Verdünnung des Th-Andrangs ist darauf zu achten, dass der dann belastete Wetterstrom nach Möglichkeit keine weiteren Arbeitsplätze beeinträchtigt. Abbauverfahren, Abbauplanung und Grubenbewetterung müssen die entsprechenden Voraussetzungen schaffen. Die notwendige Wettergeschwindigkeit ihrerseits ist allerdings nach oben limitiert, zum einen aus arbeitsplatzhygienischen Gründen (z. B. Staubaufwirbelung), zum anderen aber auch aus gesundheitlichen Gründen. So empfehlen Arbeitsmediziner maximale Wettergeschwindigkeiten von  $4 \text{ m sec}^{-1}$  auf Dauerarbeitsplätzen.

## Aufbereitungstechnik

SEE-Lagerstätten bestehen im Regelfall aus einem polymineralischen Gemisch unterschiedlichster Erze verschiedener Zusammensetzung, Verwachsungsgraden und Korngrößen. Hierbei ist jede bekannte Lagerstätte individuell zu betrachten, sodass die weltweit bestehenden oder zurzeit projektierten Aufbereitungsanlagen in der Regel als hoch spezialisierte Individuallösungen anzusehen sind (► Kap. 8). Die Abbildung 9.19 zeigt einen Dünnschliff aus einem Reicherzgang in Lofdal. Neben Gangmatrix und Gangart sind deutlich die SEE-Erze Parisit  $[\text{Ca}(\text{Ce},\text{La})_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2]$ , Synchronit  $[\text{Ca}(\text{x},\text{La})\text{F}(\text{CO}_3)_2]$  mit  $\text{x} = \text{Y}, \text{Ce}, \text{Nd}$

und Xenotimit  $[\text{Y},\text{Yb}(\text{PO}_4)]$  zu erkennen, mit einer mittleren Korngröße von circa  $7 \mu\text{m}$ .

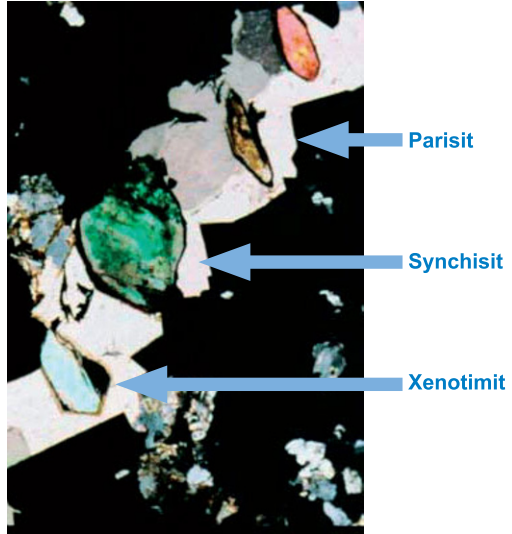


Abb. 9.19 Dünnschliff Erzgang Lofdal Area 4

Um ein solches Erz aufzubereiten, wäre neben einer geeigneten Zerkleinerungstechnik (Brech- und Mahlanlagen) auch die notwendige Trenntechnik aus bekannten Technologien zu entwickeln und anzupassen, was sich bereits in den laufenden SEE-Bergwerken aufgrund der chemischen Verwandtschaft der Elemente und ihrer Erze als Herausforderung gezeigt hat. Eine solche Technologie ist im Lande selbst nicht verfügbar und müsste entweder aus Südafrika oder aus Übersee eingeführt werden. Auch das sichere Handling des radioaktiven Thoriums ist im gesamten Aufbereitungsprozess sowie bei der Verschiffung der Produkte und der Deponierung der Rest- und Abfallstoffe aus dem Aufbereitungsprozess zu beachten. Nicht zuletzt setzt der Betrieb einer solchen Anlage das Vorhandensein einer infrastrukturellen Anbindung und die ausreichende Verfügbarkeit von Energie und Wasser voraus.



## 9

## Weitere technische und infrastrukturelle Aspekte

Aufbau und Betrieb eines Bergwerks sind generell an eine sichere infrastrukturelle und verkehrstechnische Anbindung zur Anlieferung von Ausrüstung und Material sowie zur Ver- und Entsorgung des Betriebs gebunden.

Von den circa 55.000 km Straßen und Pisten in Namibia sind nur etwa 10 % asphaltiert. Dies sind die Hauptverkehrsachsen des Landes, die in der Hauptsache die Hauptstadt Windhuk mit den Häfen Walvis Bay und Lüderitz an der Atlantikküste sowie mit den Nachbarländern Südafrika, Botswana, Angola und Sambia verbinden. Einige weitere Stichstraßen erschließen verschiedene Regionen. Alle anderen Straßen sind in der Regel Schotterpisten sowie einige Salzstraßen an der Küste und Erdpisten im Norden des Landes. Der Import von Ausrüstung, wie z. B. Bergbaumaschinen, und der Export der Produkte erfolgt in der Regel über den Tiefwasserhafen Walvis Bay. Auch das Eisenbahnnetz auf Kapschmalspur ist nicht flächendeckend ausgebaut und schließt hauptsächlich die Häfen und den ehemaligen Bergbaukomplex um Tsumeb an Südafrika an (Abb. 9.20).

Für Lofdal erfolgt die verkehrstechnische Anbindung zum Hafen von Walvis Bay über Karibib und Otjiwarongo über die Asphaltstraßen bis Khorixas; eine Gesamtlänge von 620 km bei einer Luftlinienentfernung von nur ca. 280 km zwischen Lagerstätte und Hafen. Von Khorixas aus erfolgt die weitere Anbindung über eine Schotterpiste dritter Ordnung (Farmstraße) bis zu den benachbarten Farmen. Von hier aus ist die Lagerstätte nur über Pfade zu erreichen, die den Einsatz geländegängiger, allradgetriebener Fahrzeuge verlangt.

Ähnlich schwierig sieht es bei der Versorgung mit elektrischer Energie aus. Namibia ist nicht in der Lage, seinen Strombedarf von 465 MW Spitzenlast durch eigene Kapazitäten zu decken. Das Land ist auf Stromlieferungen aus den Nachbarländern Südafrika und

Simbabwe angewiesen, die ihrerseits jedoch bereits mit Stromknappheit zu kämpfen haben. Die Erweiterung des namibischen Wasserkraftwerkes in Ruacana um eine vierte Turbine wird zurzeit durchgeführt; das Kraftwerk ist jedoch in seiner Stromerzeugungskapazität saisonal abhängig vom Wasserspiegel des Kunene Flusses. Der Neubau eines weiteren Kohlekraftwerkes bei Walvis Bay ist projektiert, doch bislang nicht genehmigt. Die lokalen Energieversorger fordern aus diesem Grund die Betreiber neuer Bergbauprojekte auf, ihre Anlagen mit eigener Generationskapazität auszustatten und etwaige Überkapazitäten in das lokale Netz einzuspeisen.

Für das Projekt in Lofdal bedeutet dies, dass zwar eine 13-kV-Mittelspannungsleitung, wie sie zur Versorgung der Farmen ausgebaut wurde, bis auf 15 km an einen möglichen zukünftigen Standort herangeführt ist, dass allerdings weder die Versorgungsspannung noch die zur Verfügung stehenden Kapazitäten ausreichen würden, eine Aufbereitungsanlage vor Ort aus dem öffentlichen Netz zu versorgen. Vielmehr müsste ein eigenes Kraftwerk errichtet und betrieben werden.

Ähnlich schwierig sieht es bei der Wasserversorgung aus. Namibia hat keine Oberflächengewässer. Einzig die Grenzflüsse Orange im Süden und Kunene und Okavango im Norden führen ganzjährig Wasser, wobei auch hier der Wasserspiegel saisonal sehr starken Schwankungen unterworfen ist. Für den Betrieb einer Aufbereitungsanlage wäre jedoch ein ausreichendes Wasserangebot unabdingbar, das im vorliegenden Falle nur durch das Anbohren der Paläo-Grundwasserleiter erfolgen könnte. In diesem Falle würde sich das Bergbauprojekt in direkter Konkurrenz zu anderen Nutzern wie etwa den Viehfarmen oder den Touristenherbergen in der Region setzen. In diesem Zusammenhang ist auch die Abwasserproblematik nicht zu unterschätzen.

Betrieb und technische Unterstützung eines Bergwerkes mit angeschlossener Aufbereitungsanlage erfordern den regelmäßigen Rückgriff sowohl auf die Lieferanten der





## 9 Sozioökonomische Aspekte und (Fach-)Arbeitskräfte

Bereits in den Jahren vor dem Einsetzen des aktuellen Bergbau-Booms hatte der namibische Bergbau an einem chronischen Mangel an qualifizierten Fachkräften zu leiden. Die Gründe hierfür sind vielschichtig. So ist zum Beispiel die rigide Einwanderungspolitik der Regierung zu nennen, die Arbeitsvisa in Zahl und Dauer stark reglementiert und damit die ohnehin schon schwierige Rekrutierung ausländischer Fachkräfte weiter erschwert und beschränkt. Auch die sehr geringe Zahl an Namibiern, die an Universitäten im Ausland im Bergfach ausgebildet wurden und dem heimischen Arbeitsmarkt zur Verfügung stehen sowie das gezielte Abwerben von Ingenieuren in andere Bergbauländer, vornehmlich Südafrika und Australien, stellen große Herausforderungen dar. Dies betrifft nicht nur den Bergbausektor, sondern alle Bereiche der Wirtschaft und des öffentlichen Lebens Namibias. So waren im ganzen Land in allen Wirtschaftszweigen Anfang 2013 insgesamt nur 1.042 Techniker und Ingenieure beim Engineering Council of Namibia registriert (ECN 2013).

Die Chamber of Mines of Namibia hat bereits in den Jahren 2006–2007 in einer internen Studie den akuten Bedarf an Fachkräften festgestellt, also vor dem eigentlichen Einsetzen des letzten Uranbooms und somit ohne Berücksichtigung der neu zu erschließenden Bergwerke (CoM 2007). Unberücksichtigt blieb in dieser Studie der Bedarf der Prospektionsgesellschaften und Bergbehörden. Basierend auf dieser Studie wurde im Jahre 2008, in Rücksprache mit den Bergwerken und der Chamber of Mines sowie unter Einbeziehung weiterer potenzieller Arbeitgeber, von der Polytechnic of Namibia ein neuer Studiengang Bergbau eingeführt, der nachhaltig sowohl den nationalen namibischen Bedarf bedient als auch Bergbauingenieure für die Nachbarländer mitausbilden soll. Zeitgleich bildet das Namibian Institute of Mining and Technology in Arandis Facharbeiter für die Bergbauindustrie aus.

Ziel dieser Aktivitäten ist es, der namibischen Bergbauindustrie Mitarbeiter zur Verfügung zu stellen, die international vergleichbare Leistungen erbringen können und damit sowohl in Namibia als auch international einsetzbar sind. Eine Übersicht über die bekannten Lagerstätten und über die in den letzten Jahrzehnten betriebenen Bergwerke sowie eine Auswertung der dabei angewandten Bergbaumethoden führten zur Festlegung der Schwerpunkte Erztiefbau, Festgesteinstagebau, Lockergesteinstagebau und mariner Bergbau. Trotz aller Bemühungen können diese Aktivitäten jedoch den hohen Bedarf bei Weitem nicht decken, sodass das Abwerben von Fachkräften, auch über die Landesgrenzen hinweg, tägliche Praxis ist.

Hier würde ein neues Bergbauprojekt in Lofdal unweigerlich in direkte Konkurrenz zu den etablierten Bergbauprojekten treten, so dass eine gesicherte Versorgung mit Fachkräften und Facharbeitern nicht sichergestellt oder sicher vorhergesagt werden kann.

Ein weiteres Problem wären die sozioökonomischen Aspekte auf das soziale Umfeld in einem Entwicklungsland, die mit dem Aufbau eines Bergwerkes im Damaraland, und damit weit entfernt von bestehenden Strukturen, einhergehen. Namibia ist ein äußerst dünnbesiedeltes Land; daher ist es nicht verwunderlich, dass in einer kleinen ländlichen Ortschaft wie Khorixas die notwendigen Strukturen zur Gesundheitsversorgung, zu Wohnung und Unterkunft, Verpflegung, Schulen etc. bei Weitem nicht in dem Maße vorhanden sind, wie sie für die Versorgung der Mitarbeiter eines solchen Bergbauprojektes und ihrer Angehörigen notwendig wäre. Die Bereitstellung oder zumindest Unterstützung all dieser Bereiche würde im Aufgabenfeld des Bergbauunternehmers liegen.

### Ausblick auf das Lofdal-Projekt

Wurde bei der Veröffentlichung der ersten Untersuchungsergebnisse aus Lofdal bei vielen Beobachtern die Hoffnung auf eine SEE-Bonanza

geweckt, so führte die nachfolgende Vertiefung des Informationsgehaltes zu einer vermeintlichen Herabstufung als eine kleinere, in der Gesamtsicht niedrig mineralisierte Lagerstätte mit außergewöhnlich hohen Gehalten an HREE. Doch auch die jetzt deutlich kleiner eingeschätzte Lagerstätte (wobei sich diese Bewertung v. a. auf die Exploration des Areal 4 stützt) hat bereits das Potenzial, den weltweiten Bedarf außerhalb des chinesischen Marktes an einigen der nachgefragtesten HREE zu bedienen.

Der Aufbau eines neuen Bergbauprojektes im unterentwickelten Nordwesten Namibias und der Betrieb einer daran angeschlossenen, hoch spezialisierten Aufbereitungsanlage ist mit einer Vielzahl von technischen, infrastrukturellen und sozioökonomischen Herausforderungen verbunden, die zwar nicht als Einzelaufgaben, jedoch in ihrer Gesamtheit einen negativen Einfluss auf einen Investitionsentscheid in dieses Projekt haben können. Insbesondere der Mangel an Prozesswasser, Energie, technischem Support und Personal lassen die Verwirklichung eines solchen Projektes möglicherweise nicht zu. Ein Lösungsansatz, der hierzu diskutiert wird, ist die räumliche Trennung von Gewinnung und Aufbereitung. Die standortgebundene Gewinnungstätigkeit auf geringmächtige Gangerzlagertstätten ließe sich mit kleineren Betriebseinheiten realisieren, die in allen Aspekten die verfügbaren und möglichen Ressourcen nicht überstrapazieren. Der Aufbau und sichere Betrieb einer Aufbereitungsanlage wäre alternativ und auf Basis der oben genannten Annahmen jedoch auch sinnvoll in der zentralen Bergbauregion Namibias, also in der Erongoregion bzw. in Walvis Bay Harbour selbst anzusiedeln. Dies würde bedeuten, dass das nicht aufbereitete Erz über große Entfernungen zu transportieren wäre; entweder über 600 km Asphaltstraße oder auch über ca. 330 km Schotterpisten erster Ordnung und Salzstraßen. Bei den relativ geringen jährlichen Förderraten, die als Produkt auf dem Weltmarkt abgesetzt werden können, kann eine solche Trennung von Aufbereitung und Gewinnung trotz der hohen Transportkosten

sich unter dem Strich als nachhaltig und kostengünstig erweisen. Abzuwarten bleibt die Vorlage eines qualifizierten IN 43-101 Berichtes zur stichhaltigen finanziellen Bewertung des Lofdal-Projektes.

## 9.5 Zusammenfassung

In Namibia finden sich eine Vielzahl von primären und sekundären SEE-Lagerstätten, sowohl in juvenilen Lagerstätten als auch assoziiert mit vorhandenen Altbergbauprojekten. Hervorzuheben ist der überproportionale Anteil von Lagerstätten mit einem hohen Anteil an schweren Seltenen Erden (HREE), die in der Mehrzahl auf dem Weltmarkt einen hohen Marktwert besitzen.

Das Fehlen von geeigneter Infrastruktur, Einrichtungen und Fachkräften sowie die generellen Herausforderungen der Entwicklung eines Bergbauprojektes limitierter Größe im unterentwickelten Hinterland eines Entwicklungslandes stellen die Entwicklung der vorhandenen Lagerstätten in reale Gewinnungsbetriebe vor besondere Herausforderungen.

Die aktuelle Situation an den Metallmärkten lässt keine Aussage über die weiteren Entwicklungen zu. Die aktuell auf dem Weltmarkt eingebrochenen Metallpreise und dadurch bedingt relativ geringen Erlöse können jedoch schon von vornherein das Aus für eine Anzahl der zurzeit untersuchten Projekte bedeuten.

## Quellenverzeichnis

- Burger AJ (1965) Mineralogical and radiometric studies of monazite and sphene occurrences in the Namib Desert, South-West Africa; National Physical Research Laboratory, Council for Scientific and Industrial Research, South Africa
- CoM (2007) Qualification Demand Report 2006–2007, unveröffentlicht. Chamber of Mines of Namibia

- CoM (2006–2012) Chamber of Mines of Namibia; Jahresberichte 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, und 2012. <http://www.chamberofmines.org.na/index.php?id=11>; acc. 01.05.2012. Letzter Zugriff 23.06.2013
- Diehl M (1990) Pegmatites of the Cape Cross-Uis Pegmatite Belt, Namibia: Geology, Mineralisation, Rb-Sr Characteristics and Petrogenesis of Rare Metal Pegmatites. Geol. Surv. Namibia Open File rep, EO 083, 50 S.
- Diehl BJM (1992) Tin. In: Geological Survey (Namibia), Ministry of Mines and Energy, Windhoek. The mineral resources of Namibia 2, 2: 1–30
- DOE (2011) Critical Materials Strategy Report 2011, US Department of Energy. <http://energy.gov/pi/office-policy-and-international-affairs/downloads/2011-critical-materials-strategy>. Letzter Zugriff 21.06.2013
- Dunai (1992) unveröffentlicht. In: Geological Survey Namibia (Hrsg) Ministry of Mines and Energy, Windhoek. The mineral resources of Namibia
- ECN (2013) Board information 3/2013, unveröffentlicht. Engineering Council of Namibia
- Etruscan Resources (2009–2012) Etruscan Resources Inc. Pressemitteilungen 2009–2012, <http://etruscanpressreleases.com/>. Letzter Zugriff 1.05.2012
- Genam GmbH (2007–2008) The InduBerg Uis Tin Tantalite Mine; Projektberichte 2007 und 2008; unveröffentlicht
- Genam GmbH (2009) The InduBerg Otjisazu Phosphate Project, Projektbericht unveröffentlicht
- GSN (2008–2011) Geologic Society of Namibia; Schwerpunktseminare 2008, 2009, 2010, 2011
- Gunthorpe RJ, Buerger AD (1977) The geology and economic evaluation of the Otjisazu Igneous Complex, central South West Africa/Namibia. Unveröff. Bericht, Tsumeb Corporation Ltd.
- Hoffmann (1992) unveröff. In: Geological Survey Namibia (Hrsg) Ministry of Mines and Energy, Windhoek. The mineral resources of Namibia
- InduBerg Otjisazu (2009) InduBerg Otjisazu Pty Ltd, Pressemitteilungen 2009
- InduBerg Otjisazu (2010) InduBerg Namibia Pty Ltd. Pressemitteilungen 2010
- Long JT (2013) Can the TSX Venture Be Saved. Interview with John Kaiser by The Gold report; 2013 Streetwise Reports. Gold Speculator Inc. <http://goldstocktoday.com/2013/02/john-kaiser-can-the-tsx-venture-be-saved/>. Letzter Zugriff 2.06.2013
- Mischo H (2011) Excavating marine deposits at Namibia's diamond deposits. SME Mining Engineering Magazine, Society for Mining, Metallurgy & Exploration 63, 12: 33–42
- Mischo H, Ellmies R (2012) Uranium boom in Namibia – rise of a new giant; Transactions of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 332: 354–369
- MME (2007–2013) Ministry of Mines and Energy, Windhoek, Namibia, Pressemitteilungen 2007, 2008, 2009, 2010, 2011; 2012; 2013. <http://www.mme.gov.na/oldnews.htm>. Letzter Zugriff 01.05.2012
- MME (2013) Karte: Current Licences 17 April 2013. Ministry of Mines and Energy, Windhoek, Namibia, <http://www.mme.gov.na/pdf/current-lic-map-0413.pdf>. Letzter Zugriff 21.06.2013
- MMG Limited (2013) Illustration of underground mining at Rosebery. <http://www.mmg.com/en/Our-Operations/Mining-operations/Rosebery/Extraction.aspx>. Letzter Zugriff 26.06.2013
- Namibia Rare Earth Inc. (2010, 2011, 2012, 2013) Pressemitteilungen. <http://www.namibiarareearths.com/press-release.asp>. Letzter Zugriff 01.05.2012
- African Development Bank/OECD (2008) African Economic Outlook 2008, OECD Development Centre and the African Development Bank, OECD Publishing, S 476. (Im Original in englischer Sprache publiziert von der OECD in *African Economic Outlook 2008*. Die Qualität der Übersetzung und ihre Übereinstimmung mit dem Original obliegen der Verantwortung des Übersetzers. Bei Diskrepanzen gilt die Originalversion: <http://dx.doi.org/10.1787/aeo-2008-en>)
- SACS (1980) South African Committee for Stratigraphy Projektbericht 1980

- Schneider GIC, Schreuder CP (1992) Phosphate. In: Geological Survey (Namibia), Ministry of Mines and Energy, Windhoek. The mineral resources of Namibia 6, 18: 1–13
- Schneider GIC (2009) Treasures of the Diamond Coast: A Century of Diamond Mining in Namibia; Macmillan Education Namibia Publishers, Windhoek, 320 S.
- Söhnge G (1967) Tsumeb, a historical sketch. Committee of the S.W.A. Scientific Society, Windhoek, 92 S.
- TMR (2011) Company Reports February 2011, Technology Metals Research, LLC
- Vedder H (1934) Das alte Südwestafrika. Martin Warneck Verlag; Berlin
- von Knorring O, Clifford TN (1960) On a scarn monazite occurrence from the Namib desert near Usakos, South-West Africa. Research Institute of African Geology, University of Leeds, Mineralogical Magazine 32, 251: 650–653

## Kernaussagen

- Namibia ist ein rohstoffreiches Land und besitzt eine Vielzahl von Seltenerd-Lagerstätten, die noch nicht aufgeschlossen wurden oder aber in Verbindung mit Bergbauprojekten bekannt sind.
- Gerade die schweren Seltenen Erden, die weltweit nicht häufig auftreten, sind besonders in Namibia überproportional vertreten.
- In Namibia fehlen Fachkräfte, Infrastruktur und notwendige Industrie, die eine zügige Entwicklung der Lagerstätten ermöglichen würden – unabhängig von der Notwendigkeit, auch die Finanzen zur Verfügung zu stellen.
- Anhand des Projektes Lofdal werden die Möglichkeiten und Schwierigkeiten einer Projektentwicklung in Namibia dargestellt.
- Der derzeitige Weltmarkt einerseits und die Langfristigkeit von Rohstoffprojekten andererseits erlauben im Moment keine Aussage, wie schnell der Rohstoffreichtum des Landes genutzt werden kann. Bei fallenden Rohstoffpreisen ist die Bereitschaft für Investitionen stets gering – unabhängig von der Qualität des Projektes.



# 10 Neue Technologien in Exploration und Lagerstättenentdeckung – Mit Fokus auf Aktivitäten in Europa

*Duncan Large*

## 10.1 Einleitung

Die Exploration auf Minerale aller Art, einschließlich der kritischen Metalle, ist ein finanziell riskantes Unterfangen. Es gibt verschiedene Ansätze, um diese Risiken zu quantifizieren. Obwohl Investoren und die Finanzmärkte täglich mit Berichten von Erkundungsergebnissen überschwemmt werden, die ein „hohes Potenzial“ oder gar „neue Entdeckungen“ mitteilen, sind doch wirklich neue, wirtschaftlich interessante Erzfunde eher selten. Dieser Beitrag untersucht die Gründe für den Rückgang bei Erkundungsaktivitäten und identifiziert einige Themen, die mehr Aufmerksamkeit verdienen, einschließlich Forschungsaktivitäten.

## 10.2 Explorationskosten

Die Metals Economics Group (2012) schätzte, dass die globalen Ausgaben für Erkundung im Jahr 2011 mit 18,2 Milliarden USD eine Rekordhöhe erreichten. Sie stellte auch fest, dass die Explorationskosten die Schwankungen der Metallpreise seit 1993 widerspiegeln (Abb. 10.1). Diese Ausgaben schließen die Erkundung um existierende Grubenbetriebe ein. Auch wenn es dabei nicht um die Entdeckung neuer Erzkörper geht, tragen diese Arbeiten doch

wesentlich zum Aufrechterhalten bzw. zum Ausbau der Reserven und Ressourcen einer Firma bei. Trotzdem vermutet der Autor, dass die Kosten der letzten fünf bis zehn Jahre auch einen erheblichen Anteil von Ausgaben für „Einschätzung und Erwerb“ enthalten, welche die meisten Bergbaufirmen zahlen, weil sie annehmen, dass es günstiger ist, eine Mine oder gar eine Minengesellschaft zu kaufen, als tatsächlich zu explorieren.

Nachhaltige Entwicklung in einer wachsenden Weltwirtschaft erzwingt die Entdeckung neuer Minerallagerstätten ebenso wie die Maximierung der Recyclingraten nichtregenerativer Ressourcen, wenn Engpässe vermieden werden sollen (Steinbach u. Wellmer 2010). Die Abbildung 10.2 zeigt die Anzahl von Entdeckungen von Buntmetallen bis zum Jahr 2006. Deutlich ist der Rückgang der Entdeckungsrate seit 1998 zu sehen. Nach Meinung des Autors kann dieser Trend bis heute extrapoliert und auf zahlreiche andere Metalle, einschließlich Gold, übertragen werden.

## 10.3 Die Entdeckungsrate

Die vergangenen fünf bis zehn Jahre könnten der erste Zeitabschnitt seit der Industriellen Revolution sein, in dem der natürliche Zusammenhang zwischen Metallpreisen und

## 10

Kosten für Exploration nicht mehr durch die Zahl der Entdeckungen abgebildet werden (Abb. 10.2). Verschiedenste Gründe wurden bereits für diesen düsteren und zur Sorge Anlass gebenden Trend genannt. Dazu gehören:

- technologische Unzulänglichkeiten,
- Mangel an Fachkönnen,
- Betonung von Firmenverschmelzungen und -kauf anstelle von Ausgaben für die Exploration zur Entdeckung neuer Vorkommen,
- Rückgang neuer Erkundungsgebiete,
- „Rohstoff-Nationalismen“,
- zunehmende Konkurrenz mit sozialen und Umweltfragen.

Dieser Beitrag konzentriert sich auf das erste Thema – unzureichende Erkundungstechnologien für die neuen Herausforderungen – und diskutiert kurz den Mangel an Fachkönnen

und die offensichtlichen Notwendigkeiten einer bestmöglichen Ausbildung und des Trainings für Geowissenschaftler und Geotechniker.

Die Betonung auf Erwerb und Zusammenschluss von Firmen anstelle von Exploration wurde bereits angesprochen und kann eine Folge der zunehmenden Globalisierung der Industrie sein – Ökonomen und Historiker werden dies zu untersuchen wissen. Das Konzept des Rückgangs neuer Erkundungsgebiete ist nach Meinung des Autors dagegen fadenscheinig. Selbst in Regionen mit einer langen Geschichte von Bergbau und Exploration wie unser Kontinent Europa gibt es stets neue Perspektiven – unterhalb des Deckgesteins, in größerer Tiefe sowie in den nordischen Ländern; verborgen unter ausgedehnten eiszeitlichen Sedimenten. Es mangelt jedoch an einer angepassten Explorationstechnologie.

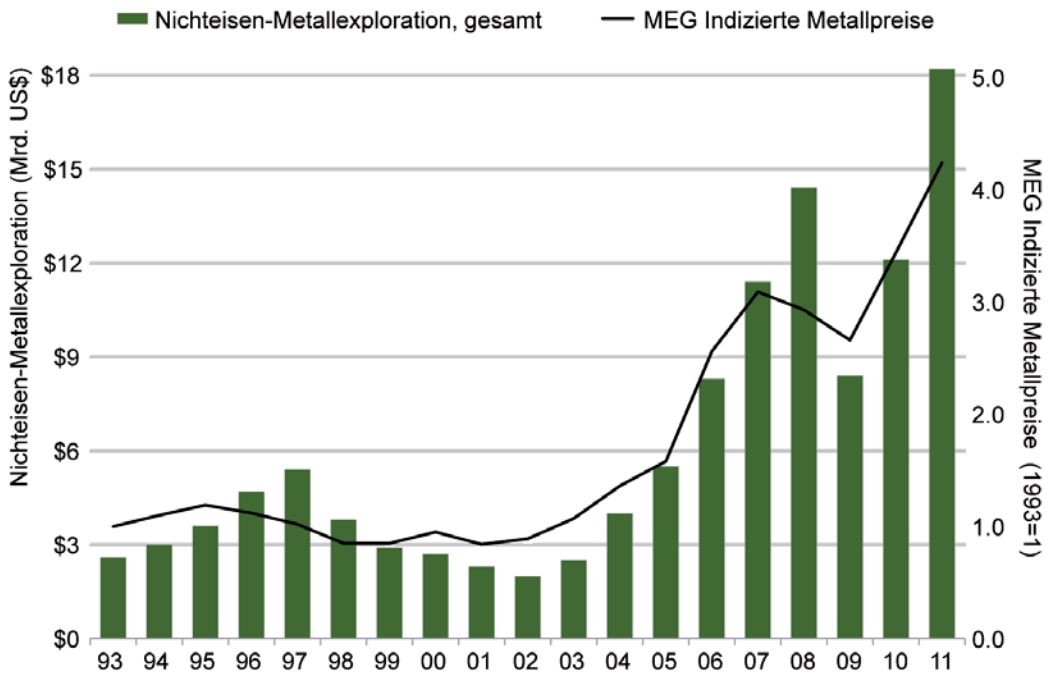
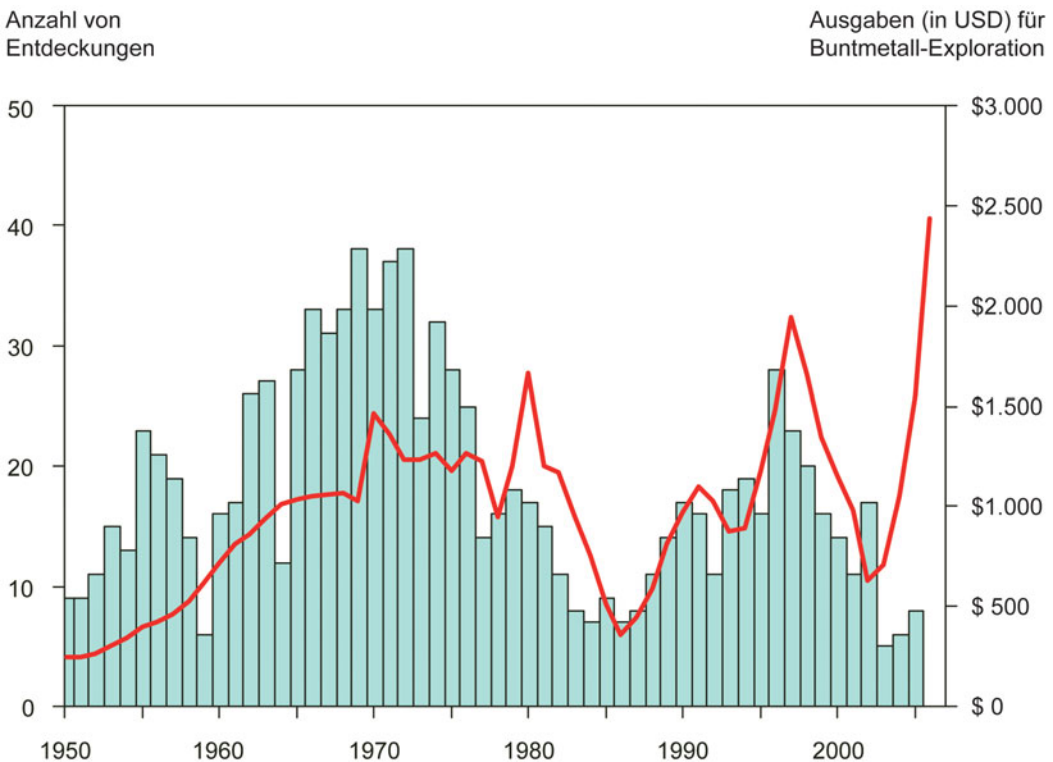


Abb. 10.1 Geschätztes gesamtes und weltweites Explorationsbudget für Nichteisen-Metalle, 1993–2011. Quelle: übersetzt nach © SNL Metals Economics Group (2012)

Mineralische Rohstoffe, Bergbau und Exploration sind zu einem politischen Thema in vielen Ländern und für viele internationale Organisationen geworden. Investoren in Exploration haben ihre eigenen Methoden, um auf Rohstoff-Nationalismen zu reagieren. Mit einigen Ausnahmen und diversen Rückschlägen jedoch bewegt sich der Trend nach wie vor auf die Erlaubnis zur Ausbeute mineralischer Rohstoffe – unter der Voraussetzung der akzeptierten Regelwerke zum nachhaltigen Bergbau mit allen umweltbezogenen und sozialen Komponenten und Einschränkungen. Nach Meinung des Autors können politische Hemmnisse nicht als Grund für den globalen Rückgang von Explorationserfolgen herangezogen werden.

## 10.4 Technologische Unzulänglichkeiten bei der Exploration

Explorationstechnologien schließen die direkten Vor-Ort Methoden der Exploration im Gelände ein – Geochemie, Geophysik, geologische Kartierung, Bohrungen – sowie die Evaluation der Ergebnisse. Letzteres ist heute ein komplexer Prozess unter Einsatz hochentwickelter Software. Dieser Abschnitt fokussiert auf die Geländemethoden, weil diese äußerst kritisch im Entdeckungsprozess von Mineralisationen sind und ohne die es keine Entdeckungen gäbe. Dabei sollten die Bedeutung



**Abb. 10.2** Entwicklung von Buntmetallfunden (Cu, Ni, Zn, Pb) 1950–2005 mit jeweils mehr als 0,1 Mt Cu-Äquivalenten. Ausgaben basierend auf Mio. US\$ in 2006. Quelle: übersetzt nach Bizzi (2007)

## 10

der Datenkompilation und -integration für Modellierung, Visualisierung und detaillierte Interpretation ebenso wenig wie die Anwendung wahrscheinlichkeitsbasierter Logik und andere Auswertalgorithmen nicht unterschätzt werden. Doch wesentlich ist es stets, zunächst Geländedaten zu bekommen – und vor allem neue Daten.

Es gibt eine zunehmende Anzahl von Forschungsinstituten und akademischen Programmen mit dem zentralen Thema, mineralische Vorkommen in der Tiefe zu entdecken. Wie oben angesprochen und am Beispiel von Kupfer in Abbildung 10.3 dargestellt, ist der „neue Horizont“ tief. Jüngst entdeckte Lagerstätten werden für die Ausbeutung in Tiefen von bis zu 2.000 m unter der Erdoberfläche entwickelt.

Die „Resolution“ *porphyry copper* Lagerstätte in Arizona, USA, ist ein klassisches Beispiel

für eine Entdeckung in einem wohlbekannten Bergbau-Distrikt. Sie wurde 1995 über eine kritische Alterationsmineralogie in Kernen aus Bohrungen der bekannten Magma-Kupfermine entdeckt (Manske u. Paul 2002), wo der Bergbau im Jahr 1996 zum Erliegen kam. Die neue Lagerstätte mit geschätzten 1.624 Millionen Tonnen bei 1,47% Kupfer und 0,037% Molybdän befindet sich in Tiefen zwischen 1.000 und 2.000 Metern und wird für einen Abbau ab 2021 im *Blockcaving*-Verfahren vorbereitet (Resolution Copper Project Profile, September 2011, [www.resolutioncopper.com](http://www.resolutioncopper.com)).

Der Skellefte-Distrikt in Nordschweden ist eine klassische Lokalität für Kupfer-Zink-Massivsulfide, die von der Firma Boliden abgebaut werden. Boliden blickt auf eine lange Geschichte erfolgreicher Anwendung geophysikalischer Techniken zurück. Abbildung 10.4 zeigt, dass der Großteil bislang entdeckter Vererzungen,

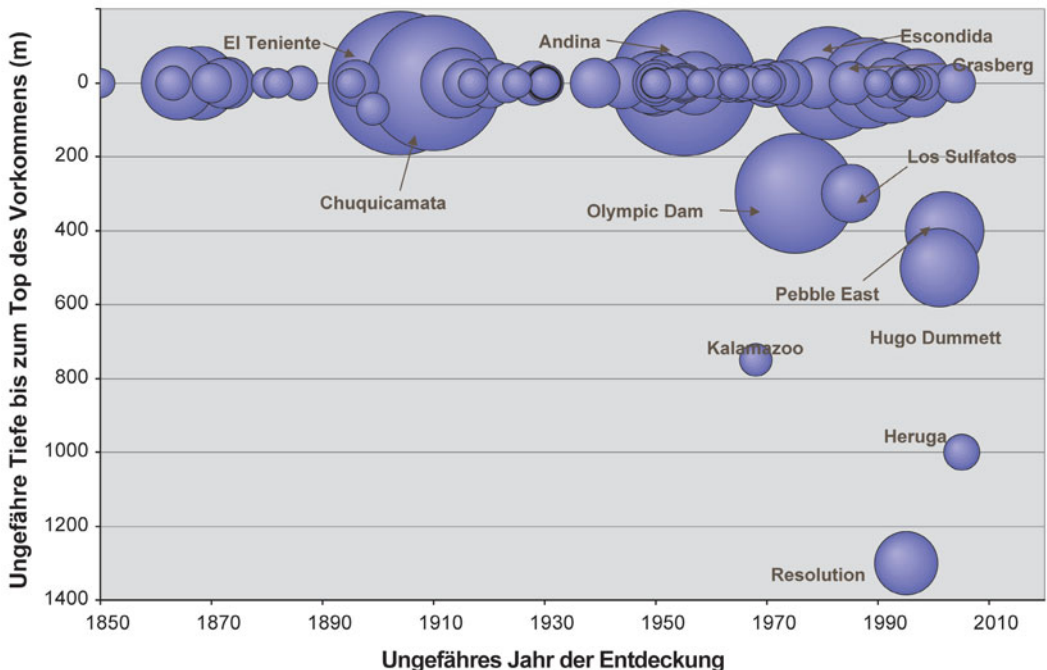


Abb. 10.3 Tiefe von Kupferfunden 1850–2010 mit der jeweiligen Tiefe von Vorkommen mit >4 Mt Cu. Quelle: übersetzt nach Finlayson (2009)

die bis heute abgebaut werden, in relativ geringer Tiefe anstehen, während jüngste Entdeckungen um 1.000 m Tiefe die Nutzungsdauer des Distriktes deutlich verlängern.

Nach Ansicht des Autors sind neue Technologien notwendig, um zuverlässige Daten aus größeren Tiefen zu erhalten, statt der aktuellen Tendenz zu folgen und sich auf modellierte Daten zu fokussieren, die mit oberflächennahen Daten Verhältnisse in größerer Tiefe extrapolieren.

## 10.5 Erhöhen der Datenakquise aus Bohrlöchern

Bohren führt zu Entdeckungen, und auf Bohrungen sollte ein Großteil der Kosten bei den meisten Explorationsbudgets gelegt werden. Daher ist es wesentlich, die Produktivität eines jeden Bohrloches zu maximieren.

Bohrlochtechnologien werden von Organisationen wie der australischen Deep Exploration Technologies ([www.detcrc.com.au](http://www.detcrc.com.au)) entwi-

kelt, die sowohl von der Regierung als auch der Industrie finanziert wird. Angewandte Forschung zum Test von Karbonfaser-gewickelten Rohren zur Steigerung des Bohrfortschritts könnte die Bohrproduktivität gegenüber den Standard-Stahlrohren, die seit Jahrzehnten genutzt werden, deutlich verbessern. Karbonfaserrohre erlauben zugleich die Entwicklung neuer Bohrlochsensoren, die mit Stahlrohren nicht möglich sind.

Qualitativ hochwertige Datenerfassung während des Bohrfortschritts wird eine Fähigkeit bleiben, die nur sehr gut ausgebildete Geologen meistern. Dennoch werden neue Technologien wie der CoreScan von DMT ([www.corescan.de](http://www.corescan.de)) dabei deutliche Unterstützung leisten können, zum Beispiel bei der Analyse von Brüchen für geotechnische Fragestellungen ebenso wie für die digitale Archivierung von qualitativ hochwertigen Bildern des Bohrkerns.

Geophysikalische Techniken werden immer bedeutsamer bei der Erfassung des Bohrfortschritts, um mehr Informationen aus der Tiefe zu erhalten. Einige der jüngst entwickelten Technologien werden in Zukunft sicherlich öfter

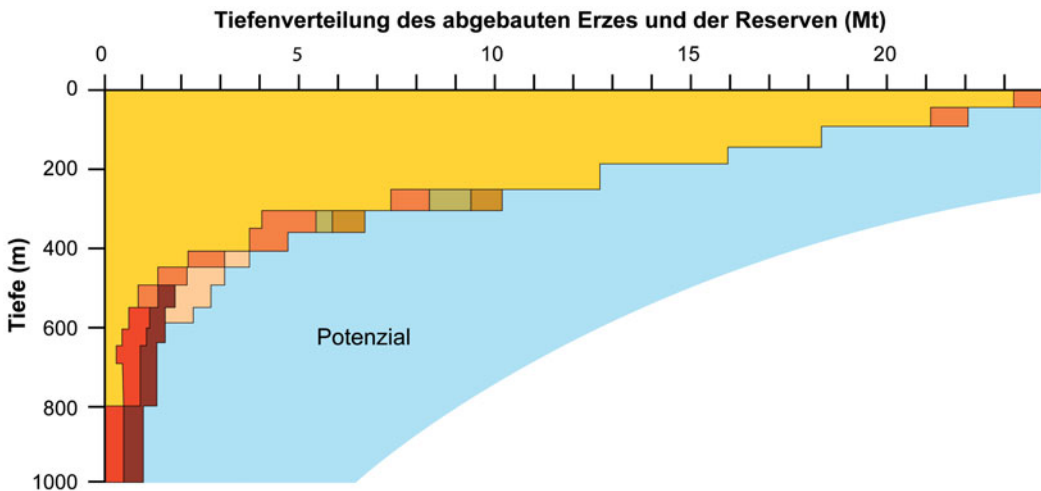


Abb. 10.4 Entdeckungstiefen der Kupfer-Zink-Vererzung im Skellefte-Feld, Schweden (abgebaut und Reserven) 2005. Verschiedene Farben = summative Tonnage über die Jahre. Quelle: übersetzt nach Weihed (2008)



eingesetzt werden (McMonnies u. Gerrie 2007), wenn die Bohrtechnik sich verbessert. Dazu gehören:

- Bohrloch-Elektromagnetik (BHEM) ist heute eine Standardprozedur bei den meisten Tiefbohrprojekten. Lamontagne (2007) fasste dies wie folgt zusammen *„BHEM wurde zu einem wesentlichen Werkzeug in der tiefen Exploration nach Massivsulfid-Lagerstätten. BHEM Messungen lassen sich zur Suche um Bohrlöcher herum für „off-hole“ conductors ebenso verwenden wie zur Definition des Ausmaßes von in-hole conductors. Die Messungen werden mit einer Transmissionschleife mit großer Oberfläche gemacht und mit einer Messkette im Bohrloch, die aus dem EM Sensor und Orientierungswerkzeugen besteht.“*
- Seismische Verfahren, sowohl die seismische Tomographie zwischen Bohrlöchern und innerhalb eines Bohrloches in die Tiefe als auch vertikale Profile werden zunehmend eingesetzt, um die Morphologie eines vererzten Gesteinskörpers definieren zu können.
- Geochemisch-analytische Techniken wie die Neutronenaktivierung im Bohrloch werden für die Echtzeitanalyse und Kontrolle der Erzqualität in tiefen Minen eingesetzt werden.

## 10.6 Geochemie

Geochemische Methoden haben sich als sehr erfolgreich erwiesen bei der Entdeckung zahlreicher Erzlagerstätten, die entweder bis an die Tagesoberfläche stoßen oder nahe der Oberfläche anzutreffen sind. Es wird ein Schlüsselwerkzeug bleiben, das in allen regionalen Explorationsprogrammen eingesetzt wird, ebenso

wie für detaillierte lithochemische Studien für noch anspruchsvollere Projekte.

Bei der Anwendung geochemischer Methoden in Explorationsprogrammen in Nordeuropa ist es heute eine der großen Herausforderungen, Mineralisationen zu entdecken, die von 5 bis 25 Meter mächtigen eiszeitlichen oder noch jüngeren Sedimenten überlagert sind. Das finnische NovTexEx-Programm (umwelteffiziente Lösungen für die Mineralexploration in arktischen Gebieten), eines von mehreren Forschungs- und Entwicklungsprogrammen unter dem Schirm des „Green Mining Programmes“ erkundet die praktischen Aspekte verbesserter Beprobungstechniken in tiefen unsortierten eiszeitlichen Ablagerungen der Arktis.

Jüngste Arbeiten zur Bodenprobenahme zeigen die Bedeutung der richtigen Auswahl des Mediums (Bodenhorizont, Bodentyp und Siebfraction), der angemessenen Überführung von Probematerial in eine Lösung (selektive und schwache Teilextraktionen, einschließlich sogenannter Enzymlösungen und Mobiler Metallionen-Lösungen, MMI – über stärkere Königswasserlösungen), ebenso wie der sinnvollsten analytischen Technik. Hamilton (2007) fasst die Forschungsergebnisse zusammen: *„ein integriertes geochemisches Modell, das davon ausgeht, dass Metalle in reduzierter Form aufsteigen, nahe des Grundwasserspiegels oxidieren, dabei Säure produzieren und gewünschte Wertelemente in der Lagerstätte absetzen sowie sekundäre geochemische Reaktionen, die oft ein Halo um die Lagerstätte erzeugen“*. Heberlein u. Samson (2010) zeigten, dass die Analyse organischer Oberböden (A-Horizont) in British Columbia, Kanada, die Anwesenheit von Kupfer-Gold-Mineralisationen anzeigen konnten, die von 300 Metern jüngerer Sedimente und quartären fluvioglazialen Ablagerungen überdeckt waren. Weitere geochemische Fallstudien mit unterschiedlichen Medien und Aufschlusstechniken aus Nordfinland werden in Sarala et al. (2008) beschrieben.

Schlussendlich lässt sich festhalten, dass es inzwischen möglich ist, Explorationsziele unterhalb von eiszeitlichen Ablagerungen und

jüngeren sedimentären Auflagen zu entdecken, sofern das Probenmedium und die Aufschluss-technik sorgsam gewählt sind und ein gutes Verständnis der methodischen Basis vorliegt. Das finnische NovTexEx-Programm kümmert sich auch um die Entwicklung der Probenahmetechniken. Schwere Bohrgeräte, die oft für die Beprobung glazialer Ablagerungen gebraucht werden, sind teuer und haben negative Auswirkungen auf die empfindliche arktische Umwelt.

## 10.7 Geophysik

Verschiedene kommerzielle Auftragnehmer bieten „tiefe“ und „3-dimensionale“ induzierte Polarisation (IP) und Elektromagnetik (EM) Explorations-Pakete an und behaupten, dass damit robuste Daten aus bis zu 1.500 Metern Tiefe geliefert werden. Bodenbasierte EM und nachgeordnet Magnetotellurik (MT) sowie *Controlled-Source Audio-Frequency Magneto-Tellurik* (CSAMT) sind inzwischen zu Standard-explorationswerkzeugen geworden. Dabei spielt CSAMT eine zunehmend wichtige Rolle bei der Ermittlung sinnvoller Widerstandsprofile und bei der Identifikation von Leitzonen potenzieller Mineralisation in heute erforderlichen Tiefen von 1.000 bis 2.000 Metern unter der Geländeoberkante.

Nach Einschätzung des Autors liefert CSAMT im Vergleich zu den „tiefen IP“-Methoden bessere Daten. Dies zeigten jüngste Entdeckungen mehrerer Auftragnehmer von Porphyr- und epithermalen Mineralisationen unter 300 bis 500 Meter mächtigem Obermiozänem Deckgestein im magmatischen Timok Komplex in Serbien ([www.reservoirminerals.com](http://www.reservoirminerals.com), Timok Projekt).

Am Ende hängen alle diesen Techniken von der Qualität der im Gelände genutzten Sensoren ab, um erfolgreich sein zu können. Dies gilt in besonderem Maße für Länder mit deutlichen Vorbehalten gegenüber Mineral-

exploration. Deutsche Forschung hat erfolgreich zur Entwicklung der Niedrigtemperatur SQUID Sensoren geführt (Le Roux u. Macnae 2007) und deutsche Firmen sind ebenfalls an der vordersten Front an der Entwicklung und Produktion von qualitativ sehr hochwertigen Spulen beteiligt (z. B. [www.metronix.de](http://www.metronix.de)). Weitere Forschung und Entwicklung wird die Anwendungsmöglichkeiten dieser Techniken für die Mineralexploration noch weiter verbessern.

Große Fortschritte in der Verarbeitung und Modellierung geophysikalischer Daten zur Produktion „prädiktiver 3D-Modelle“ wurden erzielt und werden weiterhin zu erwarten sein (Williams et al. 2009). Dabei bleibt es die kritische Frage, welches die richtige Technik für den spezifischen Auftrag ist – und es bleibt eine Herausforderung, diese richtige Methodik zu einem frühen Zeitpunkt zu erkennen.

## 10.8 Explorationskonzepte und ihre Grenzen

Geologische Modelle, die auf jahrzehntelanger Erfahrung und akademischer Forschung beruhen, werden weiterhin angewandt werden, um Explorationsziele zu verstehen und den Explorationsprozess zu leiten. Das ist zweifellos sinnvoll und produktiv – bis eine Entdeckung gemacht wird, die nicht zu den akzeptierten Konzepten passt und somit „aus der Reihe tanzt“. Derartige Zufallsereignisse sind äußerst wichtig für Explorationsprozesse – und erfordern spezielles Verständnis und Denkweisen, um überhaupt in ihrer Bedeutung wahrgenommen zu werden. Solche Ereignisse sind definitionsgemäß nicht vorherzusagen und treten ausschließlich als Ergebnis von Geländeexploration auf – ein wesentliches Argument für stetige Geländeaktivitäten bei allen Firmenprogrammen. Von ganz besonderer Bedeutung ist dies für strategische Metalle, für die geologische Modelle oft nicht so verfeinert sind wie für Edelmetalle oder Buntmetalle.

Als jüngste Beispiele dienen die Entdeckung des Lithiumvorkommens Jadar in Serbien und des Vorkommens Merlin mit hochgradigem Molybdän (Mo) und Rhenium (Re) in Queensland, Australien.

- Die Lithiumlagerstätte Jadar wurde 2007 von einer zu Rio Tinto gehörenden Firma im Rahmen eines regionalen Explorationsprogrammes auf Borate in känozoischen Seesedimenten und vulkanischen Tuffen auf dem Balkan entdeckt. Jadarit ( $\text{LiNaB}_3\text{SiO}_7(\text{OH})$ ) ist das dominierende Lithiummineral; eine Neuentdeckung, die erst nach drei Jahren Explorationstätigkeit gemacht wurde. Der Projektbericht von Rio Tinto (Rio Tinto 2011) sagt, dass *„wegen seiner hohen Lithium- und Boratkonzentrationen – und einer Abschätzung der geologischen Vorräte auf mehr als 200 Millionen Tonnen – Jadar als eine der größten Lithiumlagerstätten der Welt eingestuft wurde. Wenn diese Lagerstätte ausgebeutet werden würde, hätte sie das Potential, mehr als 20 Prozent des weltweiten Bedarfes zu decken“*. Die Lagerstätte befindet sich in Tiefen zwischen 300 und 600 Metern unter der Oberfläche, und CSAMT-Geophysik ist eine der Techniken, die zur Festlegung der Bohrstellen genutzt wurden.
- Ein weiteres Beispiel ist die Entdeckung der Lagerstätte Merlin in Queensland, Australien im Jahr 2008 durch die Ivanhoe Australia Ltd. Diese Lagerstätte, die vom Geologischen Dienst Australiens als die weltweit höchstkonzentrierte Mo- und Re-Lagerstätte bezeichnet wurde (Australian Mines Atlas 2013), gilt als Ressource mit 6,7 Millionen Tonnen mit 1,4% Mo und 23 mg  $\text{kg}^{-1}$  Re. Die Lagerstätte wurde während der regionalen Exploration auf Kupfer-Gold-Mineralisationen im Cloncurry-Distrikt entdeckt.

Diese beiden Vorkommen, die derzeit weiter entwickelt werden, illustrieren die Notwendigkeit offener Sinne für alle Möglichkeiten, die bei der Suche nach einem spezifischen Ziel bzw. einer spezifischen Ressource unerwartet auftauchen können.

In ihrem Review über 25 *porphyry copper* Entdeckungen im Zeitfenster 1990–2005, zeigten Holliday u. Cooke (2007), dass in 22 dieser Projekte Geologie und Bohrungen die „bevorzugte Entdeckungsmethode“ waren – nach Meinung des Autors lassen sich diese beiden nicht separieren – und Geophysik und Geochemie galten als „nachgeordnete Entdeckungsmethoden“. Die Botschaft dieser und weiterer Beispiele, die in dieser Arbeit zitiert werden, ist eindeutig: Eine gute praktische geologische Ausbildung und ein gutes Verständnis aller Mitglieder eines Explorationsteams ist für den Erfolg entscheidend.

## 10.9 Schlussfolgerungen

Neue Entdeckungen werden weiterhin von erfahrenen und gut ausgebildeten Geowissenschaftlern gemacht werden, welche die modernsten verfügbaren Techniken zu nutzen verstehen. Deshalb sollten Investitionsprioritäten auf die folgenden Themen fokussieren:

1. Ausbildung von Geowissenschaftlern für die Exploration,
2. Akquise neuer Geländedaten, was
3. neue Bohrungen einschließt.

Die jüngste Flut von Möglichkeiten zur Datenkompilation und Präsentationswerkzeugen erlauben es zwar, ein Projekt gut zu präsentieren, doch sind sie für die eigentliche Entdeckung derzeit noch eher nachrangig.

## Quellenverzeichnis

- Australian Mines Atlas (2013) The Australian Atlas of Mineral Resources, Mines, and Processing Centres. [http://www.australianminesatlas.gov.au/aimr/commodity/molybdenum.html#world\\_ranking](http://www.australianminesatlas.gov.au/aimr/commodity/molybdenum.html#world_ranking). Letzter Zugriff 21.05.2013
- Bizzi L (2007) Minerals exploration in Brazil: the perspective of a major mining company. BHP Billiton South American Minerals Exploration Group presentation at the ADIMB (Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira) Exploration manager's meeting, April 2007. <http://www.adimb.com.br/eventos/gerentes/pdf/bizzi.pdf>. Letzter Zugriff 21.05.2013
- Finlayson E (2009) Demand, supply and price of copper – an exploration perspective. Rio Tinto presentation, Global Mining Investment Conference, London, September 2009. (Daten: Metals Economics Group). [http://www.riotinto.com/media/presentations-91\\_2516.aspx](http://www.riotinto.com/media/presentations-91_2516.aspx). Letzter Zugriff 2.06.2013
- Hamilton SM (2007) Major advances in soil geochemical exploration methods for areas of thick glacial drift cover. In: Milkereit B (ed) Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, S. 263–280
- Heberlein DR, Samson H (2010) An assessment of soil geochemical methods for detecting copper–gold porphyry mineralization through Quaternary glaciofluvial sediments at the Kwanika Central Zone, North-Central British Columbia. Geoscience BC Report 2010–03, 93 S.
- Holliday JR, Cooke DR (2007) Advances in geological models and exploration methods for copper ± gold porphyry deposits. In: Milkereit B (ed) Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, S. 791–809
- Lamontagne Y (2007) Deep exploration with EM in boreholes. In: Milkereit B (ed) Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, S. 401–415
- Le Roux C, Macnae J (2007) SQUID sensors for EM systems. In: Milkereit B (ed) Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, S. 417–423
- Manske SL, Paul AH (2002) Geology of a major new porphyry copper center in the Superior (Pioneer) district, Arizona. Econ Geol 97: 197–220
- McMonnies B, Gerrie V (2007) Ground geophysics and borehole logging – A decade of improvements. In: Milkereit B (ed) Proc of Exploration 07: 5th Decennial Internat Conf Mineral Exploration, S. 39–49
- Rio Tinto (2011) Rio Tinto Minerals Jadar Fact Sheet. <http://www.riotintominerals.com>. Letzter Zugriff 21.05.2013
- Sarala P, Hartikainen A, Sarapää O, Iljina M, Korkiakoski E, Kousa J, Heikura P, Hulkki H, Pulkkinen E, Törmänen Ts (2008) Test of mobile metal ion (MMI) method in exploration in eastern and northern Finland during 2007. Geol Survey Finland, Report S. 44: 62 S. (in Finnish)
- SNL Metals Economics Group (2012) World Exploration Trends 2012. A special report from Metal Economics Group for the PDAC International Convention. <http://www.metalseconomics.com>. Letzter Zugriff 21.05.2013
- Steinbach V, Wellmer FW (2010) Consumption and use of non-renewable mineral and energy raw materials from an economic geology point of view. Sustainability 2, 5: 1408–1430
- Weihed P (2008) Depth of discovery of copper–zinc mineralization in the Skellefte Field in Sweden, Exploration Technology and Methods. Presentation at the Euro Mine Expo 2008
- Williams N, Oldenburg D, Lelièvre P (2009) Reliable subsurface models for mineral exploration. Ausgeo News, December, S. 1–7

## Kernaussagen

- Die Bedeutung innovativer Konzepte und Technologien bei Exploration und Entdeckung mineralischer Rohstoffe wird deutlich, wenn man sich vor Augen führt, dass es in den vergangenen zehn bis 15 Jahren keinen wesentlichen Erfolg mehr gegeben hat. Zwar wurde mehr Geld als jemals zuvor in die Exploration investiert, doch die Entdeckungsrate ist gering.
- Der Beitrag diskutiert einige der neuen geochemischen und geophysikalischen Technologien in der modernen Exploration und identifiziert Themen, die weiterer Forschung und Entwicklung bedürfen. Die Betonung liegt dabei auf der Anwendung innovativer Technologien, die im Gelände eingesetzt werden können, statt auf neuer Software für Datenverarbeitung und -auswertung. Die Bedeutung der Entwicklung kosteneffizienterer Bohrtechniken und der Gewinnung einer größeren Anzahl von Daten aus den Bohrlöchern stehen dabei im Vordergrund mit Beispielen von tiefen und von tauben Erzkörpern.
- Die Exploration auf Buntmetalle, Edelmetalle sowie kritische strategische Metalle erfordert heute die Anwendung fortgeschrittener geochemischer und geophysikalischer Techniken. Dies wird am Beispiel laufender Explorationsprogramme diskutiert.



# Teil 3

## Sekundäre Rohstoffe und Recycling



Bildquellen der vorangehenden Seite

*Großes Bild oben:* Schrottlager, der Rohstoff für das Recycling-Stahlwerk von Feralpi in Riesa (Sachsen)

*Untere Bildreihe:* Verschiedene Stadien von Elektronikschrott, gestanzte Platinen, Mobiltelefone und pulverisierte Platinen in einer Recyclinghütte in Kosaka, Akita-Präfektur, Japan. Fotos: © Jörg Matschullat

# 11 Technologiemetalle – Systemische Voraussetzungen entlang der Recyclingkette

*Christian Hagelüken*

## 11.1 Bedeutung der Technologiemetalle

Der Boom in der Elektronik und bei anderen modernen Produkten hat zu einer starken Nachfrage vor allem nach Edelmetallen geführt. Doch in Europa gibt es für diese „Technologiemetalle“ nach über tausendjähriger Bergbautradition nur noch wenige Primärlagerstätten. Deshalb ist Versorgungssicherheit heute ein Thema.

Elektronische Bauelemente sind das Herz von Informationstechnologie und Kommunikation, aber auch zunehmend im Automobil, Maschinen- und Anlagenbau, in Energie- und Umwelttechnik. Um immer ausgeklügeltere Funktionen zu erzielen, werden heute in der Elektronik bis zu 60 verschiedene Elemente eingesetzt. In einem komplexen Materialverbund sind neben Kunststoffen, Glas/Keramik, Eisenmetallen und Kupfer auch weitere Basismetalle sowie Edelmetalle und Sondermetalle enthalten. Letztere kommen zwar nur im Spurenbereich vor, haben jedoch oft einen dominierenden Anteil am Materialwert der Geräte.

Da die spezifischen Eigenschaften der Technologiemetalle für die wachsende Funktionalität der Geräte ausschlaggebend sind, hat die stürmische technische Produktentwicklung zu einem rasanten Nachfrageanstieg dieser Metalle geführt. So stecken z. B. im einzelnen Mobiltelefon oder Computer zwar nur wenige Milli-

gramm an Gold (Au), Silber (Ag) und Palladium (Pd). Wird dieser Anteil allerdings mit den allein in 2010 weltweit verkauften 1,6 Milliarden Mobiltelefonen und 350 Millionen PCs und Laptops multipliziert, dann kommen beeindruckende Mengen und Werte zusammen. Allein diese beiden Gerätegruppen benötigen jeweils rund 4 % der Weltbergbau-Produktion an Gold und Silber sowie rund 20 % der Minenförderung an Palladium und Cobalt (Tabelle 11.1).

Nimmt man weitere Produkte hinzu, dann wird deutlich, dass Elektro- und Elektronikanwendungen für viele Metalle eine große Bedeutung haben; der Wert der darin jährlich verbauten Metalle liegt bei deutlich über 75 Mrd. US \$ (Tabelle 11.2).

Auch Fahrzeuge sind „Lagerstätten auf Rädern“. Das liegt zum einen an der eingesetzten Elektronik. Eine noch größere Bedeutung für Edelmetalle hat aber der Abgaskatalysator. Rund 50 % des weltweiten Bergbaus auf Platin (Pt) und Palladium (Pd) entfallen allein auf dieses Bauteil, bei Rhodium (Rh) sind es sogar über 80 %. Weltweit wurden über die gesamte Menschheitsgeschichte bis 2010 nur rund 12.000 Tonnen dieser Platingruppenmetalle (PGM) abgebaut. (Zusätzlich gehören noch Ruthenium (Ru), Iridium (Ir) und Osmium (Os) zu den PGM). Während die jährliche Bergbauproduktion von Pt und Pd in gleicher Größenordnung liegt (200–250 t/a), ist die von Rh und Ru um den Faktor 10 niedriger und jene von Ir 50-fach niedriger; für Os gibt es praktisch keine Nachfrage. Von der

**Tabelle 11.1** Einfluss der weltweiten Verkäufe (2010) von Mobiltelefonen und Computern auf die Nachfrage nach Silber (Ag), Gold (Au), Palladium (Pd), Kupfer (Cu) und Cobalt (Co), relativ zur Weltbergbauproduktion dieser Metalle

a) Mobiltelefone: 1.600 Mio. Stück	b) PCs und Laptops: 350 Mio. Stück	Weltbergbau- / a+b Produktion / Anteil
× 250 mg Ag ≈ 400 t Ag	× 1.000 mg Ag ≈ 350 t Ag	Ag: 22.200 t a <sup>-1</sup> → 3%
× 25 mg Au ≈ 40 t Au	× 220 mg Au ≈ 77 t Au	Au: 2.500 t a <sup>-1</sup> → 5%
× 9 mg Pd ≈ 14 t Pd	× 80 mg Pd ≈ 28 t Pd	Pd: 200 t a <sup>-1</sup> → 21%
× 9 g Cu ≈ 14.000 t Cu	× 500 g Cu ≈ 175.000 t Cu	Cu: 16 Mio t a <sup>-1</sup> → 1%
<b>1.600 Mio. Akkus*</b>	<b>≈180 Mio. Laptop-Akkus*</b>	
x 3,8 g Co ≈ 6.100 t Co	x 65 g Co ≈ 11.700 t Co	Co: 88.000 t a <sup>-1</sup> → 20%

\* Li-Ion Typ (heute Standard)

**Tabelle 11.2** Bedeutung von Elektro- und Elektronikanwendungen (EEE) für die Nachfrage nach verschiedenen Technologiemetallen.

Wichtige EEE-Metalle	Weltbergbau- Produktion t a <sup>-1</sup>	EEE Nachfrage t a <sup>-1</sup>	Anteil EEE an Minen- produktion	Metallpreise US\$ kg <sup>-1</sup>	Wert in EEE Mrd. US\$
Silber Ag	22.000	7.554	34%	649	4,90
Gold Au	2.500	327	13%	39.443	12,90
Palladium Pd	229	44	19%	16.948	0,74
Platin Pt	188	7	4%	51.811	0,37
Ruthenium Ru	29	21	72%	5.069	0,11
Kupfer Cu	16.200.000	7.174.000	44%	8	54,08
Zinn Sn	261.000	129.708	50%	20	2,65
Antimon Sb	135.000	67.500	50%	9	0,61
Cobalt Co	88.000	16.470	19%	45	0,75
Wismut Bi	7.600	1.216	16%	20	0,02
Selen Se	2.260	185	8%	82	0,02
Indium In	574	717	125%	566	0,41
				<b>Gesamt</b>	<b>77,56</b>

Zusätzlich sind viele weitere Metalle enthalten wie Eisen, Aluminium, Nickel, Seltene Erden etc. Minenproduktion nach USGS; Selenproduktion ohne USA. Nachfragedaten zusammengestellt aus verschiedenen Statistiken. Indium >100% durch Recycling von Produktionsrückständen. Metallpreise 2010 nach Metal Bulletin

bisher geförderten Pt- und Pd-Menge ist fast ein Viertel als Autokatalysator auf der Straße im Einsatz. Zusätzlich stecken in jedem Neuwagen große Mengen weiterer Metalle.

Bei modernen Fahrzeugen mit stark zunehmender elektronischer Ausstattung erhöhen sich die verbauten Mengen an Kupfer, Aluminium, Edel- und Sondermetallen weiter. Eine verstärkte Markteinführung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen wird sich signifikant auf die Nachfrage nach Cobalt (Co), Lithium (Li) und Seltenen Erde (SEE) auswirken. Brennstoffzel-

lenfahrzeuge benötigen erhebliche Mengen an Pt, und neue Technologien im Auto wie Thermoelektrik, LEDs oder Infrarot-Abstandssensoren werden die Nachfrage nach Halbleitern weiter steigern.

Darüber hinaus sind Technologiemetalle unverzichtbarer Bestandteile in vielen Umwelttechnologie-Anwendungen, von Photovoltaik und Windturbinen über Superlegierungen für effizientere Flugzeugtriebwerke bis zu Katalysatoren in der chemischen und petrochemischen Industrie (Tabelle 11.3; ► Kap. 2).

Tabelle 11.3 Wichtige Anwendungsfelder für Technologiemetalle

	Bi	Co	Ga	Ge	In	Li	REE	Re	Se	Si	Ta	Te	Ag	Au	Ir	Pd	Pt	Rh	Ru
Pharma																			
Medizintechnik/Dental																			
Superlegierung																			
Magnete																			
Hartlegierungen																			
Andere Legierungen																			
Metallurgie*																			
Glas, Keramik, Pigmente**																			
Photovoltaik																			
Batterien																			
Brennstoffzellen																			
Katalysatoren																			
Nuklear																			
Lote																			
Elektronik																			
Opto-Elektronik																			
Schmierstoffe																			

\* Additive in Metallurgie etc.; \*\* inkl. Indium-Zinnoxid (ITO) und andere Glasbeschichtungen



Das starke Wachstum in diesen und anderen Hochtechnologie-Anwendungen hat die Metallnachfrage explodieren lassen. So wurden – bezogen auf die kumulierte Bergbau-

förderung seit 1900 – bei vielen Technologiemetallen 80 % und mehr erst seit 1980 gefördert (Abb. 11.1), wovon ein großer Teil noch heute in Produkten und Infrastruktur im Einsatz ist.

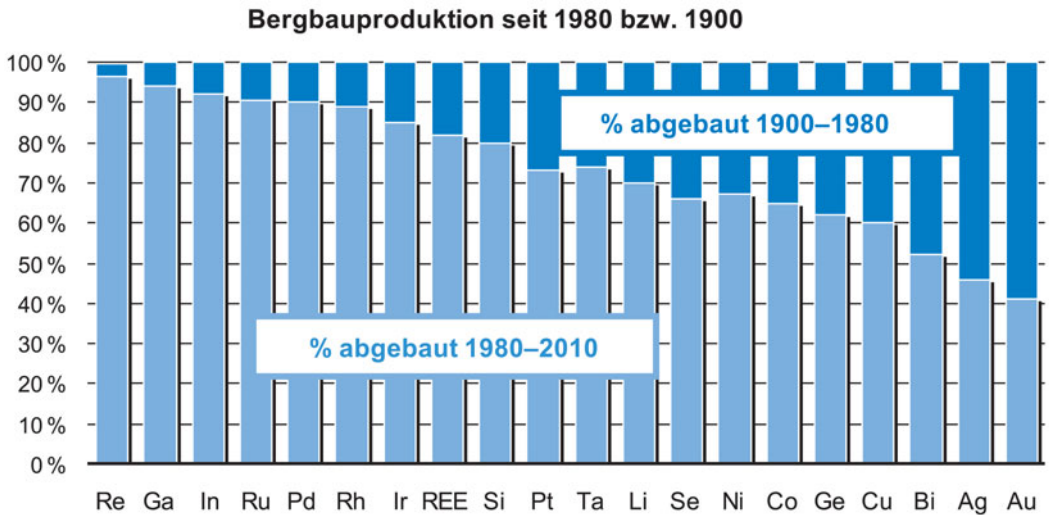


Abb. 11.1 Anteil der Bergbauproduktion seit 1980 im Vergleich zur kumulierten Produktion seit 1900 für ausgewählte Technologiemetalle. *SEE* Seltenerdelemente

Es ist davon auszugehen, dass diese Nachfragebeschleunigung anhalten wird und dass der sichere und „bezahlbare“ Zugang zu den Technologiemetallen ein entscheidender Wettbewerbsfaktor für die europäische Wirtschaft werden wird. Bereits heute besteht bei vielen Metallen eine hohe Importabhängigkeit, und teilweise ist das Angebot zudem regional stark konzentriert (z.B. Seltene Erden in China, Platinmetalle in Südafrika, Cobalt in Zentralafrika). Zusätzlich werden viele Technologiemetalle nur als Koppelprodukte von Basismetallen gefördert (Abb. 11.2), wodurch das Angebot selbst bei hohen Preisen und grundsätzlich vorhandenen Erzvorräten begrenzt wird. Dies erhöht das Risiko von temporären Lieferengpässen und Preissprüngen.

## 11.2 Recycling – Chancen und Herausforderungen

Europa verfügt mit seinen Altprodukten allerdings über eine sehr große sekundäre Lagerstätte. In technischer Hinsicht können mit modernen europäischen Recyclinganlagen sehr viele Metalle mit guten Ausbeuten zurückgewonnen werden. Wertstoffhof und Schrottplatz werden damit zu anthropogenen Lagerstätten, der Bergbau kommt in die Städte („*Urban Mining*“). Die Herausforderung dabei ist jedoch, unsere Altprodukte möglichst vollständig zu erfassen, in eine für die jeweilige Produktart ausgelegte Recyclingkette einzusteuern und sie technisch-organisatorisch optimiert

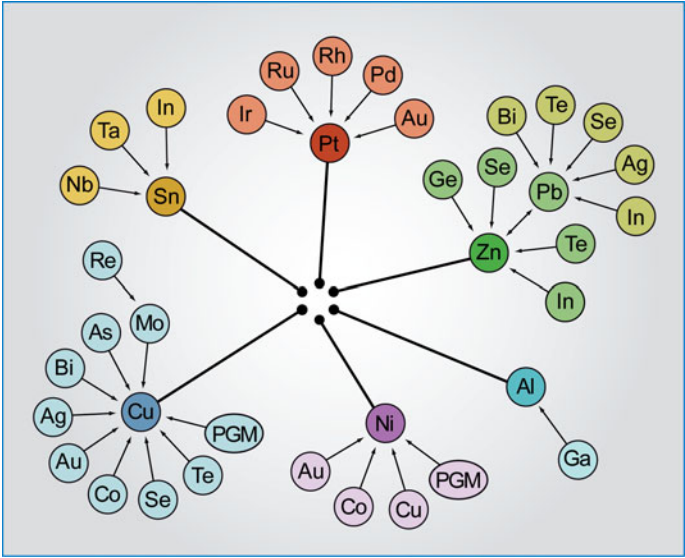


Abb. 11.2 Koppelproduktion der primären Metallgewinnung – viele Technologie-metalle sind Nebenprodukte der Gewinnung von Hauptkomponenten wie Kupfer (Cu), Zink (Zn), Blei (Pb) oder Nickel (Ni)

über die verschiedenen Recyclingstufen zu verarbeiten (Abb. 11.3).

Der Aufbereitung kommt dabei eine Schlüsselrolle zu, da hier die komplexen und heterogenen Produkte so „zerlegt“ und vorbehandelt werden müssen, dass die dabei erzeugten Outputfraktionen in die für bestimmte Materialkombinationen jeweils bestgeeigneten

Endverarbeitungsprozesse eingesteuert werden können. Hierfür wird eine Kombination aus manuellen und mechanischen Prozessen eingesetzt. Dabei beeinflusst die Heterogenität und Komplexität der Produkte ebenso wie ihr Design und die Art der Materialverbindungen den jeweils optimalen Prozess und die Grenzen der Recyclingfähigkeit. Die stoffliche

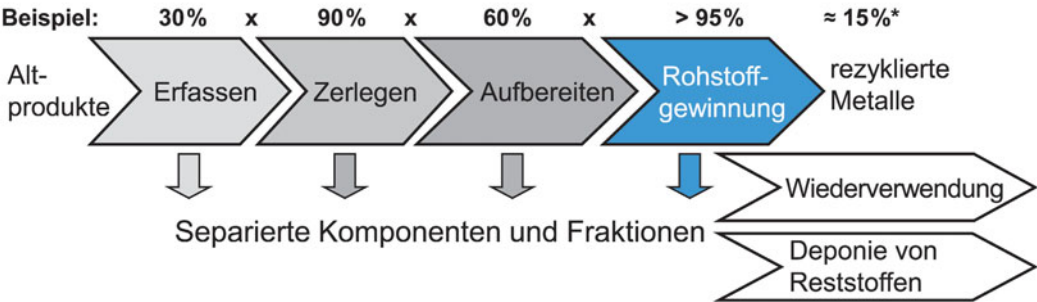


Abb. 11.3 Die Recyclingprozesskette für Konsumgüter – die tatsächliche Recyclingquote wird durch das schwächste Glied bestimmt. \*effektive Quote, z. B. für Gold aus Altprodukten am Ende der Recyclingkette

Rückgewinnung der Metalle als hochreine Endprodukte findet erst in der letzten Stufe der Kette statt, hier sind drei metallurgische Hauptrouten (Eisen/Stahl; Aluminium; Kupfer/Edelmetalle/einige Sondermetalle) sowie eine Reihe von speziellen metallurgischen Prozessen zu unterscheiden (Abb. 11.4).

Ein Fokus in der aktuellen Diskussion ist das Recycling von Seltenen Erden (SEE), die z. B. in Magneten (Elektromotoren, Lautsprecher, Festplattenlaufwerke etc.) eingesetzt werden. Darin enthaltene Seltene Erden lassen sich aber nur durch Spezialverfahren rückgewinnen; in der Eisen-, Aluminium- oder Kupferverhüttung gehen sie verloren. Entsprechend ist es zwingend erforderlich, sie in der Aufbereitung von den Restfraktionen zu separieren. Ähnliches gilt für das Recycling von Cobalt (Co) oder Lithium (Li) aus Akkus, für das Indium(In)-Recycling aus LCD-Monitoren etc.. Ziel der Aufbereitung muss dabei auch sein, die Verschleppung von Edel- und Sondermetallen in ungeeignete Outputfraktionen zu vermeiden. So werden auch Edelmetalle in der Kunststoff-, Stahl- oder Alu-

miniumfraktion dem Recycling entzogen. Im physikalischen Sinne verschwinden diese Metalle nicht; sie stehen aber einer funktionalen Nutzung nicht mehr zur Verfügung. Gold zum Beispiel, das in die Stahlfraktion eingeschmolzen ist, bleibt dort „für immer“. Daher verdient die Aufbereitung besondere Aufmerksamkeit, und viele „klassische“ Verfahren wie intensives Shreddern, gefolgt von Sortierschritten (mit Magnet-, elektrostatischer und Dichtentrennung sowie optischer Sortierung) sind oft so nicht länger sinnvoll einsetzbar für die heute sehr komplexen Produkte. So sind zum Beispiel die Seltene Erden enthaltenden Magnete sehr spröde. Gibt man sie gemeinsam mit anderem Schrott in einen *Shredder*, dann werden Bruchteile der Magneten an Eisenoberflächen haften bleiben (am *Shredder* selbst oder anderen Stahl- bzw. Eisenteilen) und nicht mehr für das weitere Recycling zur Verfügung stehen können.

Für die kombinierte Gewinnung von Kupfer, Edelmetallen sowie von einigen Sondermetallen sind komplexe, großtechnische metallurgische Anlagen erforderlich. Umicore betreibt

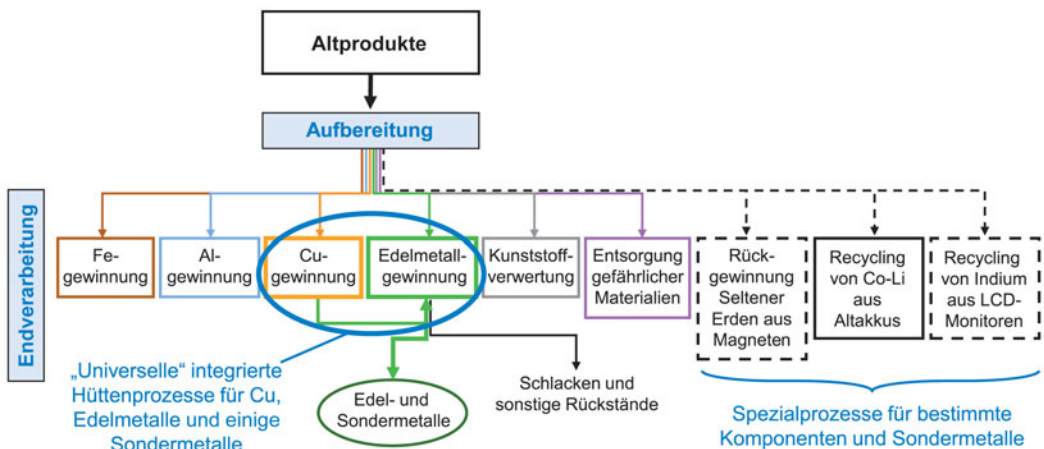


Abb. 11.4 Technische Herausforderungen beim Recycling komplexer Konsumgüter: Die Aufbereitung konditioniert komplexe Altprodukte für die anschließende stoffliche Gewinnung von Kunststoffen und verschiedenen Metallen



Abb. 11.5 Umicores integrierte Metallhütte zur Gewinnung von Edel- und Sondermetallen in Hoboken bei Antwerpen. Foto: © UMICORE

bei Antwerpen eine solche „integrierte Metallhütte“ (Abb. 11.5) und gewinnt dort neben den sieben Edelmetallen – Gold (Au), Silber (Ag), Platin (Pt), Palladium (Pd), Rhodium (Rh), Ruthenium (Ru), Iridium (Ir) – zwölf weitere Metalle zurück, darunter die Sondermetalle Cobalt (Co), Selen (Se), Tellur (Te), Antimon (Sb), Indium (In) und Gallium (Ga).

Durch solche spezialisierte Recyclingaktivitäten werden nicht nur wertvolle Rohstoffe zurückgewonnen und Schadstoffemissionen vermieden, sondern auch ein signifikanter Beitrag zum Klimaschutz geleistet. Denn der Energiebedarf zur Gewinnung von (Edel)metallen aus dem modernen Recycling erfordert nur einen Bruchteil der Energie, der bei der Gewinnung dieser Metalle im Bergbau benötigt würde. Entsprechend niedriger fallen die mit der Metallproduktion verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus.

Trotz des großen Potenzials werden erhebliche Mengen der Elektroaltgeräte in Europa nicht ordnungsgemäß recycelt. Die darin enthaltenen Metalle gehen verloren. Während ein Teil dieser Verluste durch Nicht-Erfassung oder Entsorgung über den Restmüll verant-

wortet wird, stellt der Export von Altgeräten in Entwicklungs- und Schwellenländer wahrscheinlich die größte Verlustquelle dar (Rolle 2011). Hierunter fallen zum gewissen Teil auch legitime Exporte von Gebrauchsgütern, die im Empfängerland noch eine Zeit lang genutzt, am Ende ihrer Lebensdauer dort jedoch nicht (effizient) recycelt werden. Mengenmäßig von weit größerer Bedeutung sind aber illegale oder halblegale Exporte solcher Altgeräte. Sofern in den Empfängerländern überhaupt ein Recycling stattfindet, sind die Ausbeuten im Vergleich zu modernen Anlagen äußerst gering (z.B. liegt die Goldausbeute aus Leiterplatten in „Hinterhofbetrieben“ bei unter 25 % im Vergleich zu deutlich über 95 % beim Umicore-Verfahren). Allerdings gibt es auch für die in Deutschland und Europa recycelten Altprodukte ein erhebliches Optimierungspotenzial. Ein Bericht des International Resource Panels (UNEP 2011) fasst das aktuelle Wissen zu den Recyclingraten am „Lebensende“ von Produkten zusammen. Diese liegen für die meisten Bunt- und Edelmetalle über 50 %; für viele Sondermetalle dagegen unterhalb von



1 %; ein effektives Recycling findet hier also kaum statt. Selbst die relativ guten Raten der Edelmetalle profitieren von ihrer Nutzung bei Industrieanwendungen und im Schmuckbereich. Bei den meisten Konsumgütern dagegen sind deren Recyclingraten enttäuschend niedrig. So liegen die Pt- und Pd-Raten bei industriellen Katalysatoren bei >90 %; bei Kfz-Katalysatoren bei 50–60 % und bei Pd in Elektronikbereich bei weniger als 10 %. Die durchschnittliche Rückgewinnung von Gold aus Elektronikschrott liegt bei 15 %.

Um die meist nur in geringen Konzentrationen enthaltenen Technologiemetalle effizient zu gewinnen, muss die Verfahrenskette anders ausgelegt sein als für die Gewinnung von Massenrohstoffen. Während z. B. für das Recycling von Glas, Kupfer- oder Stahlschrotten der Fokus zu Recht auf Durchsatz und Kostenminimierung liegt, muss bei den Technologiemetallen die Qualität der Rückgewinnung von „Spurenelementen“ im Vordergrund stehen, eine reine Massenstrombetrachtung und Kostenreduzierung führt zu erheblichen Verlusten an wertvollen Metallen.

Ähnlich wie bei der Elektronik bestehen auch bei Altfahrzeugen erhebliche Defizite am Lebensende; *Urban Mining* findet nur in einem viel geringeren Umfang statt als möglich. Entsprechend den Statistiken des Umweltbundesamtes wird in Deutschland von jährlich über 3 Millionen Fahrzeuglöschungen nur rund ein Sechstel der Autos im Land recycelt. Im Licht dieser erheblichen Ausflüsse relativiert sich die zunächst imposante Recyclingquote von über 85 %, denn diese bezieht sich nur auf die knapp 0,5 Millionen in Deutschland verwerteten Altfahrzeuge. Bezogen auf die gesamten Fahrzeuglöschungen fällt sie auf unter 15 % ab. Auch ist die Systemgrenze für die Ermittlung dieser Quote der Output der Aufbereitung. Der nachfolgende metallurgische Schritt der Metallrückgewinnung und Raffination wird nicht berücksichtigt. Bei Stahl treten hier zwar keine großen Verluste mehr auf, bei Edel- und Sondermetallen in Aufbereitungskonzentraten ist die Qualität

des metallurgischen Prozessor aber von entscheidender Bedeutung; bei vielen Prozessen kommt es hier zu erheblichen Verlusten. Von einer Kreislaufwirtschaft im Sinne des Wortes kann hier eigentlich nicht gesprochen werden. Hierfür müssten auch globale Ströme am Produktlebensende einem hochwertigen Recycling zugeführt werden.

### 11.3 Voraussetzungen für den Recyclingerfolg

Viele Produkthersteller sehen im Recycling heute oft noch eher eine Belastung und einen Kostenfaktor. Gerade für diese Industrien stellt effizientes Recycling aber eine Chance dar, um die Rohstoffbasis zu sichern und die Abhängigkeit von stark schwankenden Metallpreisen zu verringern. Vor allem bei Zukunftstechnologien wie Elektromobilität oder Photovoltaik ist es wichtig, frühzeitig intelligente Recyclingkonzepte zu erarbeiten. Diese gehen weit über technische Fragen hinaus und schließen Konsumentenverhalten, Anreizsysteme und Logistik mit ein. Für ein wirklich erfolgreiches Recycling müssen sieben aufeinander aufbauende Voraussetzungen erfüllt sein (Abb. 11.6):

1. Technische Rezyklierbarkeit des Materials / Bauteils (Grundvoraussetzung).
2. Zugänglichkeit des relevanten Bauteils: Aus einer Leiterplatte lassen sich z. B. viele Metalle mit hohen Ausbeuten zurückgewinnen, aber dafür muss diese zunächst aus einem ggf. komplexen Produktverbund entfernt werden können.
3. Wirtschaftlichkeit des Recyclingprozesses bzw. der Prozesskette: diese kann bereits intrinsisch vorhanden sein (z. B. durch den hohen Metallwert in einem Autokatalysator), sie kann aber auch extern geschaffen werden (z. B. Pfandsysteme für Getränkeflaschen).



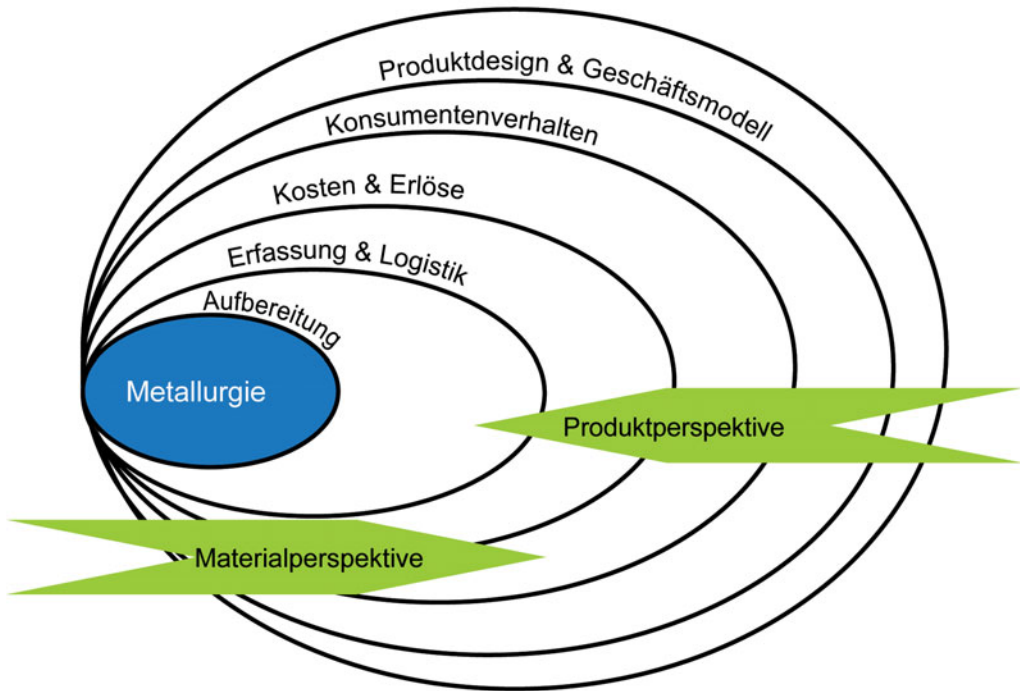


Abb. 11.6 Material- und Produktperspektive sind maßgeblich für den Recyclingerfolg

4. **Sammelerfolg:** Konsumenten müssen motiviert sein, ihre Altgeräte auch tatsächlich abzugeben (z.B. Problem „Schubladenhandys“). Eine wichtige Rolle spielen hierbei Geschäftsmodelle (z. B. Leasing, Pfand), Infrastruktur, Information und Gesetze.
5. **Einstuerung und Verbleib in der Recyclingkette:** Die einmal erfassten Altgeräte müssen in der Kette gehalten werden und dürfen nicht in intransparente Kanäle verschwinden. Die illegalen Exporte speisen sich aus solchen Ausschleusungen von gesammelten Altgeräten.
6. **Technisch-organisatorische geeignete Auslegung der Recyclingkette:** Die Anzahl der Sammelkategorien muss auf die Möglichkeiten der Aufbereitung abgestimmt sein (hier führt heute eine oft zu starke Vermengung von verschiedenen Produkten zu deutlichen Ausbringungsverlusten in der Aufbereitung), und die Verarbeitungsart und -tiefe der Aufbereitung muss sich an den Anforderungen der nachgeschalteten metallurgischen Metallgewinnung orientieren. Eine isolierte „Optimierung“ von Einzelprozessen führt meist zu suboptimalen Ergebnissen für das Gesamtsystem.
7. **Ausreichende Recyclingkapazitäten:** Diese erfordern hohe Investitionen in der Recyclingindustrie, vor allem für die Endverarbeitungsprozesse. Investitionswillen und finanzielle Mittel sind dort grundsätzlich vorhanden, aber ein Problem ist oft die Investitionssicherheit. Ohne flankierende politische Maßnahmen vor allem für die Bedingungen 4 und 5 besteht die Gefahr, dass teure Kapazitätserweiterungen am Ende nicht ausgelastet werden können.

Insgesamt sind noch erhebliche Anstrengungen aller Akteure erforderlich, um zu einer echten Kreislaufwirtschaft zu gelangen. Interdisziplinäre Ansätze können dabei eine Schlüsselrolle spielen, und für den Erfolg müssen sowohl die Material- als auch die Produktperspektive berücksichtigt werden (Abb. 11.6).

Wenn dies gelingt, ergibt sich daraus neben den positiven Effekten für Beschäftigung, Ressourcen und Schadstoffmanagement auch ein großes CO<sub>2</sub>-Vermeidungspotenzial. Ziel muss daher sein, einmal in den Verkehr gebrachte Metalle auf Dauer im Kreislauf zu halten (Abb. 11.7).

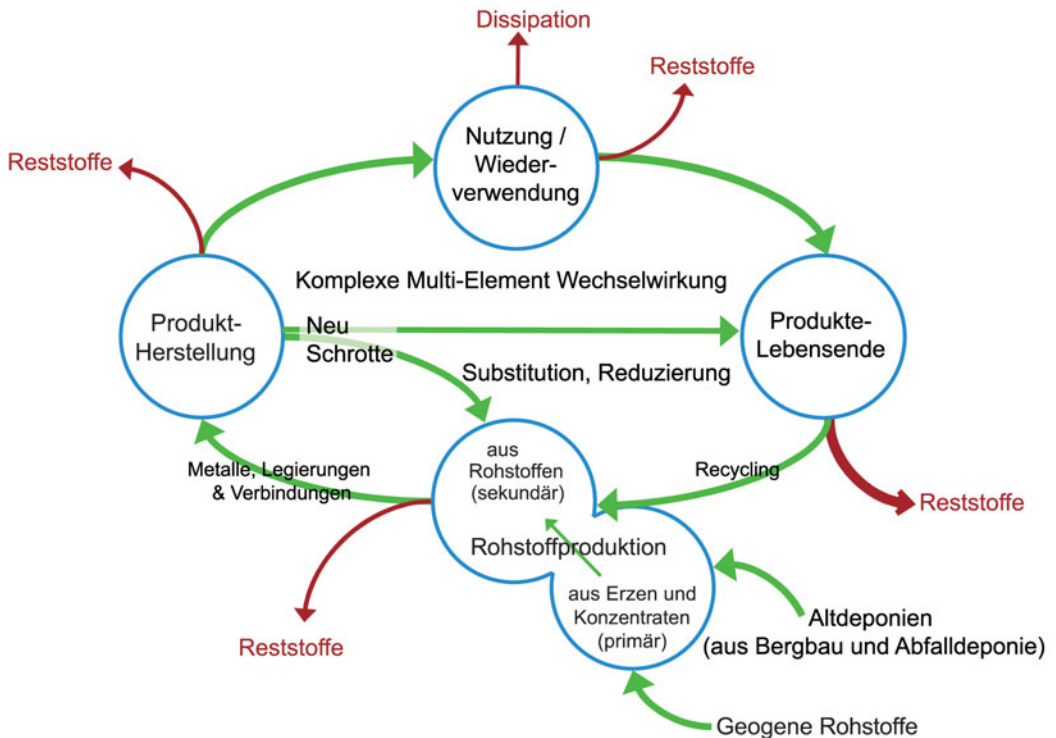


Abb. 11.7 Vision der Kreislaufwirtschaft entlang des Produkt- und Materiallebenszyklus

Hierfür gilt es:

- Stoffabflüsse auf allen Stufen des Lebenszyklus zu minimieren,
- dort, wo diese unvermeidlich sind, sicherzustellen, dass sie recycelt werden,
- dieses Recycling qualitativ hochwertig durchzuführen, um Verluste so gering wie möglich zu halten.

In diesem Sinne muss „Urban Mining“ als ein sehr umfassender Ansatz verstanden werden, der weit über das Recycling von Deponien und Gebäudeinfrastruktur hinausgeht. Letztlich umfasst er alle Arten der anthropogenen Lagerstätte, Altprodukte wie Elektronikgeräte oder Fahrzeuge nehmen dabei wegen ihrer hohen Relevanz für Technologiemetalle eine zentrale Rolle ein.

## Quellenverzeichnis

- Achzet B, Reller A, Zepf V, Rennie C, Ashfield M, Simmons J (2011) Materials critical to the energy industrie. An introduction. University of Augsburg
- Buchert M, Hermann A, Jenseit W, Stahl H, Osyguß B, Hagelüken C (2007) Optimization of precious metals recycling: Analysis of exports of used vehicles and electrical and electronic devices at Hamburg port, Dessau. Federal Environmental Agency of Germany
- Chancerel P, Meskers CEM, Hagelüken C, Rotter S (2009) Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment. *J. Ind. Ecol.* 13, 5: 791–810
- EC (2010) Critical raw materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, Enterprise and Industry Directorate General, 85p. [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/documents/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/documents/index_en.htm). Letzter Zugriff 5.04.2013
- EU-COM (2012) Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Making raw materials available for Europe's future well being – proposal for a European innovation partnership on raw materials, Brussels, 29. Februar 2012, 82 final
- Eurometaux (2010) Eurometaux's proposals for the raw materials initiative, Darmstadt / Brussels, 11. Juni 2010. <http://www.oeko.de/oekodoc/1069/2010-115-en.pdf> und Anhang, Letzter Zugriff 5.04.2013
- Hagelüken C (2006) Recycling of electronic scrap at Umicore's integrated metals smelter and refinery. *World of metallurgy – Erzmetall* 59, 3: 152–161
- Hagelüken C, Meskers CEM (2008) Mining our computers – opportunities and challenges to recover scarce and valuable metals from end-of-life electronic devices. In: Reichl H, Nissen N, Müller J, Deubzer O (eds) *Electronics goes green 2008+*. Fraunhofer IRB Verlag: Berlin, S. 623–628
- Hagelüken C, Meskers CEM (2010) Complex lifecycles of precious and special metals. In: Graedel T, van der Voet E (eds) *Linkages of sustainability*. Strüngmann Forum Reports, The MIT Press, Boston, S. 165–197
- Hagelüken C, Corti CW (2010) Recycling of gold from electronics: cost-effective use through 'design for recycling'. *Gold Bulletin* 43, 3: 209–220
- Hagelüken C (2012) Recycling the platinum group metals: a European perspective. *Platinum Metals Rev* 56, 1: 29–35
- Hagelüken C (2012) Secondary raw material sources for precious and special metals. In: Sinding-Larsen R, Wellmer F-W (eds) *Non-renewable resource issues: geoscientific and societal challenges*. Springer, Dordrecht Heidelberg London New York, S. 195–212
- Meskers CEM, Hagelüken C, Salhofer S, Spitzbard M (2009) Impact of pre-processing routes on precious metals recovery from PCs. *Proceedings European Metallurgical Conference 2009*, 2: 527–540.
- Metal Bulletin (2010) Metal Bulletin Ltd. <http://www.metalbulletin.com>. Letzter Zugriff 17.05.2013
- Rochat D, Hagelüken C, Keller M, Widmer R (2007) Optimal recycling for printed wiring boards in India. In: Hilty LM, Edelmann X, Ruf A (eds) *R'07, World Congress – Recovery of materials and energy for resource efficiency*.
- Rolle C (2011) Industrieanforderungen an eine sichere Rohstoffversorgung. In: Kausch P, Bertau M, Gutzmer J, Matschullat J (Hrsg) *Energie und Rohstoffe. Gestaltung unserer nachhaltigen Zukunft*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, S. 119–133
- Sander K, Schilling S (2010) Transboundary shipment of waste electrical/electronic equipment/electronic scrap – optimization of material flows and control, Federal Environment Agency Report No. (UBA-FB) 1331, Dessau, Germany
- Schüler D, Buchert M, Liu R, Dittrich S, Merz C (2011) Study on rare earths and their recycling. Final report for the Greens/EFA Group in the European Parliament. Öko-institut e.V. Darmstadt, Germany, 140 S.

- UNEP StEP Report (2009) Recycling – From E-waste to Resources. Berlin, Germany, 120 S. <http://www.unep.org> and <http://www.step-initiative.org>
- UNEP (2011) Recycling rates of metals – a status report, A report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, Graedel TE, Alwood J, Birat JP, Reck BK, Sibley SF, Sonnemann G, Buchert M, Hagelüken C. [http://http://www.unep.org/resourcepanel/metals\\_recycling](http://http://www.unep.org/resourcepanel/metals_recycling). Letzter Zugriff 5.04.2013
- UNEP (2013) Metal recycling – opportunities, limits, infrastructure. A report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Autoren: Reuter MA, Hudson C, van Schaik A, Heiskanen K, Meskers C, Hagelüken C. [http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metal\\_Recycling\\_Full\\_Report.pdf](http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metal_Recycling_Full_Report.pdf). Letzter Zugriff 8.05.2013
- USGS (2010) Commodity Statistics and Information. U.S. Geological Survey. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>
- Van Schaik A, Reuter MA (2010) Dynamic modeling of e-waste recycling system performance based on product design. Miner. Eng. 23: 192–210
- Van Schaik A, Reuter MA (2012) Shredding, sorting and recovery of metals from WEEE: linking design to resource efficiency. In: Goodship V, Stevels A (eds) Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook (in press)

## Kernaussagen

- Eine sichere Versorgung mit den für Spitzentechnologie-Anwendungen essenziellen Edel- und Sondermetallen wird als zunehmend kritisch für die europäische Volkswirtschaft angesehen.
- Altprodukte bilden eine wichtige Rohstoffquelle für diese Metalle, die durch ein umfassendes Recycling erschlossen werden kann. Hierfür reichen allerdings die bestehenden, auf Massenströme ausgelegten Recyclingansätze nicht aus; es gilt stattdessen hocheffiziente Prozessketten zu entwickeln, die mit hohen Ausbeuten auch die nur in Spuren enthaltenen „Technologiemetalle“ gewinnen.
- Neben innovativen Recyclingprozessen sind hier die Auslegung des Gesamtsystems und die Vermeidung von unkontrollierten Abflüssen entscheidend. Hier bestehen erhebliche Defizite, und die derzeitigen großen Metallverluste können nur durch eine systemische Optimierung entlang der Wertschöpfungskette vermieden werden.

# 12 Integrierte Wiederverwendung von Hightech- und Greentech-Abfällen

Wolfram Palitzsch und Ulrich Loser

## 12.1 Abfall als Rohstoff

„Wenn niemand etwas dagegen tut, dann verwandelt sich alles in einen mausgrauen Matsch“ – so formulierte Boulding bereits 1971 seine Ansicht zu der Tatsache, dass der menschliche Abfall in höherem Ausmaß zur Entropie beiträgt, als der natürliche fortwährende Prozess des sich Vermischens, der ohnehin auf der Erde abläuft. Der Mensch hat sich zunächst den Lagerstätten mit den höchsten Konzentrationen zugewandt und wird nunmehr zukünftig gezwungen sein, mit immer weniger konzentrierten Vorkommen zurechtzukommen zu müssen. In dieser Zeit, in der vielerorts erwogen wird, wie diverse Materialien aus Rohstofflagerstätten mit geringsten Gehalten gewonnen werden können, eröffnet sich ein vielversprechender Weg – die Wiederverwendung, das Recycling. Hierin liegt eine großartige Chance, produzieren zu können, ohne natürliche Ressourcen anzugreifen. Allerdings muss man eine Ausnahme separat betrachten, wenn man auch Energie zu diesen Ressourcen zählt. Jedes Verfahren zur Wiederverwertung verbraucht Energie, und das beginnt bereits bei Sammlung und Transport. An einigen ausgewählten Beispielen wird im Folgenden beschrieben, welche Herausforderungen und Schlüsselfragen für ökonomische und ökologische Recyclingverfahren zu betrachten sind

und welche Lösungsansätze zum Erfolg führen können.

Neben den auf Silizium basierenden Photovoltaik(PV)-Technologien gibt es aktuell eine Vielzahl anderer PV-Abfälle, basierend auf Dünnschichttechnologien mit Kupfer-Indium-Diselenid (CIS), Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS), Cadmiumtellurid (CdTe) und Galliumarsenid (GaAs). Indium (In), Selen (Se), Tellur (Te), Gallium (Ga) sind Metalle, die in einem rohstoffarmen Land wie Deutschland fast vollständig importiert werden müssen. Die wirtschaftliche Bedeutung des Recyclings von PV-Modulen und die damit verbundene erneute Verwendung von diesen Metallen ist daher inzwischen ein wichtiges Thema. Aber die dissipative Verwendung vieler spezieller Materialien in unzähligen Produkten (Dünnschicht-Photovoltaikmodule, Mobiltelefone, Flachbildschirme etc.) erschwert das Recycling und erlaubt die Rückführung in Recyclingkreisläufe nur bis zu einem gewissen Grad. Aus einer Tonne CdTe-haltigem Dünnschichtphotovoltaik-Produktionsabfall können theoretisch ca. 200 g Te erhalten werden. Als Reinstoff mit einem Gehalt von 99,95 % hatte es 2012 einen Wert von 30 US-Dollar (U.S. Geological Survey 2013). Für diesen theoretischen Erlös ist allerdings ein Recycling von einer Tonne Dünnschicht-PV-Abfall nicht darstellbar. Dieses Beispiel ist auf viele ähnlich geartete Fälle für



sogenannte *Greentech*- und *Hightech*-Abfälle übertragbar. Allzu oft führt die Fokussierung auf enthaltene wertvolle Metalle schnell zu der Erkenntnis, dass sich deren Aufarbeitung wirtschaftlich nicht darstellen lässt, zumal allgegenwärtig ein gewisser Energiebeitrag mit entsprechenden Kosten zu beachten ist. Werden allerdings Synergien einbezogen, universelle Verfahren angewendet und strebt man ein Verwertungsverfahren an, das möglichst jeden Bestandteil des jeweiligen Abfalls in Produkte überführen kann, dann hat man gute Chancen, ein wirtschaftlich erfolgreiches Recycling zu etablieren. Die Loser Chemie GmbH versucht mit solchen Verwertungsstrategien einen Beitrag zur Lösung der oben beschriebenen Probleme zu leisten.

## 12.2 Siliziumzellen-Abfall aus der PV-Industrie – ein 100%iger Sekundärrohstoff

Der Preis für Aluminium (Al) stieg zwischen 2001 und 2005, erfuhr eine hohe Preisvolatilität für den Zeitraum 2006 bis 2008, gefolgt von einem starken Rückgang im Jahr 2009 und einem erneuten relativ starken Anstieg, der bis heute andauert (Monier u. Hestin 2011). Als Produzent von großen Mengen an Al-Salzen, die in der Wasseraufbereitung zum Einsatz kommen, waren wir gezwungen, auf unserer Rohstoffseite zu substituieren. Uns war klar, dass die angestrebte Substitution nur dann ein Ausweg aus unserer Misere sein kann, wenn es uns gelänge, unsere Rohstoffe durch bisher ungenutzte Materialien zu ersetzen, denn es ist offensichtlich, dass wir langfristig nichts gewinnen werden, wenn wir unsere Rohstoffe durch anderweitig bereits verwendete Rohstoffe ersetzen, da auch diese dann stärker nachgefragt sein werden.

So waren wir auf der Suche nach alternativen Rohstoffen bzw. Abfällen, die Aluminium ent-

halten und möglichst zu 100 % verwertbar sind. Ein Beispiel von vielen ist Siliziumzellbruch, der zum Teil mit Al- und Silber(Ag)-Pasten bedruckt war, wie in Abbildung 12.1 gezeigt.

Dieses Material bietet Synergien, weil man alle Komponenten wiederverwenden kann. Zwar war für unsere eigene Produktion nur das Aluminium von Interesse, doch die Möglichkeit, durch selektive Ablösung und Verwertung von Al ein weiteres interessantes Material, das „nur“ noch aus Silizium und den Ag-Kontakten besteht, zu erhalten und schließlich durch die Abtrennung des Silbers vom Silizium aus einem Abfall drei wertvolle Einzelkomponenten zu generieren, eröffnete die Perspektive, ein abfallfreies Recyclingverfahren zu etablieren. Dies ist ein kleiner Beitrag, um die Frage zu beantworten: *„Das bringt uns auf die wirtschaftlichen Aspekte des PV-Recyclings – ist es wirklich finanzierbar?“* (Larsen 2009).



**Abb. 12.1** Siliziumzellenbruch als Sekundärrohstoff, Al, Si und Ag enthaltend

Wir entmetallisieren bedruckte Silizium-Wafer und gebrochene Solarzellen oder Produktionsabfälle, egal ob diese ungebrannt oder gebrannt sind. Wir verwenden dafür eine sehr einfache Methode, um möglichst keinen neuen Abfall zu erzeugen, sondern gleichzeitig weitere verkaufsfähige Produkte herzustellen (Palitzsch 2009). Durch die Verwendung einer frischen Lösung von Aluminiumchlorid in Wasser haben wir einen Weg gefunden, um das Al auf der Rückseite der Si-Solarzelle bei gleichzeitiger Gewinnung eines Wertstoffes zu entfernen. Im Verlaufe der Reaktion bildet sich ein sogenanntes Polyaluminiumhydroxidchlorid  $[Al_n(OH)_mCl_{3n-m}]$ , das üblicherweise durch einen Druckaufschluss aus Aluminiumhydroxid und konzentrierter Salzsäure bei hohen Temperaturen hergestellt wird. Die chemische Reaktion zwischen dem Rückkontakt-Aluminium und der verdünnten Aluminiumchloridlösung ist sehr einfach und der normalerweise angewandten Behandlung mit Natriumhydroxid überlegen. Nach der Entfernung des Aluminiums von dem bedruckten Silizium-Schrott wurde ein Gewichtsverlust von 12,4 % bestimmt. Die erhaltene Polyaluminiumhydroxidchlorid-Lösung wies eine Basizität von 45,7 % aus und enthielt mit 9,11 % Al den für derartige Produkte üblichen Al-Gehalt. Im nächsten Schritt wurde das verbliebene Silber abgelöst und das Silizium-Material gewaschen und getrocknet.

Die hierfür angewendete Technologie kommt dabei ohne die Bildung nitroser Gase aus, die bei Anwendung von Salpetersäure zu erwarten ist. Dabei bedienen wir uns einer Art Transportsystem, das Ag aus Abfällen mit nur sehr geringer Ag-Konzentration auflöst und durch die Zugabe von stöchiometrischen Mengen an Salzsäure (HCl), bezogen auf die Ag-Menge, zurückgebildet wird – bei gleichzeitiger Abgabe des Ag-Salzes. Dieses liegt nun in sehr konzentrierter Form vor. Schlüsselverbindung für diese Technologie ist die Methansulfonsäure, deren Ag-Salze sehr gut löslich sind. Damit gelingt es wirtschaftlich, auch geringste

Mengen an Ag aus verschiedensten Ag-haltigen Materialien zu konzentrieren.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Umweltverträglichkeit der Methansulfonsäure, da sie nach der OECD Richtlinie 301A biologisch abbaubar ist. In Abbildung 12.2 ist ein Schema dargestellt, welches am Beispiel für das System silberhaltiger Abfall/Methansulfonsäure/Wasserstoffperoxid zeigt, wie die kontinuierliche Extraktion und damit Konzentration des Metalls erfolgt.

Teile des Siliziums, das aus diesem Recyclingprozess resultierte, wurde direkt einem Schmelzprozess unterzogen (siehe Abb. 12.3).

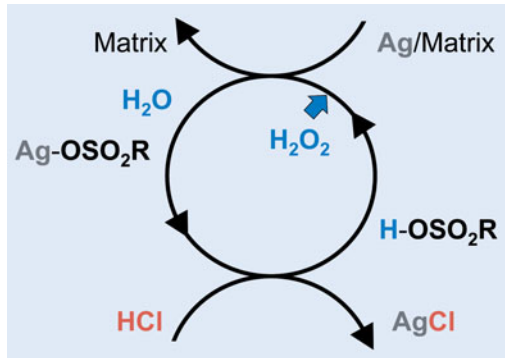


Abb. 12.2 Schema zum Silberrecycling

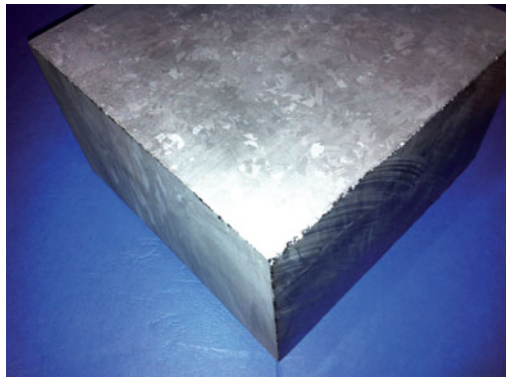


Abb. 12.3 Si-Barren von behandeltem Si-Zell-Abfall

### 12.3 Ein universelles nasschemisches Recyclingverfahren für Dünnschicht-Photovoltaik-Abfall

Cadmium (Cd), Selen (Se), Tellur (Te), Gallium (Ga), Molybdän (Mo) und Indium (In) sind einige der wichtigsten Elemente, die in Dünnschicht-Solarzell-Typen verwendet werden. Wir wissen um die Grenzen der Verfügbarkeit dieser Elemente bzw. um die aktuellen Schwierigkeiten der Industrie, sicher damit versorgt zu sein. Somit ist das Recycling von diesen Abfällen und auch mit Blick auf kommende *End-of-life*-Abfallströme ein aktuelles Thema. Andererseits sind bereits gesetzliche Vorschriften, wie z. B. das neue deutsche „Kreislaufwirtschaftsgesetz“, auf eine maximale Quote beim Verwerten angelegt – bei einem Minimum an Einsatz von Ressourcen (z. B. Energie und Rohstoff). Und weiterhin sind für *Hightech*- und *Greentech*-Produkte auch europaweit neue Richtlinien in Arbeit, wie die für die Photovoltaik-Industrie in naher Zukunft verbindliche Richtlinie des Europäischen Parlamentes und Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE-Richtlinie). Diese regelt umfassend das fachgerechte

Verwerten von Elektro(nik)altgeräten, inklusive dessen Finanzierung durch die Produzenten – und zukünftig eben auch das Recycling von Photovoltaikmodulen. Aus diesen Entwicklungen wird zusätzlich das Interesse an wirtschaftlichen Recyclingverfahren generiert.

Dünnschicht-Solarmodule sind zurzeit als Glas-Glas-Standard-Module erhältlich. Die Dünnschichtmaterialien werden üblicherweise in mehreren Schritten auf einer Glasscheibe als Substrat abgeschieden und strukturiert. Eine weitere Glasscheibe wird von der anderen Seite laminiert, sodass ein einbaufähiges Modul erhalten wird (Bonnet et al. 1993; Jordon u. Lampkin 1993). Dabei werden als chlorfreie Kunststoffe u. a. Ethylen/Vinylacetat (E/VA oder EVA) verwendet. Ein gängiges Maß für die Standard-Module ist 600 x 1.200 mm. Es ist bekannt, dass die seltenen Metalle in der Regel nur ca. 1 % des Gewichtes eines Photovoltaik-Modules ausmachen, wobei ihr Wert für sich allein genommen und auf die großen Mengen an PV-Modulen bezogen immer noch signifikant ist. Damit stellt sich für diese Abfälle die berechtigte Frage, was aus den restlichen Materialien werden soll. Bei genauer Betrachtung stellt sich heraus, dass die Hauptabfallmenge hochwertiges Flachglas ist, das mit den entsprechenden Halbleiterschichten überzogen wurde (s. auch Abb. 12.4).



Abb. 12.4 Dünnschicht-Glasscherben mit Halbleiterbeschichtung.  
Foto: © Tom Baerwald



Gelingt also das einfache Ablösen der photoaktiven Schichten, bleibt hochwertiges Glas zurück (Abb. 12.5), das bei Flachglasherstellern als Rohstoff hochwillkommen ist, weil sich neben den Rohstoffen für die Flachglasproduktion natürlich auch Energie einsparen lässt.

Die Solarmodule, gleich ob als komplette

Doppelglasmodule, Bruch oder Einzelscheiben mit oder ohne Laminat, werden mechanisch so beansprucht, dass der elastische Kunststoff strukturell bzw. mechanisch kaum zerstört wird (Abb. 12.6), während die spröden Anteile (Glas) zerfallen und ausgeschleust werden können (Abb. 12.7).



**Abb. 12.5** „Entspiegeltes“ Flachglas als Rohstoff für die Flachglasproduktion. Foto: © Tom Baerwald



**Abb. 12.6** Laminat mit anhaftenden Halbleitern. Foto: © Tom Baerwald



**Abb. 12.7** Glas mit anhaftenden Halbleitern. Foto: © Tom Baerwald

Diese mechanische Behandlung kann beispielsweise kontinuierlich mittels Exzentrerschwingmühle oder diskontinuierlich mittels Scheibenschwingmühle durchgeführt werden. Dabei werden die spröden Materialien so zerkleinert, dass ein Abtrennen der anorganischen Bestandteile von den Kunststoffen möglich wird. Beide Fraktionen werden anschließend der nasschemischen Nachbehandlung mit verdünnter Salzsäure und katalytischen Mengen Wasserstoffperoxid unterzogen. Nach kurzer Kontaktzeit sind die Metalle in Lösung gegangen, und es kann filtriert werden. Die Glas- und Kunststofffraktion werden gewaschen. Das Waschwasser wird zur Verdünnung von konzentrierter HCl verwendet und kann der nächsten Behandlung zur Verfügung gestellt werden. Die sauberen Fraktionen Glas und Kunststoff sind auf den Abbildungen 12.8 und 12.9 dargestellt.

Nach der Klassifizierung und Kontrolle mittels Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie durch unseren Partner Reiling Glas Recycling GmbH & Co. KG und Sammlung des Materials für den Transport zum Flachglashersteller Saint-Gobain Glass Deutschland konnte dort im Großversuch nachgewiesen werden, dass das sogenannte *Cullet* aus der Verwertung von Photovoltaikabfall einen hochwertigen Rohstoff darstellt und für die Flachglasproduktion geeignet ist. Damit ist der Verwertungsweg

für die Matrix bzw. die Hauptabfallmenge des PV-Schrottes erschlossen, was das Recycling unter dem Ansatzpunkt der Sicherung seltener Metalle, wie In, Ga und Te, am Ende doch wirtschaftlich interessant macht. Die polymetallischen Lösungen, die aus diesem Prozess resultieren, stellen nun ihrerseits durch das Potenzial der Konzentrationserhöhung für spezielle Industriezweige einen Rohstoff dar und können einer weiteren Verarbeitung zugeführt werden. Bei der Produktion von Dünnschicht-Photovoltaikmodulen fallen jedoch nicht nur Scherben oder laminierte Schrotte an, sondern auch erhebliche Mengen an Halbzeugen – ganze Glasplatten, die vor der Laminierung aussortiert werden. Diese Scheiben können gestapelt dem Recyclingprozess zugeführt werden und unzerkleinert im chemischen Bad behandelt werden. Als Resultat werden entmetallierte Glasscheiben erhalten, die, wie optische Untersuchungen ergaben, durchaus für eine Verwendung als Treibhausglas geeignet sind. Die Lichtdurchlässigkeit (Transmission) eines Glases hängt im Gegensatz zur Reflexion nicht vom Einstrahlwinkel ab. Die Wärmestrahlung der Sonne, sie liegt im nahen Infrarotbereich zwischen 700 und 2.000 nm, wird von reinem Glas zu etwa 90 % durchgelassen. Das recycelte Glas lässt die Sonnenwärme zwar nur mit 70 % durch, doch haben wir durch einen auf der Glasplatte verbliebenen



**Abb. 12.8** Gewaschenes und getrocknetes Laminat. Foto: © Tom Baerwald



**Abb. 12.9** Gewaschenes und getrocknetes Glas (*Cullet*). Foto: © Tom Baerwald



dünnen Film der ursprünglichen TCO-Beschichtung ein anderes Reflexionsverhalten als bei normalem Glas (TCO, engl.: *transparent conducting oxides* sind transparente, elektrisch leitfähige Oxide). Freie Elektronen in einer Schicht sind für die Reflexion entscheidend. So werden beispielsweise dünnste Ag-Schichten mit sehr hoher Leitfähigkeit, also entsprechend vielen Elektronen, genutzt, um Wärme

zu reflektieren. Die auf unserem Material verbliebene TCO-Schicht wird sich vom Prinzip her ähnlich verhalten, was bei Verwendung in Gewächshäusern eher ein Vorteil sein sollte. Die Nutzung von behandelten Photovoltaikhalbzeugen für konstruktive Anwendungen, wie hier anhand eines Gewächshauses gezeigt (Abb. 12.10), eröffnet weitere neue Verwertungsmöglichkeiten für diese Abfälle.



**Abb. 12.10** Gewächshauskonstruktion unter Verwendung von recycelten PV-Glasplatten 1.200 mm x 600 mm.  
Quelle: Palitzsch et al. 2012. Foto: © Dirk Herfurth, Mounting Systems, Inc., 820 Riverside Parkway, West Sacramento, CA 95605, USA

## 12.4 Anwendung auf SEE-haltige Abfälle

Die konsequente Fortsetzung dieser Philosophie führt unweigerlich zu Versuchen, die oben beschriebene Herangehensweise auf andere *Hightech*- bzw. *Greentech*-Abfälle zu übertragen. Zum Beispiel das *Recycling von Seltenerdmetallnetzwerkstoffen* auf Basis von Neodym-Eisen-Bor (Nd-Fe-B) bzw. Samari-

um-Cobalt (Sm-Co). Diese erlauben heute viele innovative Produktentwicklungen und bilden das Rückgrat für moderne Technologien, wie die Schaffung von Elektromobilität oder Prozesse für die Nutzung erneuerbarer Energien. Diese intermetallischen Verbindungen bestehen aus Seltenerdmetallen (wie Sm oder Nd) und Übergangsmetallen (wie Co oder Fe), wobei in Sm-Co-Materialien zusätzlich noch Gd, Fe, Cu, und Zr enthalten sein können. Auch für das klassische

## 12

Nd-Fe-B-System spielen – je nach Applikation – noch andere Seltene Erden, wie Praseodym (Pr), Dysprosium (Dy) und Terbium (Tb), eine bedeutende Rolle. Bei der Herstellung solcher *Hightech*-Magnete des Nd-Types werden allerdings etwa 20–30 % des Magnetmaterials bei der Bearbeitung zu Abfall, gleichbedeutend mit 1.500 bis 2.500 Tonnen Abfall pro Jahr. Auch im Falle von Sm-Co-Magneten werden etwa 15–30 % der Rohmaterialien zu Produktionsabfall (Lui u. Chinnasamy 2012).

Auch hier sehen wir als Erfolgsrezept für ein wirtschaftliches Recycling von Seltenerd-magneten die Verwertung aller beteiligten Elemente und deren Überführung in eine jeweils nützliche Form. Durch schrittweise Behandlung des Abfalls (Abb. 12.11) gelingt es, verwertbare Stoffe zu erzeugen, wie das in Abbildung 12.12 dargestellte Neodymsalz, verschiedene Borverbindungen und zu einem großen Teil das für uns, als Wasseraufbereiter, benötigte Fällmittel auf der Basis von Eisen.

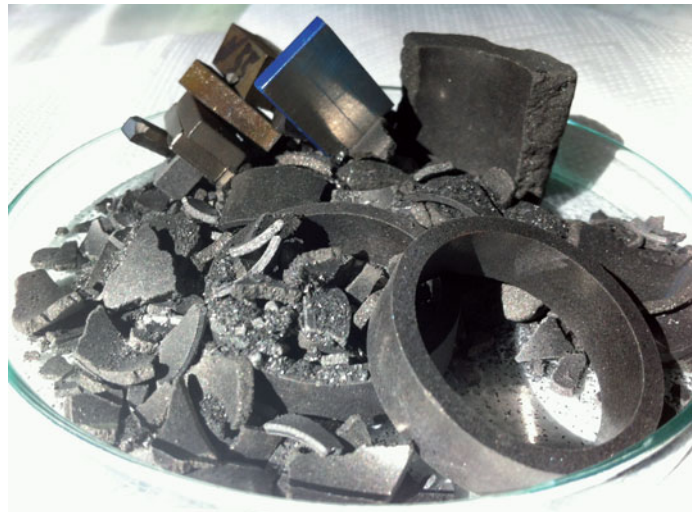


Abb. 12.11 Neodymhaltiger Magnetschrott



Abb. 12.12 Aus Nd-Schrott isoliertes Neodymsalz

## Quellenverzeichnis

- Bonnet D, Henrichs B, Jaeger K, Richter H (1993) Anmelder: Battelle Institut E V. Patent: EP 0535522 A2. Verfahren zur Herstellung von pn CdTe/CdS-Dünnschichtsolarzellen, Veröffentlicht: 07.04.1993
- Boulding KE (1971) Is economics culture-bound? American Economic Review, Mai 1971, 60: 406–411. <http://www.jstor.org/stable/1815837>. Letzter Zugriff 5.08.2013
- Jordon JF, Lampkin CM (1993) Anmelder: Photon Power. Patent: US 4243432. Solar cell array
- Larsen K (2009) End-of-life PV: then what? Recycling Solar PV panels. Renewable energy focus, 3 August 2009. <http://www.renewableenergyfocus.com/view/3005/endoflife-pv-then-what-recycling-solar-py-panels/>. Letzter Zugriff 24.04.2013
- Liu J, Chinnasamy C (2012) Rare Earth Elements Workshop 2012, U.S. Environmental Protection Agency, Colorado
- Monier V, Hestin M (2011) Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE directive, Final report. ENV.G.4/FRA/2007/0067, 14 April 2011, 19 S.
- Palitzsch W (2009) Anmelder: Palitzsch W, Loser U. Patent: DE102007034441A1. Low-waste removal of metals from PV Si-cell-waste, Veröffentlicht: 22.01.2009
- Palitzsch W, Herfurth D, Loser U (2012) From Green Energy to Green Greenhouses – an off-beat recycling idea, 27<sup>th</sup> EU PVSEC, Frankfurt 2012
- U.S. Geological Survey (2013) Mineral Commodity Summaries, January 2013, prepared by George MW

## Kernaussagen

- Abfallstoffe sind häufig wertvolle Rohstoffe, die sich zu einer Vielzahl von Wertprodukten recyceln lassen.
- Auch wenn die Wiedergewinnung einzelner Komponenten nicht wirtschaftlich ist, können beim Recycling des gesamten Materials wirtschaftlich tragfähige Prozesse resultieren.
- Komplexe polymetallische Gemische lassen sich mit den Methoden der modernen Chemie effizient trennen.
- Recycling von Abfallstoffen darf nicht zu neuen Abfällen führen.

# 13 Von der Klärschlammmasche zum Phosphordünger

## RecoPhos P38 im Spannungsfeld von Abfall-, Düngemittel- und Bodenschutzrecht

Harald Weigand und Martin Bertau

### 13.1 Einführung

Verknüpft mit dem weltweiten Bevölkerungswachstum ist eine stetig wachsende Nachfrage nach Nahrungsmitteln. Um diese zu decken, müssen die Nährstoffentzüge landwirtschaftlich genutzter Böden durch Ausbringung von Düngemitteln kompensiert werden. Der Pflanzennährstoff Phosphor (P) wurde den Produktionsflächen der präindustriellen Landwirtschaft traditionell in Form von Wirtschaftsdünger wie Gülle und Festmist zugeführt. Ab Mitte des 19. Jahrhunderts gewannen zunehmend importierte Nährstoffquellen wie Guano an Bedeutung. Mit Beginn des Abbaus von Phosphaterzen und deren Verarbeitung zu Düngemitteln schien zunächst eine beliebig verfügbare P-Quelle zur Verfügung zu stehen, die maßgeblich zur Ertragssteigerung in der landwirtschaftlichen Produktion beitrug (Cordell et al. 2009).

Jedoch ist festzustellen, dass die Phosphatgehalte im Roherz rückläufig sind. Die Rate der Abnahme des  $P_2O_5$ -Gehalts wurde mit 1 % pro Dekade abgeschätzt (Abouzeid 2008). Da abnehmenden  $P_2O_5$ -Gehalten eine zunehmende Verunreinigung der Erze entspricht, kann eine korrespondierende Steigerung des Aufwands für die Aufbereitung der Erze unterstellt werden. Diese führt in den Herkunftsländern zu teilweise erheblichen Umweltbelastungen

(Gaudry et al. 2007) und limitiert laut Cordell et al. (2009) ab einem kritischen Zeitpunkt die Förderung der Phosphaterze bei anhaltender Nachfrage. Dieser Zeitpunkt wurde analog zum „Peak Oil“ als „Peak Phosphorus“ bezeichnet und für das Jahr 2033 vorhergesagt.

Als besonders problematisch gilt die zunehmende Belastung des gewonnenen Phosphaterzes mit Cadmium und Uran (Romero Guzmán et al. 2002; Pinnekamp et al. 2003; Wave 2003; Chien et al. 2011). Während der Verarbeitung der Erze werden diese Elemente teils in den Phosphordünger transferiert, teils reichern sie sich in dessen bedeutsamstem Nebenprodukt, dem sog. Phosphorgips an (Keyzer 2010; Chien et al. 2011). Mit der Aufbereitung verbundene Mehrkosten sowie geringere Exportmengen bei gleichzeitig höherem Eigenbedarf der Herkunftsländer haben in der Vergangenheit zu einer Verknappung des Rohstoffs geführt und sich entsprechend in der Preisentwicklung niedergeschlagen.

Ein Gradmesser für die Phosphat-Versorgungssicherheit ist die sog. Reichweite. Diese ergibt sich aus den Phosphatreserven, die zu Kosten von weniger als 40 US\$/t  $P_2O_5$  abgebaut werden können, dividiert durch den Verbrauch von derzeit ca. 156 Mio. t pro Jahr (Jasinski 2010). Solange der Verbrauch durch die Exploration neuer wirtschaftlich abbaubarer Vorkommen kompensiert wird, gilt die Reichweite als ‚statisch‘ und wird derzeit mit ca. 120 Jahren

angegeben. Vor diesem Hintergrund ist die medial wirksame Aussage, in rund 100 Jahren seien die weltweiten P-Vorräte erschöpft, kritisch zu hinterfragen. Dies wäre nur dann zutreffend, wenn sämtliche Erschließungsaktivitäten eingestellt würden oder die erschlossenen Vorräte nicht wirtschaftlich abbaubar wären. Dennoch ist Vorsorge für die Sicherung der Versorgung zu treffen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der Entwicklung der Düngemittelpreise und der geopolitisch relevanten Konzentration der bekannten Phosphat-Reserven auf einige wenige Länder (GJA 2012).

## 13.2 Phosphorrückgewinnung – Motivation und Fortschritte

Mit Blick auf die zunehmende Ressourcenverknappung, die damit einhergehende Preisteigerung und die abnehmende Qualität der Phosphaterze sind Methoden zur effizienteren Verwendung von Phosphordüngemitteln sowie Rückgewinnung von P aus sekundären Quellen in den Fokus gerückt (Cordell et al. 2011).

In Deutschland wurde 2011 seitens des Wissenschaftlichen Beirats für Düngungsfragen des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz ein Gebot zum *„Nachhaltigen Umgang mit der begrenzten Ressource P durch Recycling und Erhöhung der P-Effizienz der Düngung“* verabschiedet. Dieses fordert unter anderem eine bessere Nutzung des Phosphors aus Siedlungsabfällen, Abfällen der Nahrungsmittelindustrie, Wirtschaftsdüngern sowie organischen und mineralischen Reststoffen aus Gewerbe und Industrie (BMELV 2011).

Bedeutende Komponenten des synanthropogenen P-Kreislaufs bilden Abwasser und Abfall (Filippelli 2002). Die Größe dieses Reservoirs wurde mit 2 Mio. t abgeschätzt, was in etwa den P-Verlusten durch Abholzung und Bodenerosion entspricht. Infolge des in Deutschland weitgehenden Anschlusses an die

Kanalisation wird die mit dem Siedlungsabwasser assoziierte Phosphorfracht entsprechenden Abwasserreinigungsanlagen zugeführt. Dort findet zur Vermeidung von Gewässereutrophierung unter anderem eine P-Eliminierung statt, bei der sich der P im Klärschlamm anreichert (Dockhorn 2008).

Aufgrund der hohen Nährstoffgehalte des Klärschlammes bildet dessen landwirtschaftliche Verwertung in vielen Ländern einen wesentlichen Bestandteil des integrierten Abwasser- und Abfallmanagements. Die Nachhaltigkeit dieser Verwertungspraxis ist jedoch Gegenstand fortgesetzter Kontroversen. Vielfach steht dabei die Belastung der Klärschlämme mit organischen Schadstoffen im Blickfeld. Diese werden nur teilweise im Rahmen der Routineanalytik erfasst. Daher ist nicht auszuschließen, dass es durch die fortgesetzte Ausbringung von Klärschlamm zu einer signifikanten Erhöhung des Gehalts teils persistenter Verbindungen im Boden kommt (Harrison et al. 2006). Nach einer Reihe entsprechender Untersuchungen seitens der Fachbehörden (z.B. LANUV NRW 2004) wird die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung inzwischen zunehmend skeptisch gesehen (LANUV NRW 2006). Entsprechend nahm die Klärschlammverbrennung mit dem Ziel einer Mineralisierung der organischen Schadstoffe zu (Franz 2008).

Vor diesem Hintergrund wurden in den letzten Jahren verstärkt Forschungsaktivitäten entfaltet, um die Phosphorfrachten des kommunalen Abwasserstroms jenseits der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung nutzbar zu machen. Den Status von P-Rückgewinnungsstrategien fasst u.a. Herman (2009) zusammen. Wesentliches Klassifikationskriterium ist dort die Ausgangsmatrix. Die Ansätze umfassen Kristallisations- oder Ionenaustauschverfahren im Haupt- und Nebenstrom, Fällungsverfahren im Nebenstrom sowie diverse Verfahren zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm, Faulschlamm oder dem Rückstand der Klärschlammverbrennung (Klärschlammasche).

Bezüglich der Nutzbarmachung des Phosphorpotenzials der Aschen besteht Konsens



darüber, dass diese ausschließlich nach einer Monoverbrennung, z. B. in Wirbelschichtanlagen infrage kommt. Dazu stehen in Deutschland (Stand 2011) 19 kommunal und 7 industriell betriebene Anlagen zur Verfügung. Im Jahr 2008 wurden 44% (475.000 t) des Klärschlammes in den kommunalen Monoverbrennungsanlagen behandelt (Pinnekamp et al. 2011). Methoden zum Phosphorrecycling aus Klärschlamm-Asche sind u. a. die (sequenzielle) saure Elution (Levlin et al. 2002), deren metallurgisch-thermochemische Behandlung (Mattenberger et al. 2008; Adam et al. 2009), und die selektive elektrokinetisch/elektrodialytische Phosphorgewinnung bei gleichzeitiger Schwermetallabreicherung (Sturm et al. 2010).

Obwohl etliche Rückgewinnungsverfahren bereits im technischen Maßstab erprobt wurden, sind Zweifel an deren vollmaßstäblicher Umsetzbarkeit zu berücksichtigen (Levlin et al. 2002; Franz 2008). Da sowohl Rohphosphat als auch Phosphordüngemittel Handelsgüter auf dem internationalen Markt sind, hängt die Kosteneffizienz von Rückgewinnungsverfahren unmittelbar von der Marktfähigkeit der erzeugten Produkte ab. Kosten für sekundäres Magnesium-Ammoniumphosphat (MAP) wurden beispielsweise mit 1 € kg<sup>-1</sup> P beziffert (Montag et al. 2008). Dieser Wert ist ca. dreimal höher als der aktuelle Marktpreis für Phosphordünger aus primären Quellen. Ohne Subventionierung bzw. eine drastische Preissteigerung im Bereich der konventionellen Dünger können derartige Produkte nicht erfolgreich am Markt platziert werden. Hinzu kommt, dass die Phosphordüngemittel aus sekundären Quellen teilweise Pflanzenverfügbarkeiten aufweisen, die konventionell produzierten Düngemitteln deutlich unterlegen sind (Pinnekamp et al. 2011).

Als Ursachen für die Unwirtschaftlichkeit der bislang verfolgten Phosphorrecyclingstrategien gelten unter anderem die hohe Komplexität der Verfahren, unzureichende politische und rechtliche Randbedingungen, der Grad der Belastung von Klärschlamm und Klärschlamm-Asche sowie die geringe Akzeptanz von Sekundärdüngern (GJA 2012).

Mit dem hier im Blickpunkt stehenden Phosphordünger RecoPhos P38 ist es erstmals gelungen, einen marktfähigen Rückgewinnungsprozess für die Matrix Klärschlamm-Asche zu etablieren. Weiteres Alleinstellungsmerkmal ist, dass neben der Wirtschaftlichkeit auch Fragen der düngemitteltechnischen Anwendung (Kornfestigkeiten, Streubreiten) bei der Produktentwicklung bereits geklärt wurden. Dieser Beitrag behandelt den Weg der Erlangung des Produktstatus und die in diesem Zusammenhang zwingend erforderliche Entlassung aus dem Rechtsrahmen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. Mit Blick auf die Akzeptanz des Produkts werden die bodenschutzrechtlichen Implikationen des Einsatzes von RecoPhos P38 kritisch beleuchtet.

### 13.3 Rechtliche Rahmenbedingungen für die Erzeugung und Anwendung von Sekundärphosphordünger aus Klärschlamm-Asche

Die Erzeugung und landwirtschaftliche Verwendung eines Phosphordüngers aus Klärschlamm-Asche steht im Spannungsfeld zwischen Abfall-, Düngemittel- und Bodenschutzrecht. Das Abfallrecht regelt dabei die Randbedingungen für den Umgang mit dem Inputmaterial Klärschlamm-Asche. Der Zeitpunkt, zu dem anerkanntermaßen aus der Klärschlamm-Asche ein Düngemittel wird, markiert das Ende der Abfalleigenschaft. Damit verknüpft ist ein Wechsel des Rechtsrahmens zum Produkt- und hier insbesondere zum Düngemittelrecht. Für die Anwendung von Düngemitteln gelten gemäß Düngeverordnung, DüV (Anonym 2006a) die Grundsätze der guten landwirtschaftlichen Praxis. Bezug auf diese nimmt auch das Bundesbodenschutzgesetz, BBodSchG (Anonym 1998), mit dem Ziel des Schutzes vor schädlichen Bodenveränderungen.

Das rechtliche Spannungsfeld, in dem Produktion und Anwendung von RecoPhos P38 angesiedelt sind, illustriert die Abbildung 13.1.

Da Klärschlamm ein Abfall ist, sind die Rückstände der Klärschlammverbrennung als Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen und damit gemäß Kapitel 19 der Abfallverzeichnisverordnung (Anonym 2001) anzusprechen. Die vielfach bei der Wirbelschichtfeuerung entstehenden Aschen fallen typischerweise unter die Abfallschlüsselnummer 190112 („nicht gefährlicher Abfall aus der Verbrennung oder Pyrolyse von Abfall, insbes. Rost- und Kesselasche“).

Aus der Abfalleigenschaft folgt, dass Betriebe, die Klärschlammaschen mit dem Ziel der Phosphorrückgewinnung annehmen, juristisch betrachtet, Entsorger sind. Gemäß Nachweisverordnung (Anonym 2006) unterliegen sie bezüglich des Verbleibs des Outputs der Registerpflicht. Dieser nachzukommen, bedeutet, den Verbleib des erzeugten Düngemittels bis zur landwirtschaftlichen Ausbringung zu verfolgen und zu dokumentieren.

Die Registerpflicht entfällt hingegen, wenn es sich beim Output der Behandlungsanlage nicht

mehr um Abfall, sondern um ein Produkt handelt.

Die durch das Erzeugnis zu erfüllenden rechtlichen Anforderungen richten sich nach dessen Zweckbestimmung. Für den im RecoPhos-Prozess hergestellten Phosphordünger gelten damit die Vorgaben der Düngemittelverordnung, DüMV (Anonym 2008). Diese definiert gehaltsbezogene Düngerqualitätskriterien für pflanzenverfügbare Nährstoffe sowie für aus dem Ausgangsmaterial ererbte Schadstoffe.

Zwei der klassischen Schwermetalle nehmen in der DüMV eine Sonderstellung ein: Für die Elemente Kupfer (Cu) und Zink (Zn) entfiel mit Blick auf deren Rolle als Spurennährstoff bei der Novellierung der vorletzten Fassung der DüMV im Jahr 2008 der bis dahin geltende Grenzwert. Dies ist insoweit problematisch, als aus Perspektive des Bodenschutzes für beide Elemente in der Bundesbodenschutzverordnung, BBodSchV (Anonym, 1999) Vorsorgewerte für den Gesamtgehalt im Boden verankert sind. Sofern es also über das Düngemittel zu einer Akkumulation von Cu und Zn im Boden kommt, wäre trotz Wegfall der Grenzwerte für das Produkt die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung gegeben.

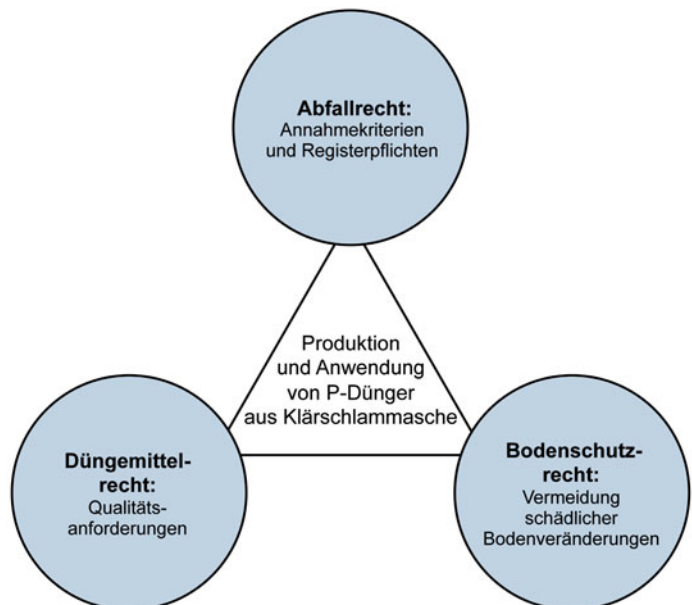
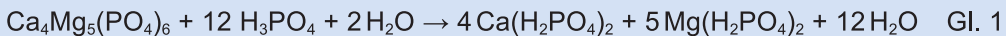


Abb. 13.1 Die Produktion und Anwendung von RecoPhos P38 betreffende Rechtsgebiete

### 13.4 Der RecoPhos-Prozess

Die Phosphatgehalte von Aschen aus der Monoverbrennung kommunaler Klärschlämme (KSA) bewegen sich im Bereich hoch- bis mittelgradiger P-Erze (Aydin et al. 2010). Wie bei diesen liegt der Phosphor jedoch in gering löslichen Mineralphasen vor, z. B. Whitlockit,  $\text{Ca}_9(\text{Mg,Fe})[\text{PO}_3\text{OH}](\text{PO}_4)_6$ , Brushit,  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , und Hilgenstockit,  $\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}$  (Sturm et al. 2010) und damit in einer nicht pflanzenverfügbaren Form. In dem patentierten RecoPhos-Prozess wird die Pflanzenverfügbarkeit des in der KSA enthaltenen

Phosphats durch Reaktion dieser Mineralphasen mit Phosphorsäure drastisch erhöht. Ausgenutzt wird dabei die Instabilität der primären Phosphatminerale in Gegenwart hoher Phosphatkonzentration bei niedrigem pH-Wert. Als Reaktionsprodukte bilden sich lösliche Ca- und Mg-Dihydrogenphosphate als Hauptnährstoffkomponenten von RecoPhos P38. Der Prozess entspricht der industriellen Herstellung von Triple-Superphosphat (UBA 2007), wobei die KSA hierbei das Phosphaterz substituiert (Weigand et al. 2012). Eine hypothetische Umsetzung der apatitartigen Phosphorquellen in der Klärschlammasche mit Phosphorsäure gibt die Gleichung 1 wieder.



### 13.5 RecoPhos P38 und das Ende des Abfalls

Für die Entlassung abfallbürtiger Produkte aus dem Regime des Abfallrechts haben Giesberts und Kleve (2008) unter Bezug auf die Systematik des europäischen Abfallrechts einen Satz von Kriterien entwickelt. Dieser fußt darauf, dass ein Abfall dann zum Produkt wird, wenn die Bedingungen, die erfüllt sind, wenn ein Produkt zu Abfall wird, nicht mehr zutreffen (Spiegelbildlichkeit des Abfall- bzw. Produktbegriffs).

Spiegelbildlich zum sog. subjektiven Entledigungswillen, der ein Produkt zum Abfall macht, ist demnach, dass

1. die Absicht zur Produktverwendung besteht und dass
2. dieses bewusst mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Verwendung hergestellt wird.

Als Spiegelbild des objektiven Entledigungswillens gilt hingegen, dass

1. eine sekundäre Ressource geschaffen wird,
2. deren Gefährlichkeit nicht mehr abfallspezifisch bzw. produktäquivalent ist und
3. die direkt in den Wirtschaftskreislauf entsorgen werden kann, weil
4. sich das Produkt vom Abfall wesentlich unterscheidet und
5. dieses im Rahmen definierter Qualitätsanforderungen Abnehmer findet.

Konsistent mit der Abgrenzung des Abfall- und Produktrechts forderte die zuständige Fachbehörde, inputseitig den Nachweis zu erbringen, dass die im RecoPhos-Prozess eingesetzte Klärschlammasche bezüglich der Schadstoffgehalte den verwendeten primären Phosphorquellen gleichwertig ist und sich damit zur deren Substitution eignet. Outputseitig hingegen galt es nachzuweisen, dass die

Düngemittelwirksamkeit gleich der eines konventionellen Phosphordüngers (Triple-Superphosphat) ist und dass bezüglich der organischen und anorganischen Schadstoffe die Grenzwerte der Düngemittelverordnung eingehalten werden.

Äquivalenz der Schadstoffbelastung von Klärschlammasche und Rohphosphat

Eine Gegenüberstellung der Schadstoffgehalte im Rohphosphat unterschiedlicher Abbauregionen und in der Klärschlammasche dreier deutscher Monoverbrennungsanlagen für kommunalen Klärschlamm zeigt die Tabelle 13.1. Alle Anlagen nutzen die Wirbelschichtverbrennung zur thermischen Behandlung des Klärschlammes. Zur Erzeugung einer reprä-

sentativen Input-Probe wurden die Aschen zu gleichen Anteilen vereint, gemischt, beprobt und röntgenfluoreszenzanalytisch vermessen. Die Daten zur Belastung der Phosphaterze wurden der zitierten Literatur entnommen.

Die Daten zur Belastung des Rohphosphats weisen eine beachtliche herkunftsspezifische Schwankungsbreite auf. Die deutlich geringere Belastung der russischen Rohphosphate ist auf deren abweichende Genese zurückzuführen. Während die anderen Rohphosphate sedimentären Ursprungs sind, handelt es sich bei diesen um magmatische Gesteine. Letztere bilden mit rund 10 % nur einen geringen Teil an den Gesamtvorkommen (BMU 2007), während die sedimentären P-Lagerstätten in Marokko als derzeit größte P-Reserve gelten (Jasinski 2010). Einen Vergleich der Metall- und Metalloidbelastung in KSA und Rohphosphat aus Marokko gibt Abbildung 13.2 wieder.

Tabelle 13.1 Metall- und Metalloidgehalte in Phosphaterzen unterschiedlicher Abbauregionen im Vergleich zu den Gehalten von Klärschlammasche (KSA). Daten in mg kg<sup>-1</sup> Trockensubstanz

Element	USA		Marokko		China		Mittl. Osten		Russland		KSA	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
As	7	14	9,2	13	9	26	2,4	35	1	10	<5	19
Cd	6,1	92	15	38	<2	2,5	1,5	35	0,1	1,3	2,1	2,9
Cr	60	637	75	291	18	33	25	230	13	23	54,6	79,8
Cu	9,6	23	1	22	k. A.	k. A.	5	31	15	30	619	864
Hg	0,05	0,29	0,04	0,86	0,005	0,21	0,002	0,02	0,004	0,01	0,08	0,47
Ni	17	37	k. A.	26	k. A.	k. A.	20	80	2	15	58,6	72,2
Pb	4,6	17	7	14	1,5	6	1	33	1,8	33	96,2	124
V	23	769	87	200	8	80	29	630	k. A.	100	28	82
Zn	204	403	261	345	k. A.	k. A.	29	630	19	23	2.320	2.780
U	65	180	75	155	23	31	40	170	10	85	4	32

Rohphosphat-Daten: Pantelica et al. 1997; Kratz u. Schnug 2005; Sabiha-Javied et al. 2009; k. A.: keine Angabe

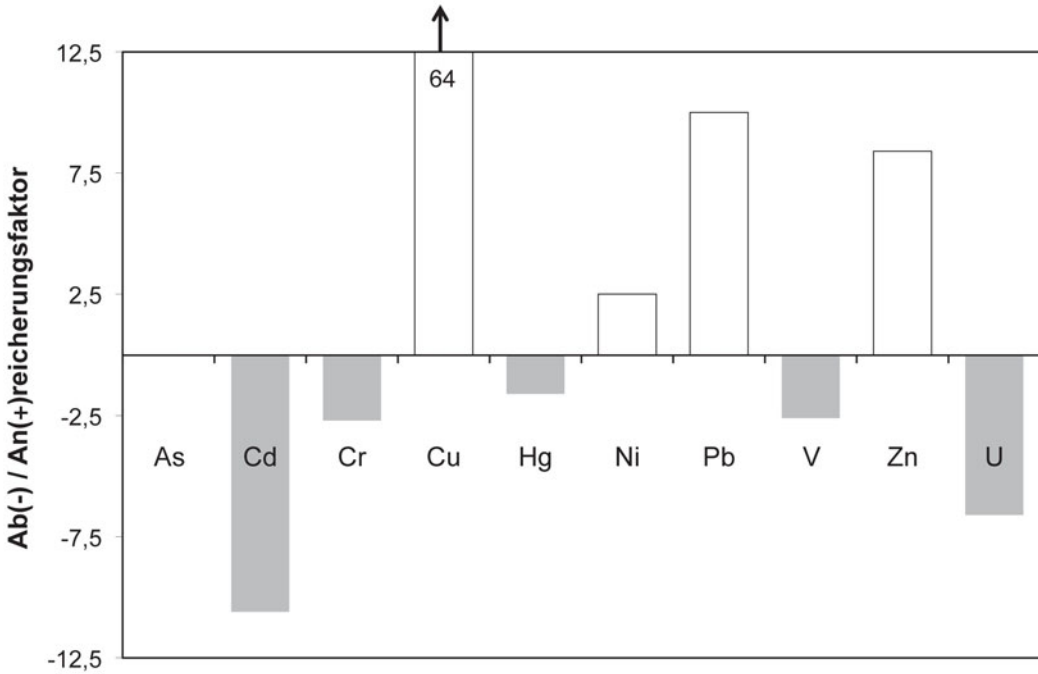


Abb. 13.2 Vergleich der Metall- und Metalloidgehalte in KSA und marokkanischem Rohphosphat anhand von An- bzw. Abreicherungs-faktoren

Die Gehalte an Cu, Ni, Pb und Zn sind in der Klärschlammasche gegenüber marokkanischem Rohphosphat erhöht (Anreicherungs-faktoren 64 / 2,5 / 10 / 8,4). Dagegen zeigen Cd, Cr, Hg, V und U ein umgekehrtes Bild und weisen in der Asche niedrigere Gehalte auf (Abreicherungs-faktoren -10,6 / -2,7 / -1,6 / -2,6 / -6,6). Insgesamt deckt sich das Belastungsmuster der Klärschlammasche mit den Ergebnissen einer Überblicksuntersuchung unter Einbeziehung von 15 deutschen Klärschlammverbrennungs-anlagen (Petzet und Cornel 2011). Es zeigt sich, dass die Anreicherung einiger Elemente in der Klärschlammasche gegenüber marokkanischem Rohphosphat durch die Abreicherung anderer Elemente ausgeglichen wird. Daher ist festzuhalten, dass die eingesetzte Klärschlammasche geeignet ist, das entsprechende Primärmaterial in der Düngemittelherstellung zu substituieren.

### Äquivalenz der Produktqualität von RecoPhos P38 und handels-üblichem Triple-Superphosphat

Entsprechend der Vorgaben der Fachbehörde erfolgte die Bewertung der Outputqualität im Rahmen eines genehmigten Probebetriebs. Das Produkt wurde bezüglich (i) der Schadstoffgehalte, (ii) der Gehalte an Gesamtphosphat sowie des wasser- und ammoniumcitratlöslichen Anteils und (iii) der Düngerwirkung für Mais und Raps im Vergleich zu einem handelsüblichen P-Düngemittel getestet.

Im Probebetrieb wurde die in Tabelle 13.1 charakterisierte Mischcharge der Klärschlammasche eingesetzt. Zur Charakterisierung des Outputs wurden 61 Produktproben durch einen akkreditierten Probenehmer gewonnen, zu einer Sammelprobe vereinigt und durch



drei unabhängige Laboratorien untersucht. Messmethodik und Parameterumfang entsprachen den Vorgaben der Düngemittelverordnung (Anonym 2008). Als Referenzprobe diente ein handelsüblicher P-Dünger (Triple-Superphosphat, TSP). Die Düngewirksamkeit von RecoPhos P38 wurde an der Testpflanze Sommerraps geprüft. Unter kontrollierten Gewächshausbedingungen (Licht, Wasser, Nährstoffversorgung) wurde die Biomassebildung innerhalb eines Zeitraums von 77 Tagen im Steigerungsversuch beobachtet. Nach Abschluss der Versuche wurden der mittels Königswasser, Doppellaktat bzw. Wasser extrahierbare Phosphatgehalt im Versuchsboden sowie der Phosphorentzug ermittelt. Nach dem gleichen Konzept der Steigerungsreihe (variierte Dosierung des Düngemittels bei ansonsten gleichen Bedingungen) wurden in der Vegetationszeit 2011 randomisierte Parzellenfeldversuche mit Silomais durchgeführt. Prüfmerkmal der mittels Parzellenerntetechnik gewonnen Proben war hier ebenfalls die Gesamtbiomasse.

Einen Vergleich der Metall- und Metalloidgehalte im Produkt RecoPhos P38 und im konventionellen Düngemittel zeigt Tabelle 13.2. Die Elementniveaus im Dünger aus Klärschlammasche sind teils gleich (As, Cr), teils höher (Cu, Pb, Hg, Zn) und teils niedriger (Cd, Ni, Tl) als im konventionellen Produkt. Die Elemente Cu und Zn spielen in dieser Betrachtung eine gesonderte Rolle, da sie düngetechnisch betrachtet Spurennährstoffe darstellen. Unabhängig von diesem Befund ist jedoch vor allem die

Einhaltung der Grenzwerte gem. Düngemittelverordnung (Anonym 2008) Voraussetzung für die Marktfähigkeit von RecoPhos P38. Dies ist sowohl für die Metalle/Metalloide als auch für die perfluorierten Verbindungen der Fall. Auch der auf den  $P_2O_5$ -Gehalt normierte Grenzwert für Cd wird eingehalten. Bezüglich Ni und Hg ist eine Kennzeichnungspflicht zu beachten, da die Feststoffgehalte mit Messwerten von  $47,4 \text{ mg kg}^{-1}$  bzw.  $0,7 \text{ mg kg}^{-1}$  größer als  $40 \text{ mg kg}^{-1}$  bzw.  $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$  sind. Die Elemente Cu und Zn unterliegen keiner Reglementierung gemäß Düngemittelverordnung.

Einen Überblick über die Phosphorverfügbarkeit in RecoPhos P38 und im Vergleichsprodukt gibt die Tabelle 13.3 anhand der die Mittelwerte der mit unterschiedlichen Extraktionsverfahren erfassten P-Fractionen. Wasser- und ammoniumcitratlösliches  $P_2O_5$  dienen der Bemessung des Anteils an pflanzenverfügbarem Phosphor. Dessen Anteil liegt mit 0,80 nahe dem gem. EC 2076/2004 (Anonym 2004) einzuhaltenden Wert von 0,85 für Düngemittel mit der Bezeichnung *Triple-Superphosphat*. Demnach wird bereits aus der einfachen Umsetzung von Klärschlammasche mit Phosphorsäure ohne weitere unterstützende Maßnahmen ein hochwertiger Dünger erhalten, der nahezu die Wertigkeit von Triple-Superphosphat besitzt. Der Vergleich von Gesamt-P und der Summe von wasser- und ammoniumcitratlöslichem P bestätigt, dass bezüglich der P-Fraktionierung RecoPhos P38 dem konventionellen Produkt entspricht.

**Tabelle 13.2** Metall- und Metalloidgehalte in RecoPhos P38 und in handelsüblichem Phosphordünger (Triple-Superphosphat, TSP). Daten in mg/kg Trockensubstanz

Element	RecoPhos P38	TSP	Element	RecoPhos P38	TSP
As	9,1	8,3	Ni	47,4	55,1
Cd	2,2	20,0	Pb	51,4	1,8
Cr	118	120	Se	3,8	5,4
Cu	664	36,5	Tl	0,2	0,4
Hg	0,70	<0,054	Zn	1.600	439

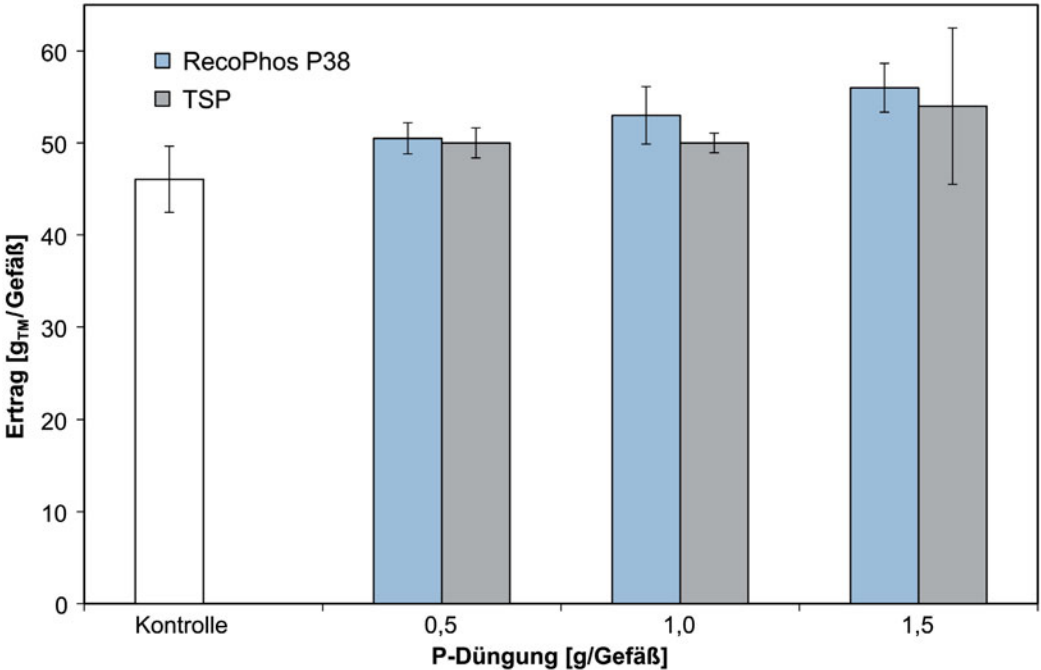
**Tabelle 13.3** Phosphatfraktionierung in RecoPhos P38 und im konventionellem Düngemittel (TSP). Daten in Gewichtsprozent (Gew.-%) bezogen auf Trockenmasse

Fraktion (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	RecoPhos P38	TSP
ammoniumcitrat- plus wasserlöslich	38,07	38,50
gesamt	40,35	39,80
wasserlöslich	30,30	36,30

Die Ergebnisse der vergleichenden Gefäßversuche zur Düngerwirkung zeigt die Abbildung 13.3 am Beispiel des Raps-ertrags. Es wird deutlich, dass bezüglich der Ertragssteigerung RecoPhos P38 dem konventionellen Produkt mindestens ebenbürtig ist. Nach der Ernte wurden aus den Versuchsgefäßen Bodenproben entnommen und darin der P-Status ermittelt. Beide Düngformen führten zu vergleichbaren Veränderungen und zeigten eine Zunahme des pflanzenverfügbaren Phosphors gegenüber der Kontrolle. Die ertrags-

steigernde Wirkung von RecoPhos P38 wurde im Feldversuch trotz guter Grundversorgung der Fläche mit Phosphor bestätigt. Bis zu der geprüften Düngermenge von 45 kg P/ha zeigte sich ein linearer Biomassezuwachs (Weigand et al. 2012).

Im Zusammenhang mit den Ergebnissen des genehmigten Probebetriebs ist festzustellen, dass die Klärschlammasche in einer Globalbetrachtung den primären Rohstoffen für die Düngemittelproduktion entspricht und dass das Produkt RecoPhos P38 vergleichbar einem



**Abb. 13.3** Sommerraps-ertrag im vergleichenden Gefäßversuch mit RecoPhos P38 und TSP

konventionell erzeugten Triple-Superphosphat ist. Vor diesem Hintergrund wurde durch die zuständige Fachbehörde festgestellt, dass RecoPhos P38 aus dem Rechtsrahmen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes entlassen ist und ein frei handelbares Wirtschaftsgut darstellt. Dieses unterliegt den Anforderungen der Düngemittelverordnung, jedoch insbesondere nicht mehr den abfalltypischen Pflichten der Verbleibskontrolle.

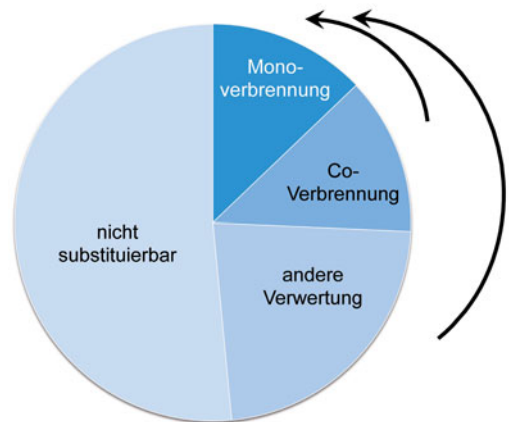
### 13.6 Potenzialbetrachtung

Mit dem RecoPhos-Prozess wurde ein marktfähiges Verfahren für die Nutzung der Phosphorressource Klärschlammasche etabliert. Nach Erlangung des Produktstatus wurde im Jahr 2011 die vollmaßstäbliche Produktion aufgenommen und das Düngemittel zu den marktüblichen Konditionen abgesetzt.

Die Abbildung 13.4 zeigt, dass sich – die Einhaltung der Grenzwerte nach DüMV vorausgesetzt – bei konsequenter Umsetzung des RecoPhos-Verfahrens kurzfristig rund 13 % der deutschen P-Importe substituieren ließen. Würde die derzeitige Praxis der Co-Verbrennung von Klärschlamm zugunsten einer Monoverbrennung mit nachgelagerter Nutzung der Aschen umgestellt, könnten rund 26 % der Importe eingespart werden und bei völliger Umstellung auf die thermische Klärschlammbehandlung knapp 50 %. Inwieweit eventuell noch höhere Substitutionsraten erreichbar sind, hängt von der Bewertung in Deutschland hergestellter phosphatbasierter Zwischen- und Endprodukte der chemischen Industrie ab. Limitiert wird dieses Substitutionspotenzial durch die im Endprodukt einzuhaltenden Grenzwerte der Düngemittelverordnung.

Der Abschätzung des mittelfristigen Substitutionspotenzials liegt zugrunde, dass auch die landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme einer Monoverbrennung zugeführt werden. Die geäußerte Befürchtung, dieses Szenario entzöge den Landwirten nützliches Phosphor (Pinnekamp et al. 2011), bedarf der Einschrän-

kung, dass Phosphor in Klärschlämmen eine deutlich geringere Pflanzenverfügbarkeit aufweist als Phosphor in Mineraldüngern. Dies gilt insbesondere, wenn die Phosphorelimination im Abwasser auf der Basis von Eisen- und Aluminium-Salzen erfolgt. Lediglich Klärschlämme aus Bio-P-Prozessen weisen eine relevante Phosphorwertigkeit auf (Suntheim 2001). Untersuchungen von Zapata und Zaharah (2002) belegen, dass die Phosphoraufnahme im mit Klärschlamm gedüngten Gefäßversuch nur halb so groß ist wie bei Düngung mit Triple-Superphosphat. Ergebnissen von Römer und Samie (2002) zufolge scheint die Phosphorverfügbarkeit eisenhaltiger Klärschlämme vom Fe/P-Verhältnis abzuhängen. Da Phosphat sehr effektiv durch Eisen(hydr-)oxide gebunden wird, könnte sich die landwirtschaftliche Verwertung von stark eisenhaltigen Klärschlämmen für den Phosphor-Versorgungsstatus von Kulturpflanzen sogar als nachteilig erweisen.



**Abb. 13.4** Substitutionspotenziale für deutsche Phosphor-Importe bei Nutzung von Klärschlammasche nach dem RecoPhos Verfahren. Annahmen: jährliches Klärschlamm-aufkommen BRD 2 Mio. t<sub>TS</sub>, thermische Behandlung 53%, davon 50% in Monoverbrennungsanlagen, Glühverlust 52%, Phosphor-Gehalt der Asche 5%, Phosphor-Importe nach Deutschland 99.000 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (BGR-Rohstoffreport 2007)

### 13.7 Bodenschutzrechtliche Implikationen der Düngung mit RecoPhos P38

Die Belastung landwirtschaftlicher Produktionsflächen mit Schwermetallen und radioaktiven Elementen stellt je nach Herkunft der verwendeten Rohphosphate eine der potenziellen Nebenwirkungen des Einsatzes von P-Düngemitteln dar (El-Taher u. Althoyab 2012). Phosphordüngemittel sind neben der atmosphärischen Deposition sowie der Ausbringung von Klärschlamm einer der wesentlichen Eintragspfade für Spurenmetalle in landwirtschaftlich genutzte Böden (Nicholson et al. 2003). Unter Einsatz von Literaturdaten und Modellberechnungen zur Tiefenverlagerung und Pflanzenaufnahme schlossen Jiao et al. (2012) auf ein erhebliches Akkumulationspotenzial von Arsen, Blei und Cadmium im Oberboden. Dabei stand das Ausmaß der Anreicherung in direktem Zusammenhang mit der Belastung der Düngemittel.

Im Vergleich zu konventionellen P-Düngern weist RecoPhos P38 erhöhte Gehalte an Cu auf. Diese sind konform mit den Vorgaben der Düngemittelverordnung. Dennoch ist sicherzustellen, dass bei einer Anwendung des Düngers nach den Grundsätzen der guten landwirtschaftlichen Praxis die Belange

des Bodenschutzes erfüllt werden. Um dies zu prüfen, wurde die jährliche Cu-Fracht, die bei einer Erhaltungsdüngung mit RecoPhos P38 auf unterschiedlich landwirtschaftlich genutzte Böden gelangt, abgeschätzt. Herangezogen wurden dazu Literaturdaten zu den Nährstoffansprüchen unterschiedlicher Kulturarten,  $P_2O_5^{Bedarf}$ , sowie zu den entsprechenden Kupferentzügen,  $Cu^{Bedarf}$ . Ausgehend vom  $P_2O_5$ -Gehalt des Düngers,  $[P_2O_5]_{RecoPhos}$ , und dessen Cu-Belastung,  $[Cu]_{RecoPhos}$ , ergibt sich die jährliche kulturartenspezifische Cu-Fracht gemäß Gleichungen 2 und 3.

Um die jährliche Cu-Fracht in einen Bezug zur Cu-Konzentration im Boden zu stellen, ist die Masse Boden je Hektar und 0,3 m Tiefe (Mächtigkeit des Pflughorizonts unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte des Bodens  $\rho_b$  (Annahme 1.300 kg/m<sup>3</sup>) zu ermitteln (Gl. 3). Die jährlicher Cu-Fracht dividiert durch  $M_{Boden}$  ergibt das jährliche Inkrement  $I_{Cu}$ , um das der Cu-Gehalt des Bodens durch die Düngerapplikation zunimmt (Gl. 4). Als kritischer Wert für eine etwaige Aufstockung der Cu-Gehalte ist der ökotoxikologisch begründete Vorsorgewert  $[Cu_{VS}]$ , Bodenart Lehm: 40 mg/kg Boden] gem. BBodSchV (Anonym 1999) heranzuziehen. Der Zeitpunkt  $t_{krit}$ , zu dem dieser Gehalt erreicht wird, ergibt sich aus der Differenz von Cu-Hintergrundwert  $[Cu_{HG}]$  und Vorsorgewert  $[Cu_{VS}]$  dividiert durch das jährliche Cu-Inkrement (Gl. 6).

$\dot{F}_{RecoPhos} = P_2O_5^{Bedarf} \times [P_2O_5]_{RecoPhos}$	$\frac{kg_{RecoPhos}}{ha \cdot a}$	Gl. 2
$\dot{F}_{Cu} = (\dot{F}_{RecoPhos} \times [Cu]_{RecoPhos}) - Cu^{Bedarf}$	$\frac{kg_{Cu}}{ha \cdot a}$	Gl. 3
$M_{Boden} = 10.000 \times 0,3 \times 1.300 = 3,9 \times 10^6$	$\frac{kg_{Boden}}{ha}$	Gl. 4
$I_{Cu} = \frac{\dot{F}_{Cu}}{M_{Boden}}$	$\frac{kg_{Cu}}{kg_{Boden} \cdot a}$	Gl. 5
$t_{krit} = \frac{[Cu_{VS}] - [Cu_{HG}]}{I_{Cu}}$	a	Gl. 6

13

Die kulturartsspezifische Dauer  $t_{krit}$  bis zum Erreichen der Cu-Vorsorgewerte zeigt die Tabelle 13.4. Bei einer bedarfsgerechten Düngung beträgt der Zeitraum bis zur Erreichung der Vorsorgewerte im Minimum (Winterweizen) rund 1.000 Jahre. Für Zuckerrübe und Silomais

unterschreitet die Cu-Nachlieferung mit dem Dünger die Ernteentzüge. Insoweit kommt es zu keinerlei Kupferakkumulation.

Innerhalb absehbarer Zeiträume tangiert eine Düngung mit RecoPhos P38 demnach die Belange des vorsorgenden Bodenschutzes nicht.

**Tabelle 13.4** Kulturartsspezifische Dauer  $t_{krit}$  bis zum Erreichen der Kupfer-Vorsorgewerte (Bodenart Lehm) bei einer Erhaltungsdüngung mit RecoPhos P38

Kulturart	Ertragsstufe (dt ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Entzug (kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	Düngung RecoPhos (kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	Cu Input (g ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	Cu Entzug (g ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	Cu Fracht (g ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	Cu Inkrement (mg kg <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	$t_{krit}$ (a)
Winterweizen	90 <sup>a</sup>	75 <sup>a</sup>	187,5	124,5	30 <sup>c</sup>	94,5	0,024	998
Winterraps	40 <sup>a</sup>	75 <sup>a</sup>	187,5	124,5	36 <sup>d</sup>	88,5	0,023	1.066
Zuckerrübe	600 <sup>a</sup>	66 <sup>a</sup>	165	109,6	140 <sup>c</sup>	–	–	∞
Kartoffel	450 <sup>a</sup>	63 <sup>a</sup>	157,5	104,6	90 <sup>d</sup>	14,6	0,004	6.473
Silomais	400 <sup>b</sup>	70 <sup>b</sup>	175	116,2	150 <sup>d</sup>	–	–	∞
Eckdaten RecoPhos <sup>°</sup>			Eckdaten Boden (Annahme)		Eckdaten Bodenschutz			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,4 kg kg <sup>-1</sup> RecoPhos	P <sup>b</sup>	1.300 kg m <sup>-3</sup>		Vorsorgewert Lehm		40 <sup>f</sup> mg kg <sup>-1</sup> Boden	
Cu	664 mg kg <sup>-1</sup> RecoPhos	Tiefe Pflugschle	0,3 m		Hintergrundwert		15,8 <sup>c*</sup> mg kg <sup>-1</sup> Boden	

<sup>a</sup> Bundesarbeitskreis Düngung 2003  
<sup>b</sup> Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen 2012  
<sup>c</sup> Kratz et al. 2009 (\* Mittelwert der Mediane von Kupfergehalten in 12 bodenbildenden Substraten)  
<sup>d</sup> Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg 2011  
<sup>e</sup> Weigand et al. 2012  
<sup>f</sup> Anonym 1999

13.8 Schlussfolgerungen

Der RecoPhos-Prozess hat sich im Rahmen des genehmigten Probebetriebs als ein robustes Verfahren zu Nutzung der Phosphor-Ressource Klärschlammasche erwiesen. Es konnte gezeigt werden, dass die Inputqualitäten denjenigen von Rohphosphat entsprechen, der Output einem konventionellen Triple-Superphosphat ebenbürtig ist und sämtliche Anforderungen der Düngemittelverordnung erfüllt sind. Daher wurde das Produkt aus dem Rechtsrahmen

der Abfallwirtschaft entlassen und stellt ein frei handelbares Wirtschaftsgut dar. Das im Vollmaßstab etablierte Verfahren liefert einen Phosphordünger, der zu marktüblichen Preisen abgesetzt wird und leistet damit schon jetzt einen wesentlichen Beitrag zur Substitution der deutschen Phosphorimporte. Dies ist ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber anderen, in der Entwicklung befindlichen Verfahren. Die Belange des vorsorgenden Bodenschutzes werden bei einem bedarfsgerechten Einsatz des Düngers nicht berührt.



## Quellenverzeichnis

- Abouzeid A-Z M (2008) Physical and thermal treatment of phosphate ores — An overview. *Int. J. Miner. Process.* 85, 4: 59–84
- Adam C, Peplinski B, Michaelis M, Kley G and Simon F-G (2009) Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery. *Waste Managem. J.* 29: 1122–1128
- Anonym (1998) Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz-BBodSchG) vom 17.03.1998, zuletzt geändert am 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212)
- Anonym (1999) Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12.07.1999 (BGBl. I S. 1554)
- Anonym (2001) Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV) vom 10. Dezember 2001, BGBl. I, 3379
- Anonym (2004) Commission Regulation (EC) No 2076/2004 vom 3. Dezember 2004. *Official Journal of the European Union*, L 359: 25–27
- Anonym (2006a) Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV) vom 10.01.2006, zuletzt geändert am 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212)
- Anonym (2006b) Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen (Nachweisverordnung – NachwV) vom 20. Oktober 2006, BGBl. I, 2.298
- Anonym (2008) Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV) vom 16. Dezember 2008, BGBl. I, 2524
- Aydin I, Aydin F, Saydut A, Bakirdere EG, Hamamci C (2010) Hazardous metal geochemistry of sedimentary phosphate rock used for fertilizer (Mazidag, SE Anatolia, Turkey). *Microchem. J.* 96: 247–251
- BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.) (2007) Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe für Metall- und Nichtmetallrohstoffe Stand 01/2007, 40 S.
- BMELV (2011) Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wissenschaftlicher Beirat für Düngungsfragen, 2011. Nachhaltiger Umgang mit der begrenzten Ressource Phosphor durch Recycling und Erhöhung der Phosphoreffizienz der Düngung. Verabschiedet am 22.02.2011, 8 S.
- BMU (2007) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg) Erfassung und radiologische Bewertung von Hinterlassenschaften mit NORM-Materialien aus früheren Tätigkeiten und Arbeiten einschließlich der modellhaften Untersuchung branchentypischer Rückstände. BMU-2007-695, 253 S.
- BMU (2012) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg) Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.02.2012, Berlin, 113 S.
- Bundesarbeitskreis Düngung, BAD (Hrsg: 2003) Phosphat und Kali. Bausteine nachhaltiger Ertragsbildung. Frankfurt am Main, 33 S.
- Chien SH, Prochnow LI, Tu S, Snyder CS (2011) Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 89: 229–255
- Cordell D, Rosemarin A, Schröder JJ, Smit AL (2011) Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere* 84: 747–758
- Cordell D, Drangert J-O, White S (2009) The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environ. Change* 19, 2: 292–305
- Dockhorn T (2008) Über die Relevanz der Nährstoffe Stickstoff und Phosphat im Abwasser – eine Bilanz für Deutschland. *Müll und Abfall* 9: 444–449

- El-Taher A, Althoyaib SS (2012) Natural radioactivity levels and heavy metals in chemical and organic fertilizers used in Kingdom of Saudi Arabia. *Appl. Radiat. Isotopes* 70: 290–295
- Filippelli GM (2002) The global phosphorus cycle. *Reviews in Mineral. Geochem.* 1: 391–425
- Franz M (2008) Phosphate fertilizer from sewage sludge ash (SSA). *Waste Managem. J.* 28: 1809–1818
- Gaudry A, Zeroual S, Gaie-Levrel F, Moskura M, Boujrial F-Z, Cherkaoui El Moursli R, Guessous A, Mouradi A, Givernaud T, Delmas R (2007) Heavy metals pollution of the atlantic marine environment by the Moroccan phosphate industry, as observed through their bioaccumulation in *Ulva Lactuca*. *Water Air Soil Pollut.* 178: 267–285
- Giesberts L, Kleve G (2008) Einmal Abfall – nicht immer Abfall: Das Ende der Abfalleigenschaft. *Deutsches Verwaltungsblatt (DVBL)* – Abhandlungen, S. 678–688
- GJA – Green Jobs Austria (2012) Phosphor-Recycling. Von der Technologie bis zur erfolgreichen Markteinführung. Überblicksstudie zum Thema Phosphor-Recycling, Wien, 21 S.
- Harrison EZ, Oakes SR, Hysell M, Hay A (2006) Organic chemicals in sewage sludges. *Sci. Tot. Environ.* 367: 481–497
- Herman L (2009) Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwassereinigung. Eine Bestandsaufnahme. *Umwelt-Wissen Nr. 0929*. Bundesamt für Umwelt, Bern, 196 S.
- Jasinski SM (2010) Phosphate rock, 2010 Minerals Yearbook, US Geological Survey. [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate\\_rock/myb1-2010-phosp.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/myb1-2010-phosp.pdf). Letzter Zugriff 28. April 2013
- Jiao W, Chen W, Chang AC, Page AL (2012) Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review. *Environ. Pollut.* 168: 44–53
- Keyzer M (2010). Towards a closed phosphorus cycle. *De Economist* 158, 4: 411–425
- Kratz S, Haneklaus S, Schnug E (2009) Kupfergehalte in Acker- und Grünlandböden und das Verhältnis dieser Gehalte zu den durch Pflanzenschutz ausgebrachten Kupfermengen. *Journal für Kulturpflanzen* 61: 112–116
- Kratz S, Schnug E (2005) Schwermetalle in P-Düngern. *Landbauforschung Völknerode, Special Issue* 286: 37–45
- Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (Hrsg; 2011) *Beratungsgrundlagen für die Düngung im Ackerbau und auf Grünland in Baden-Württemberg*. Karlsruhe, 133 S.
- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (Hrsg; 2012) *Düngung mit Phosphat, Kali, Magnesium*. Ratgeber, 4 S.
- LANUV NRW (Hrsg; 2004) *Abfälle aus Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen, Teil D Organische Schadstoffe in Klärschlämmen aus der kommunalen Abwasserbehandlung*, 151 S.
- LANUV NRW (Hrsg; 2006) *Abfälle aus Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen, Teil E Organische Schadstoffe in Klärschlämmen – Bewertung und Ableitung von Anforderungen an die landwirtschaftliche Verwertung*, 170 S.
- Levlin E, Löwén M, Stark K, Hultman B (2002) Effects of phosphorus recovery requirements on Swedish sludge management. *Wat. Sci. Technol.* 46: 435–440
- Mattenberger H, Fraissler G, Brunner T, Herk P, Hermann L, Obernberger I (2008) Sewage sludge ash to phosphorus fertiliser: Variables influencing heavy metal removal during thermochemical treatment. *Waste Managem. J.* 28: 2709–2722
- Montag D, Gethke K, Pinnekamp J (2008) Protecting the phosphorus resource by phosphorus recycling in wastewater treatment plants. *Proceedings of the 5. BMBF Forum für Nachhaltigkeit 2008*. [http://www.fona.de/pdf/forum/2008/abstracts/III.S2\\_mon-tag\\_abstract\\_forum\\_2008.pdf](http://www.fona.de/pdf/forum/2008/abstracts/III.S2_mon-tag_abstract_forum_2008.pdf)
- Nicholson FA, Smith SR, Alloway BJ, Carlton-Smith C, Chambers BJ (2003) An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Sci. Tot. Environ.* 311: 205–219
- Pantelica AI, Salagean MN, Georgescu IL, Pincovski ET (1997) INAA of some phosphates used in fertilizer industries. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 216: 261–264
- Petzet S, Cornel P (2011) Towards a complete recycling of phosphorus in wastewater treatment – options in Germany. *Water Sci. Technol.* 64: 29–35

- Pinnekamp J, Baumann P, Buer T, Cornell P, Donert D, Göttlicher-Schmiedle U, Heinzmann B, Jardin N, Longdong J, Müller J, von Sothen F, Temmink H, Berg U, Christian-Bickelhaupt R, Schaum C, Weideler A, Wichmann-Seidel A (2003) Arbeitsbericht der ATV-DVWK-Arbeitsgruppe AK-1.1 „Phosphorrückgewinnung“ KA – Abwasser, Abfall 50: 805–815
- Pinnekamp J, Everding W, Gethke K, Montag D, Weinfurtnr K, Sartorius C, Von Horn J, Tettenborn F, Gäth S, Waida C, Fehrenbach H, Reinhardt J (2011) Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland (PhoBe). Schlussbericht zum BMBF Verbundvorhaben, 462 S.
- Römer W, Samie IF (2002) Düngewirkung eisenhaltiger Klärschlämme / Phosphorus fertilization effects of sewage sludge treated with iron compounds. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165: 83–91
- Romero Guzmán ET, Esteller Alberich MV, Ordoñez Regil E (2002) Uranium and phosphate behavior in the vadose zone of a fertilized corn field. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 254: 509–517
- Sabiha-Javied S, Mehmood T, Chaudhry MM, Tufail M, Irfan N (2009) Heavy metal pollution from phosphate rock used for the production of fertilizer in Pakistan. *Microchem. J.* 91: 94–99
- Sturm G, Weigand H, Marb C, Weiß W, Huwe B (2010) Electrokinetic phosphorus recovery from packed beds of sewage sludge ash: yield and energy demand. *J. Appl. Electrochem.* 40: 1069–1078
- Suntheim L (2001) Zur Phosphorverfügbarkeit von Klärschlamm. In: Thomé-Kozmiensky KJ (Hrsg) Verantwortungsbewusste Klärschlammverwertung, Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, S. 29–341
- UBA, Umweltbundesamt (Hrsg; 2007) Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken für die Herstellung Anorganischer Grundchemikalien: Ammoniak, Säuren und Düngemittel. Berlin, 418 S.
- WAVE GmbH (Hrsg; 2003) Studie zum Phosphorrecycling aus kommunalem Abwasser in Baden-Württemberg – Möglichkeiten und Grenzen. Schlussbericht im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart, 81 S.
- Weigand H, Bertau M, Hübner W (2012) P-Düngerproduktion aus Klärschlammasche: Erfolge und Hemmnisse bei der ressourceneffizienten Nutzung eines Abfallstroms, *Müll und Abfall* 5: 248–253
- Zapata F, Zaharah AR (2002) Phosphorus availability from phosphate rock and sewage sludge as influenced by the addition of water soluble phosphate fertilizer. *Nutrient Cycl. Agroecosyst.* 63: 43–48

### Kernaussagen

- Düngemittel auf Basis von Recyclingphosphat sichern die P-Rohstoffbasis auf nachhaltige Weise und vermindern geopolitische Abhängigkeiten.
- P-Düngemittel auf Basis von Klärschlammaschen sind P-Düngern aus Rohphosphat ebenbürtig und lassen sich zu wirtschaftlich konkurrenzfähigen Kosten herstellen.
- Das RecoPhos-Verfahren ist das weltweit erste kommerzielle Verfahren zur Phosphorrückgewinnung.
- Die erhöhten Cu-Gehalte im Recyclingdünger tangieren die Belange des vorsorgenden Bodenschutzes nicht.
- Bei flächendeckender Klärschlamm-Monoverbrennung können mittelfristig mithilfe von P-Recycling ca. 50 % der deutschen Rohphosphatimporte substituiert werden.

# Teil 4

## Verarbeitung und Produkte





Bildquellen der vorangehenden Seite

*Großes Bild oben:* Nachtsichtassistent von Mercedes-Benz – für den Deutschen Zukunftspreis nominiert. Bildquelle: © Daimler AG

*Untere Bildreihe:* Elektronikschrott und eine ausgediente Turbine aus dem Geothermalkraftwerk Sumikawa, Akita Präfektur, Japan. Fotos: © Jörg Matschullat

# 14 Aufbereitung und Verarbeitung von Seltenerdmetallen

David Kennedy

## 14.1 Einführung

Die Gruppe der Seltenen Erden umfasst nach Definition der IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) die Lanthaniden,  $_{57}\text{La}$  bis  $_{71}\text{Lu}$  sowie Yttrium und Scandium.

Seltenerdelemente sind dabei nicht etwa selten, wie ihr Name suggeriert; ihre Elementhäufigkeit in der Erdkruste liegt zwischen den geläufigeren Metallen Zinn und Blei. Aus verschiedenen Gründen sind die wenigsten Metallurgen im Umgang mit diesen Metallen vertraut: Sie waren lange Zeit nicht in hohem Maße nachgefragt, es sind Schwermetalle, die sich zudem durch eine hohe Reaktivität auszeichnen, und sie haben einander sehr ähnliche chemische Eigenschaften. Erschwerend kommt hinzu, dass sie stets vergesellschaftet vorkommen, und so verwundert es nicht, dass es bis in die 1960er-Jahre dauerte, bis die erste wirtschaftliche Trennung der Seltenerdmetalle (SEM) gelang. Sie sind also nur in kleinen Maßstäben unter hohem Aufwand aufzubereiten.

Die industriellen Produktionsvolumen für SEM in den Jahren 2000–2005 veranschaulichen die Situation: 120.000 jato (Jahrestonnen) Seltenerdoxiden (SEO) standen ca. 1,8 Mio jato Nickel und ca. 70.000 jato Cobalt gegenüber. Dabei ist zu bedenken, dass sich diese 120.000 jato auf insgesamt 15 verschiedene Metalle erstrecken, zumal in oxidischer Form (d.h. der effektive Metallgehalt liegt nochmals tiefer).

Wenngleich sich die chemischen Eigenschaften der SEM weitgehend ähneln, handelt es sich doch um fundamental unterschiedliche Metalle mit dezidierten technischen Anwendungen. Nur für allereinfachste Anwendungen kommt Mischmetall zum Einsatz.

Die Geschichte der wirtschaftlichen Verwendung von SEM ist mit 50 Jahren kurz bemessen. Verschiedene Anwendungen, die von den spezifischen Eigenschaften dieser Metalle Gebrauch machen, wurden seither entwickelt; gegenwärtig stoßen sie auf ein breites Interesse. Die äußere Valenzschale der SEM gibt vor, dass sie kationisch typischerweise in dreiwertiger Form vorkommen. Das sequenzielle Auffüllen der f-Schale bedingt jedoch physikalisch unterschiedliches Verhalten, was sich in verschiedenen chemischen und physikalischen Eigenschaften äußern kann. Manche dieser Metalle lassen sich nur schwer substituieren. Sie sind vielmehr für wichtige technologische Anwendungsfelder unverzichtbar, wie z.B. in Leuchtstoffen oder Permanentmagneten, die ja gerade auf diesen speziellen chemischen und physikalischen Eigenschaften basieren. Das Grundproblem der Seltenerdmetallverarbeitung ist, dass die natürliche Häufigkeit der einzelnen Metalle in den jeweiligen Rohstoffen und die Nachfragesituation nicht zur Deckung zu bringen sind: Weil sie stets vergesellschaftet vorkommen, muss in dem Moment, in dem eine Nachfrage für eines der SEM existiert, ein Markt für die übrigen Metalle gefunden werden.

Die Metalle kommen in variierenden Verhältnissen vor, das hängt von den jeweiligen Erzmineralien ab. So mögen dementsprechend einige stark nachgefragt sein, während dies für andere nicht zutrifft. Die typischen Minerale enthalten bis zu 15 Metalle; von den 17 Metallen nach IUPAC-Definition entfällt Promethium, da es keine stabilen Isotope aufweist und daher nicht natürlich vorkommt. Scandium wiederum wird als Nebenprodukt der Uranextraktion gewonnen. In einem Wort, es ist im Wesentlichen die Nachfrage nach SEM für die Herstellung von Permanentmagneten (Neodym, Nd; Dysprosium, Dy; Praseodym, Pr; Samarium, Sm und Terbium, Tb), welche die gesamte Seltenerdindustrie auf dem gegenwärtigen Entwicklungsstand antreibt.

## 14.2 Rohstoffpotenzial

Es gibt keine Verknappung potenzieller Seltenerdlagerstätten. Praktisch jedes Gebiet auf der Erde kann als mögliche Rohstoffquelle

für SEM ausgemacht werden (► Kap. 8). Die weltweiten Vorkommen nehmen als Folge von Neubewertungen anderer Minerallagerstätten sowie der Entdeckung neuer Vorkommen ständig zu. Der US Geological Survey schätzte 1970 die mineralischen Vorkommen auf 10 Mio. t, im Jahr 2007 waren es schon 83,7 Mio. t. Höffige Vorkommen lassen sich auf Grundlage der in Tabelle 14.1 genannten Faktoren bewerten. Die Ausbeutung mineralischer Vorkommen durch Bergbau wird stets ein komplexes Zusammenspiel sozialer und ökonomischer Prozesse sein. Für SEM kommt die Vielzahl der Metalle, die sie umfassen, sowie die Aufarbeitung zu weiterverarbeitbaren Qualitäten für neu entstehende Technologien erschwerend hinzu. Es ist nicht notwendigerweise die aus theoretischer Sicht attraktivste Lagerstätte, die sich am einfachsten ausbeuten lässt. Die Verteilung und Bedeutung der bekannten SE-Lagerstätten zeigen Abbildung 14.1 und Tabelle 14.2.

Eine Übersicht über die Gehalte potenzieller Lagerstätten außerhalb Chinas (Technology Metals Research 2013) zeigt, dass sich die höchsten Gehalte, gerechnet als Gesamtoxid Seltene

Tabelle 14.1 Faktoren zur Bewertung von Seltenerdlagerstätten

Faktor		Bemerkungen
Gehalt		SEO-Anteil des zu gewinnenden Erzes
Nebenprodukte		Wirtschaftlichkeit einer gleichzeitigen Produktion anderer Bestandteile
Größe		Tonnen förderbarer SEM-Mineralien
Mineralogie	Zusammensetzung	<ul style="list-style-type: none"><li>• SEM-Verteilung</li><li>• Nachfrage nach den jeweiligen SEM</li></ul>
	Mineraltyp und Mikrostruktur	Bestimmt den Aufwand, mit dem SEM aus der Lagerstätte extraktiv-metallurgisch gewonnen werden können
Lage	Entfernung	
	Soziale und Umweltaspekte	
Andere technologische Faktoren		<ul style="list-style-type: none"><li>• Bergbaumethode</li><li>• Radioaktivität der Lagerstätte</li><li>• Andere technische Gefahren</li></ul>

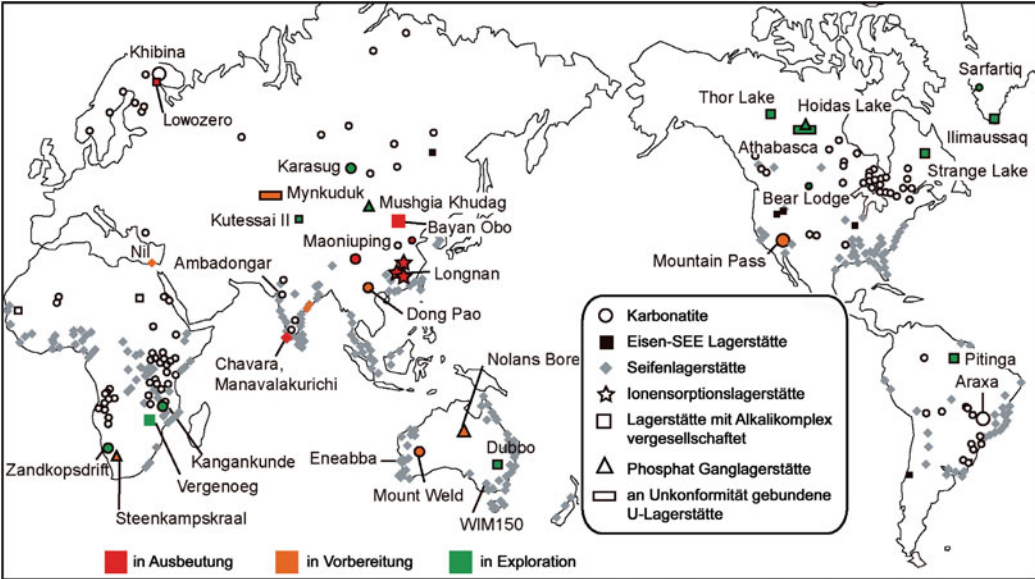


Abb. 14.1 Verteilung der Seltenerdlagerstätten weltweit. Quelle: übersetzt nach Watanabe (2010)

Tabelle 14.2 Bedeutendste Seltenerdlagerstätten

Lagerstätte	Land	Beschreibung
Bayan Obo (Innere Mongolei)	China	Mit Eisenerz vergesellschaftete Bastnäsitlagerstätte. Wird schon lange Zeit ausgebeutet, produziert den Großteil der SEM für den Weltmarkt
Longnan, Guangdong, Jiangxi, Hunan und Fujian	China	Tonlagerstätten mit hohen Anteilen an wirtschaftlich bedeutenden SEM. Umfangreiche wirtschaftliche Nutzung
Mountain Pass (Kalifornien an der Grenze zu Nevada)	USA	Große Bastnäsitlagerstätte. Rückkehr zu größeren Produktionsmengen nach länger anhaltender geringer Aktivität
Mount Weld	Australien	Monazitlagerstätte. Neues Projekt mit Aufarbeitung in Malaysia
Eneabba	Australien	Monazit als Begleitkomponente in Schwermineralsanden. Im Vorfeld der chinesischen Dominanz auf Angebotsseite wurde der Weltmarkt von dieser Lagerstätte mit Monazit versorgt
Steenkampskraal	Südafrika	Monazit. Ehemaliges Bergwerk mit den höchsten bekannten SE-Gehalten
Kerala und Orissa	Indien	Monazithaltige Schwermineralsande (vorwiegend Ilmenit, $\text{FeTiO}_3$ ; Rutil, $\text{TiO}_2$ und Zirkon, $\text{ZrO}_2$ ). Unter Regierungsverwaltung (Atomenergieministerium) in Hinblick auf Gewinnung und Verwertung der Thoriumgehalte
Dubbo	Australien	Begleitprodukt von Zirkon, Hafnium, Niob und Tantal

Erden (GOSE) von 16,36 % in Steenkampskraal, über 9,73 % in Mount Weld, 6,57 % in Mountain Pass bis hin zu einer Reihe anderer Projekte mit Gehalten von 4,84 % und darunter bewegen.

Diejenigen Lagerstätten, bei denen SEM als Neben- oder Koppelprodukte auftreten, können auch mit anderen Maßstäben bewertet werden. So können zum Beispiel die Spülhalden von Schwermetallsanden 3...4 % Monazit enthalten (Selby 2012), dessen weitere Aufarbeitung sich leicht bewerten lässt. Daten von diesen Lagerstätten sind indes schwer zu erhalten.

Die ionenadsorbierenden Tone aus Longnan (China) werden ganz anders als die klassischen SE-Erze auf ihren GOSE-Gehalt aufgearbeitet, und ihr GOSE variiert zwischen 0,3 und 1,0 %. Die Gesamtwirtschaftlichkeit des Aufarbeitungsprozesses sowie die Konzentration der selteneren Elemente haben einen großen Einfluss auf die Bewertung in den Machbarkeitsstudien für diese Lagerstätten.

### Größe der Lagerstätte

Größere Lagerstätten mit längeren Bergwerksbetriebszeiten werden bevorzugt. Für die SE-Industrie beträgt das Marktvolumen für in getrennter Form vorliegende SEO ungefähr  $120.000 \text{ t a}^{-1}$ . Das heißt, dass eine Lagerstätte mit einem GOSE von 1,2 Mio. t den gesamten SE-Markt für 10 Jahre bedient. Viele der bekannten Lagerstätten sind größer als 1 Mio. t GOSE, und die Größe eines Vorkommens für

SEM ist ganz offensichtlich weniger kritisch als für andere anorganische Grundstoffe.

### Mineralogie – Zusammensetzung

Mit der zunehmenden Weiterentwicklung verschiedener Anwendungen für die unterschiedlichen SE-Metalle bereitet deren vergleichsweise geringe Häufigkeit Probleme hinsichtlich der Ausgewogenheit von natürlichem Vorkommen und Nachfrage. Die gemeinhin genutzten Minerale sind in Tabelle 14.3 zusammengefasst.

Die meistgenutzten SE-Erzminerale sind Monazit und Bastnäsit. Die SE-Verhältnisse in diesen Mineralen werden durch die sog. Ceriterden oder „leichten Seltenerdelemente“ (*light rare earth elements*, *LREE*) dominiert. Die SE-Verhältnisse variieren nicht nur mit jeder Lagerstätte, sie sind auch innerhalb eines Vorkommens uneinheitlich.

In der Seltenerdindustrie wird zwischen den Ceriterden (LREE) und Yttererden, den schweren Seltenerdelementen (*heavy rare earth elements*, *HREE*), unterschieden. So wird, eher willkürlich, unterschieden zwischen den leichteren Elementen von Lanthan (La) bis Europium (Eu) sowie den schwereren Vertretern Gadolinium (Gd) bis Lutetium (Lu) sowie Yttrium (Y). Letztlich spiegelt sich hierin die Art und Weise wieder, wie die SEM industriell genutzt werden.

Die möglicherweise bedeutendsten mineralischen Vorkommen sind die ionenadsor-

Tabelle 14.3 Wirtschaftlich genutzte SE-Erzminerale

Mineral	Chemische Zusammensetzung	Bemerkungen
Monazit	$(\text{SE,Th})[\text{PO}_4]$	SE vorw. La, Ce, Nd, Sm, Gd
Bastnäsit	$(\text{Ce,La,Nd,Y})[(\text{F,OH}) \text{CO}_3]$	Kann auch Th enthalten
Xenotim	$(\text{Y,Yb})[\text{PO}_4]$	Enthält geringere Mengen schwere SE
Loparit	$(\text{Ce,Na,Ca})[(\text{Ti,Nb})\text{O}_3]$	SE-haltige Perowskit-Varietät



bierenden Tone in Südchina. Sie variieren zwar stark in ihrer Zusammensetzung, bergen aber ungleich hohe Mengen an den seltenen schweren Erden (Yttererden). Obwohl die SE-Gehalte mit 0,3 bis 1,0 % GOSE vergleichsweise gering sind, sind ihre Elementgehalte extrem wertvoll für die Seltenerdindustrie, und ihre Aufarbeitung ist eher unkompliziert. Einen Vergleich der Zusammensetzung verschiedener SE-Erze gibt Tabelle 14.4 wieder (► Kap. 8).

Betrachten wir Scandium. Zusammen mit anderen SEM findet sich dieses Element in den Raffinationsrückständen der Solventextraktion von Uran. Diese Abfallströme bleiben weitgehend ungenutzt. Gegenwärtig stammt das meiste Scandium aus Russland. Es gibt aber auch Hinweise darauf, dass mehr als 10 t pro Jahr aus kanadischen Uranprojekten gewonnen werden könnten.

## Mineralogie – Größe und Verteilung der Kristallite

Die Aufbereitung von SE-Mineralien aus Erzgestein ist nicht notwendigerweise einfach, obwohl ihre hohe Dichte dies nahelegt. Es gibt keinen Ersatz für die extraktive Metallurgie. Zum Beispiel sind Monazite schwer, und sie haben ausgeprägte magnetische Eigenschaften, und dennoch verlaufen die Aufbereitungsverfahren über nasse wie trockene Trennverfahren. Die Freisetzung der SE-Mineralien aus dem Erz oder aus Spülhalden von Schwermineral-sanden kann wiederum völlig anderer Verfahrensschritte bedürfen.

Als ein Beispiel für die Mineralgewinnung aus einem hochgradigen Vorkommen soll die Mikrostruktur der Monazitader von Steenkampsraal betrachtet werden (Read et al.

**Tabelle 14.4** SE-Gehalte wichtiger SE-Erze (in % GOSE). Datenquelle: © Roskill u. IMCOA (2010); © GWMG (2013)

Seltenerd-oxid	Bastnäsit		Tonminerale		Monazit			Loparit
	Bayun Obo, China	Mountain Pass, USA	Xunwu, Jiangxi, China	Lognan, Jiangxi, China	Mt. Weld, Australien	Guandong, China	Steenkampsraal, Südafrika	Lovozersky, Russland
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,0	33,2	43,4	1,8	25,5	23,0	20,7	28,0
CeO <sub>2</sub>	50,0	49,1	2,4	0,4	46,7	42,7	45,8	57,5
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	6,2	4,3	9,0	0,7	5,3	4,1	5,1	3,8
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,5	12,0	31,7	3,0	18,6	17,0	17,7	8,8
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	0,1	0,5	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1
Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	0,1	Spuren	Spuren	1,3	0,1	0,7	0,2	0,1
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	Spuren	Spuren	6,7	0,2	0,8	1,0	0,1
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Spuren	0,1	8,0	65,0	0,4	2,4	4,2	Spuren

2002). Die Mikrostruktur der Monazit-Ganglagerstätte (Read et al. 2002) zeigt die Kristallstruktur des Monazits über die Analyse der Seltenerd- und Thoriumverteilungen, wie sie über Rückstrahlelektronen der Rasterelektronenmikroskopie sichtbar gemacht werden können – als ein Beispiel für die Anwendung der Mineralidentifikation aus der hochwertigen Lagerstätte Steenkampskraal (Abb. 14.2).

### Andere technologische Faktoren – Radioaktivität

Seltenerdvorkommen sind unausweichlich mit Radioaktivität und dem Umgang mit ihr verbunden. Die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEO) in Wien hat hierzu 2011 im „Safety Report 68“ Stellung genommen:

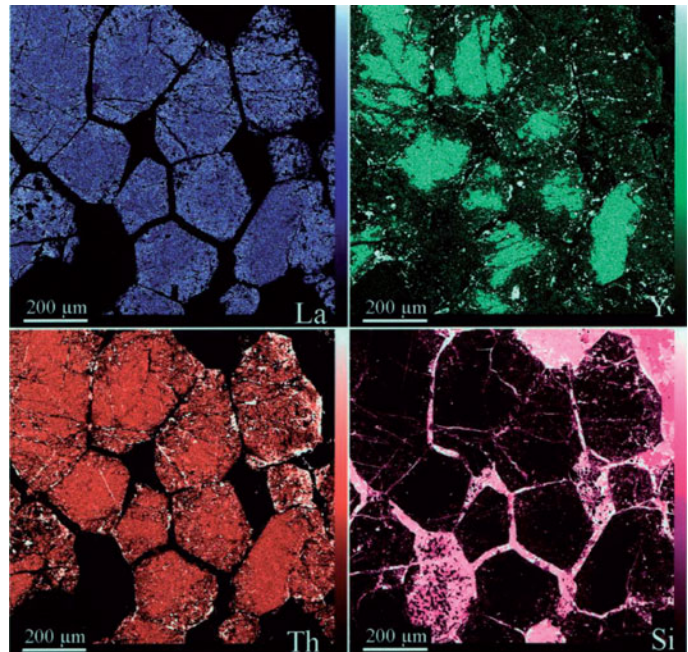
Monazitlagerstätten enthalten nennenswerte Mengen an Thorium (Th) und seinen Zerfallsprodukten. Die  $\text{ThO}_2$ -Gehalte bewegen sich im Bereich von 5 bis 12 % der Summe aus

SEM- und Th-Gehalt. Das Vorkommen von Mount Weld weist eine nur geringe Radioaktivität auf (obwohl als Monazit-Lagerstätte klassifiziert). Das dort gewonnene Konzentrat mit 40 % GOSE enthält nur 0,17 %  $\text{ThO}_2$  und 0,006 %  $\text{U}_3\text{O}_8$ .

Der Bastnäsit von Bayan Obo ist mit Monazit vergesellschaftet, er besteht zu 65–67 % aus Bastnäsit und 14–15 % Monazit. Der  $\text{ThO}_2$ -Gehalt beträgt etwa 0,15–0,40 %.

Für das Vorkommen von Mountain Pass werden Werte von 0,02 bis 1,0 %  $\text{ThO}_2$  berichtet. Bei einer GOSE-Konzentration von 60 % im Bastnäsit ist die Aktivität mit 3–5 Bq/g gering. Das Vorhaben gilt als Kandidat für eine Ausnahmegenehmigung, da die Strahlungsexposition mit 0,3–0,4 mSv/a für die Bergleute als gering eingestuft wird.

Für den Loparit von der Kola-Halbinsel wurden 0,6 %  $\text{ThO}_2$  und 0,03 %  $\text{U}_3\text{O}_8$  gemessen. Hier beträgt die Belastung ca. 4 mSv/a durch  $\gamma$ -Strahlung und 2 mSv/a durch Staubeentwicklung. Diese Werte liegen weit unter dem im Arbeitsschutz festgelegten Wert von 20 mSv/a



**Abb. 14.2** Diese Bilder zeigen Monazit-Kristallite mit einer Größe von 100 bis 200  $\mu\text{m}$ . Sie geben Ansatzpunkte dafür, welcher Zerkleinerungsgrad notwendig ist, um die SE-Verbindungen freizusetzen. Metallurgische Untersuchung geben Aufschluss über die Qualität des Konzentrats und die zu erwartende Ausbeute.  
Quelle: Read et al. (2002)

für eine Dauerexposition. Die natürliche Strahlungsexposition beträgt 3 mSv/a.

Die Ionenadsorbierenden Tone sind nur sehr gering radioaktiv kontaminiert. Messungen ergaben, dass  $\text{ThO}_2$  nur in Spuren vorliegt und  $\text{U}_3\text{O}_8$  mit 0,005 %.

Der Abbau von Monazitadern im Tiefenbergbau stellt durch die mögliche Anreicherung von Radon im Stollensystem besondere Anforderungen an das Gefahrenmanagement. Große Aufmerksamkeit muss der Bewetterung des Bergwerkgebäudes gewidmet werden, um Zerfallsprodukte des Thoriums zu entfernen.

Als Koppelprodukt hat das Thorium wirtschaftliche Bedeutung für die Herstellung von Glühstrümpfen sowie Wolfram-Punktschweißspitzen (hier durch Dispersionshärtung von gesintertem Wolfram und verbesserter Hitzebeständigkeit). Thorium hat darüber hinaus höheres Anwendungspotenzial in der zivilen Nutzung der Atomenergie. Durch seine kurzlebigen radioaktiven Abfälle (max. 300 Jahre) sowie der hohen Wirkungsgrade der Thoriumbrennelemente hat es Vorteile gegenüber Uran [s. a. Hurtado A (2011) Die nachhaltige Nutzung der Kernenergie. In: Kausch P, Bertau M, Gutzmer J, Matschullat J (Hrsg.) *Energie und Rohstoffe, Gestaltung unserer nachhaltigen Zukunft*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, S. 87–96].

## Lage

Die bergbauliche Gewinnung wie die Verarbeitung der Seltenerdminerale ist aufwendig in Bezug auf Energieeinsatz, chemische Reagenzien und technische Expertise. Die Erzverarbeitung wird idealerweise dort angesiedelt, wo eine leicht erreichbare industrielle Infrastruktur existiert. Sie benötigt Energie, Wasser, Zugang zu Chemikalien und ist nicht zuletzt davon abhängig, daß der Standort für hochqualifizierte Arbeitskräfte attraktiv ist und die politischen Entscheidungsträger sich zum Standort und dessen Weiterentwicklung bekennen. Im normalen Ablauf der Projekteva-

luierung im Rahmen einer Machbarkeitsstudie werden die Kosten für jeden dieser Teilaspekte unter die Lupe genommen, und es werden die wirtschaftlichen Potenziale der Produkte wie der Teilprodukte herausgearbeitet, bis hin zum Raffinationsgrad, den die einzelnen Produkte benötigen. Zu Beginn indes müssen generell gesetzliche Vorgaben und mögliche Umweltauswirkungen evaluiert werden. Zu einer vollständigen Betrachtung gehört auch die umweltrechtliche Bewertung der Aufgabe des Bergwerks einschließlich der notwendigen Re-kultivierungsmaßnahmen.

## 14.3 Verarbeitung

Die Verarbeitung der Seltenerdminerale besteht im Wesentlichen aus drei Phasen:

1. Ausbringung,
2. Hydrometallurgie,
3. Trennung.

Für die Ionenadsorbierenden Tone aus Südkina können die Aufbereitung und die hydrometallurgische Verarbeitung („*mineral cracking*“) übersprungen werden. Sie gehen direkt in den Trennprozess.

## Ausbringung

Es gibt die klassischen Prozesse, die das Rohfördergut verarbeiten und den Mineralgehalt für die nachfolgenden Verarbeitungsschritte konzentrieren. Die Optimierung der Zerkleinerungsschritte sowie die Extraktion der Mineralien aus dem Wirtsgestein ist keine triviale Angelegenheit. Dies betrifft den eigentlichen Abbauprozess bis hin zur Wahl der Sprengstoffe und der Partikelgröße im Rohfördergut. Mineralogische Daten sind hier sehr hilfreich, aber es gibt keine Alternative zur Entwicklung eines Aufbereitungsprozesses. Unweigerlich beginnt dieser mit der Gesteinszerkleinerung

(4 % der weltweiten Energieerzeugung werden für Zerkleinerungsprozesse über verschiedene Brech- und Mahlverfahren aufgewandt; Lewis-Gray, 2012). Das Ziel ist die Freisetzung der Erzminerale mit maximaler Reinheit bei maximaler Ausbeute. Die nachgelagerten Verfahrensschritte verlangen ein Material, das weitgehend von Verunreinigungen befreit ist, um den unnötigen Verbrauch an Reagenzien zu bzw. Wechselwirkungen mit Begleitelementen in der hydrometallurgischen Stufe zu minimieren. Im Fall des Monazits – das Mineral wurde international frei gehandelt, bevor eine verstärkte Sensibilität gegenüber Radioaktivität (und andere Änderungen um Umgang mit Th und SEM) den Handel zum Erliegen brachte – war die Standardspezifikation für dieses Mineral ca. 65 % Gesamtgehalt Seltene Erden plus Thorium. Genau genommen entspricht dies einem Mineral mit 58 % GOSSE und 5 %  $\text{ThO}_2$ . Das wiederum bedeutet einen Monazitgehalt im Konzentrat von über 95 %.

## Hydrometallurgie

Wirtschaftlich erfolgreich etabliert werden konnten die Aufbereitungsverfahren für das Fluorocarbonat Bastnäsit und die Phosphate Monazit und Xenotim. Die Tone werden anders behandelt.

Wie von Kingsnorth (► Kap. 8) beschrieben, stellen sich die Verfahrensoptionen wie folgt dar (Abb. 14.3):

Die Verfahren nehmen das mineralische Konzentrat entweder über saure oder alkalische Aufschlüsse auf. Das Diagramm in Abbildung 14.3 gibt die Realprozesse für die drei SE-Erze vereinfacht wieder. Die Materialzufuhr in diesen Prozess hängt von der Qualität des aufbereiteten Erzes ab, und die hydrometallurgische Stufe kann u. U. einer ganzen Reihe von Verfahrensschritten bedingen, um unerwünschte Verunreinigungen und radioaktive Elemente zu entfernen. Diese Ver-

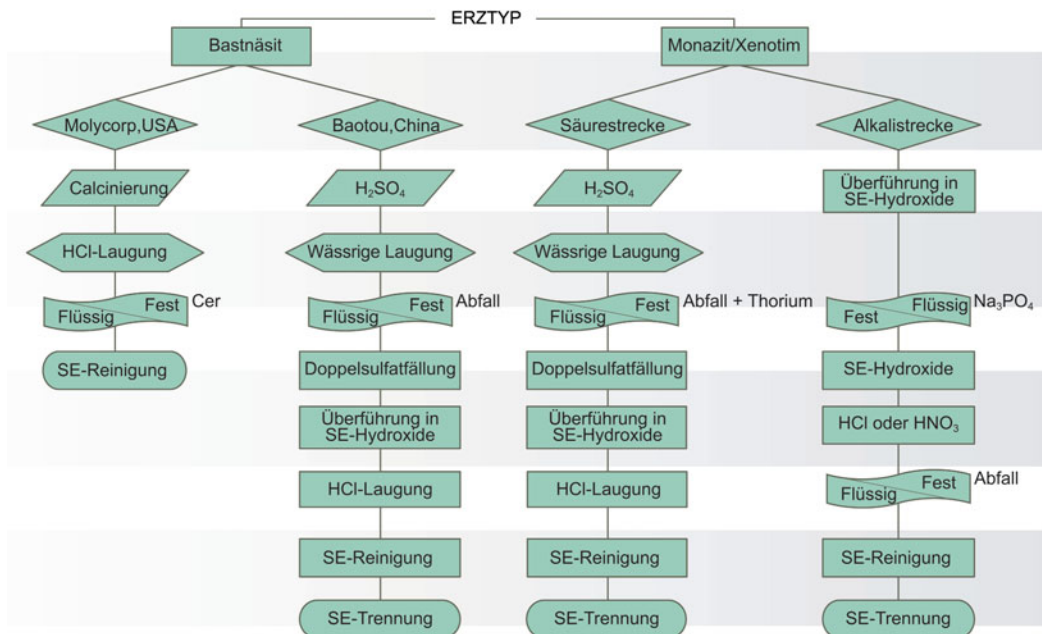


Abb. 14.3 Verfahrensoptionen für die Erzverarbeitung. Quelle: übersetzt nach Kingsnorth (2012)



fahren werden seit Jahrzehnten erfolgreich betrieben, und die Bereitstellung hochreiner SE-Chloride oder Nitrate (jeweils als Gemisch) hat sich als perfekt durchzuführen erwiesen. Eine Schlüsselrolle im Betrieb einer solchen Anlage nehmen die Bereitstellung und Handhabung großer Mengen an Reagenzien sowie die Wiederaufbereitung von Wasser ein. Jedes einzelne Projekt bedarf ausführlichster vorbereitender Tests, um optimale Verwertungsquoten mit geringstmöglichem Ressourcenverbrauch zu erreichen; für Großanlagen bietet es sich in manchen Fällen an, aus ökologischen und ökonomischen Gründen eine Chlor-Alkali-Elektrolyse zu installieren.

Eine hydrometallurgische Anlage wird in der Regel ein Gemisch aus SE-Chloriden erzeugen, das direkt in eine Solvent-Extraktionsanlage geführt wird, um die einzelnen SE-Elemente voneinander zu trennen. Historisch bedingt wurden lange Zeit Nitratlösungen eingesetzt; aus Umweltschutzgründen ist diese Technik jedoch überholt. Falls erforderlich, z. B. zum Transport der SE-Gemische (welche die natürliche Zusammensetzung des Rohförderprodukts widerspiegeln), werden sie als Karbonat aus der chloridischen Lösung ausgefällt. SE-Chlorid- und -Karbonatgemische werden typischerweise im Bereich von 45 Gew.-% GOSE gehandelt.

Mit Seltenen Erden angereicherte Tone werden direkt an der Lagerstätte verarbeitet. Dies gab wegen der damit verbundenen Konsequenzen für die Umwelt immer wieder Anlass zu harscher Kritik. Die Aufbereitung der Tone erfolgt nach folgendem Prinzip:

- Mit Kunststoffolie ausgekleidete Gruben werden mit Ton und Wasser beschickt.
- Die Tonaufschlammung wird mit Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) oder Ammoniumsulfat ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) behandelt, um die SE vom Ton abzulösen und in Lösung zu bringen, letztlich ein Laugungsprozess, bei dem bis zu 80 % Ausbeute erreicht werden.
- Die Fluide werden dekantiert und in einen tiefergelegenen Behälter geführt.

- Die SEM werden aus der sulfatischen Lösung mit Oxalsäure gefällt. Es entsteht ein SE-Oxalatgemisch, das abfiltriert und getrocknet wird (NB: Die SE-Fällung in Form ihrer Oxalate ist ein übliches Vorgehen, um hohe SE-Qualitäten zu erhalten). Zudem kann es calciniert werden, um die SE-Oxide zu erhalten.
- Das SE-Oxidgemisch wird üblicherweise in Polypropylen (PP)-Säcken à 20 kg auf den Markt gebracht.

## Trennung

Seltene Erden werden erst seit den 1960er-Jahren in großen Mengen getrennt. Die wirtschaftliche Triebfeder für die Entwicklung der Trenntechnologien war das Erfordernis für Europim (Eu), Yttrium (Y) und Terbium (Tb) für die Leuchtstoffe in den Kathodenstrahlröhren für das Farbfernsehen. Erst in den 1970er-Jahren überstiegen die Verkaufszahlen für Farbfernsehgeräte in den USA diejenigen für Schwarzweißgeräte.

Der gegenwärtig angewandte Prozess ist der ursprünglich in britischen Regierungslaboratorien in Harwell und Warren Spring entwickelte und durch die Thorium Company erstmals in Betrieb genommene Solvent-Extraktionsprozess (SX; Sherrington 1961). Dieser Prozess verwendet eine organische Verbindung (SX-Extraktionsmittel), das in einem organischen Träger gelöst wird (aus wirtschaftlichen Gründen wird hierzu nahezu ausschließlich Kerosin verwendet) und im Gegenstrom entlang einer wäßrigen Lösung des SE-Chloridgemisches geführt wird. Dies erfordert große Anlagen mit einer sehr hohen Anzahl an Mischabsetzern (*Mixer/Settler*), um eine ausreichend hohe Aktivfläche zwischen wäßriger und organischer Phase bereitzustellen.

Der SX-Prozess durchläuft eine Vielzahl einzelner Stufen, die im Anschluss in Extraktionslinien geführt werden, um die verschiedenen Metalle abzutrennen. Das ist ein sehr zeitauf-



## 14

wendiger Vorgang, und, was nicht immer sofort deutlich wird, ist, dass der SX-Prozess eine sehr hohe Menge an Reagenzien benötigt, um die Extraktionsmittel zu strippen bzw. die wässrigen Lösungen aufzukonzentrieren, bevor sie in die nachfolgenden Trennschritte geführt werden.

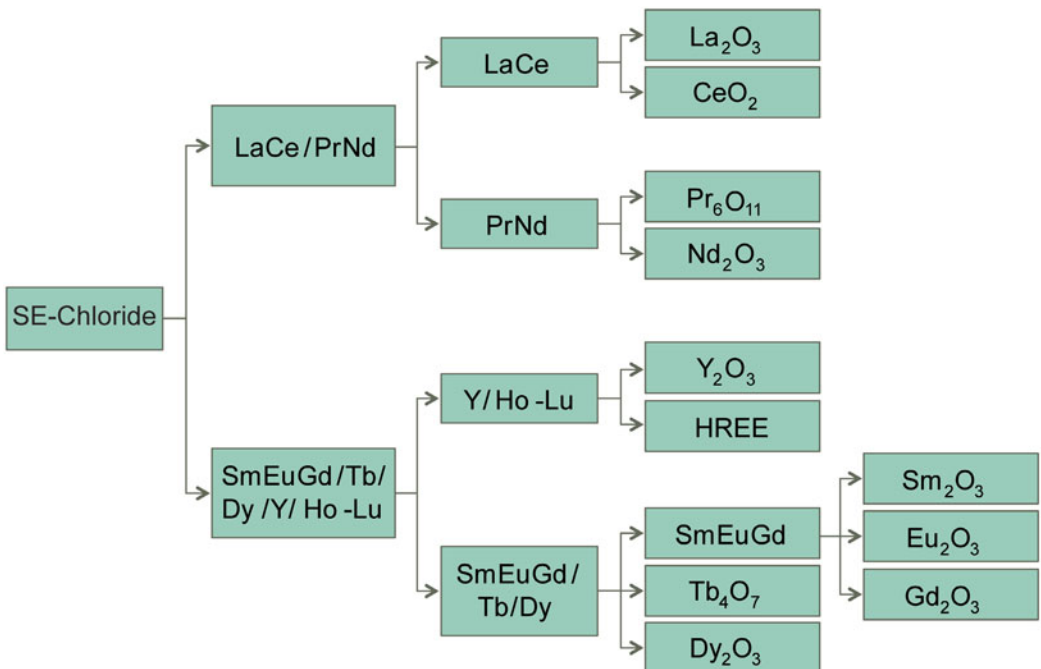
Bevor der SX-Prozess die SE-Gewinnung zu dominieren begann, orientierten sich Forschung und Entwicklung auf fraktionierte Kristallisation und Ionenaustauschverfahren, welche in letzter Konsequenz dieselben Trenncharakteristiken aufweisen wie der SX-Prozess. Zukünftig werden sicherlich alternative Trennmethoden entwickelt, z. B. chromatographische Trennverfahren, doch auf dem gegenwärtigen Stand ist nicht damit zu rechnen, dass der etablierte SX-Prozess, zumal vor dem Hintergrund ständig optimierter Extraktionsmittel, in naher Zukunft abgelöst werden wird. In Abbildung 14.4 ist der SX-Prozess zur SE-Gewinnung schematisch dargestellt.

## 14.4 Anwendungen für Seltenerdmetalle

Wie zuvor beschrieben, ist das Ungleichgewicht zwischen Nachfrage und natürlicher Elementverteilung in den verschiedenen Lagerstätten das Kernproblem der technischen Anwendung von Seltenerdmetallen. Jedes Element hat ganz spezifische Eigenschaften, und in nur wenigen Fällen können SE-Gemische eingesetzt werden. Die Hauptanwendungsgebiete (Annahmen für 2012) für SEM sind in Tabelle 14.5 aufgeführt.

### Permanentmagnete

Diese Produktklasse ist äußerst wichtig für eine Reihe moderner Technologien. Sie finden Anwendung in Kleinstmaschinen, z. B. werden nur milligrammgroße Kleinmagnete in Uhren-



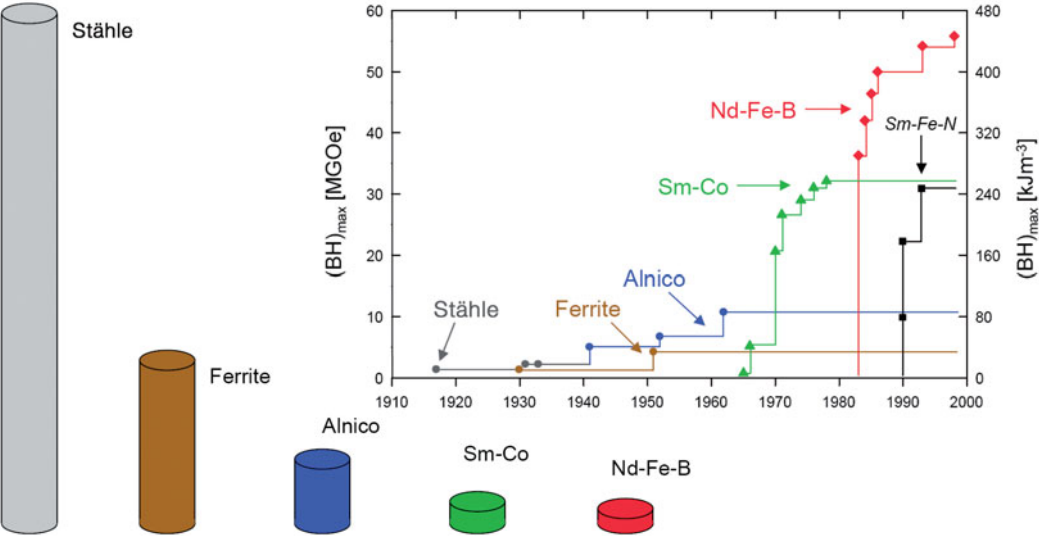
**Abb. 14.4** Prozessschema der Solventextraktion (SX) zur Seltenerdgewinnung. **HREE** Schwere Seltenerdelemente (engl. Heavy Rare Earth Elements)

**Tabelle 14.5**    Hauptanwendungsgebiete für Seltenerdmetalle 2012. Datenquelle: © Roskill u. IMCOA (2010) und Industrieforschung

Anwendungsgebiet	Bemerkungen
Permanentmagnete	~22% der getrennten SE
Metalle und Legierungen	~20% der getrennten SE
Katalysatoren	Zwei unterschiedliche Produktklassen, verbrauchen ~19% der SE-Produktion
Schleif- und Poliermittel	~13% der SE-Produktion
Glasadditive	~8% der SE-Produktion
Leuchtstoffe	Verbrauchen ~7% der getrennten SE
Keramiken	~6% der SE-Produktion
Andere	~5%

antrieben eingesetzt, über Großanlagen, wo z.B. für die großen Direktantriebe von Windkraftanlagen gleich mehrere Tonnen verbaut werden, bis hin zu den Antrieben von Festplattenspeichern, von denen Stückzahlen von mehreren Hundert Millionen jährlich produziert werden. Die Säulen in Abbildung 14.5 illustrieren die Entwicklung magnetischer Materialien in den letzten 100 Jahren.

Abbildung 14.5 (rechts oben) zeigt die höchsten maximalen Energieprodukte, die  $(BH)_{\max}$ -Werte für Permanentmagnete, die sich aus der magnetischen Flussdichte  $B$  und ihrer magnetischen Koerzitivfeldstärke  $H_c$  (Entmagnetisierungswiderstand) ergeben. Die farbigen Säulen veranschaulichen die Größe, die ein Magnet aufweisen muss, um dasselbe Magnetfeld zu erzeugen.



**Abb. 14.5** Entwicklung magnetischer Materialien in den letzten 100 Jahren. Quelle: übersetzt nach Gutfleisch et al. (2010)

Seit der Entdeckung von NdFeB 1983 haben Einsatz und Verwendung eine ausgesprochen rasante Entwicklung genommen. Das Gebiet wurde intensiv beforscht, zum einen, um Alternativen zu patentrechtlichen Beschränkungen zu finden, zum anderen, um etwas Stärkeres zu finden. Trotz aller eingesetzten Ressourcen ist kein Material bekannt, das NdFeB übertrifft. Für jedes Material, das aus Elementen des Periodensystems und Eisen (Fe) zusammengesetzt ist, liegt die Grenze für das Energieprodukt, unter der Annahme, es ließe sich für Eisen ein Entmagnetisierungswiderstand induzieren, bei  $920 \text{ kJ/m}^3$ . Dem ist hinzuzufügen, dass Eisen ein weiches Magnetmaterial ist, das für das einfache Wechseln der Orientierung des Magnetfeldes in Transformatoren eingesetzt wird. Mit  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  mit 70 Gew.-% Fe und Neodym (Nd), das zur Bereitstellung der magnetischen Flussdichte benötigt wird, wurde ein Material erzeugt, dessen magnetische Koerzitivfeldstärke seiner Remanenzflussdichte aufgrund seiner magnetokristallinen Anisotropie gleichkommt. Auf diese Weise können mehr als 50 % der theoretischen Grenze für das Energieprodukt eines Permanentmagneten erreicht werden.

Die Eigenschaften der Eisen-Neodym-Magneten lassen sich durch Beimischung anderer Metalle variieren. So lässt sich insbesondere die Temperaturbeständigkeit durch Beimen-

gung von Dysprosium (Dy) oder Terbium (Tb) signifikant erhöhen, was wiederum essenziell für Anwendungen in Automotoren ist. Das wiederum hat zu großer Besorgnis geführt, wie die Versorgung mit dem relativ seltenen Dy sichergestellt werden kann, sodass stetig weitere Forschungsanstrengungen in Hinblick auf Substitution bzw. Verminderung der Dy-Anteile in handelsüblichen Magneten unternommen werden. Der Pionier und Erfinder der Nd-FeB-Magneten, Masato Sagawa, beobachtete, dass, wenn der durchschnittliche Dy-Bedarf in den Magnetqualitäten 3 % übersteigt, dies einer technologischen Weiterentwicklung eher abträglich ist. Die Aufsuchung neuer Dy-Vorkommen einerseits und Versuche, den Mindestgehalt an Dy weiter zu reduzieren, zeugen von den Anstrengungen, die in dieser Richtung unternommen werden. Die SEM, die in Permanentmagneten eingesetzt werden, sind in Tabelle 14.6 zusammengefasst.

Samarium-Cobalt (SmCo)-Magnete zeichnen sich durch eine im Vergleich zu NdFeB höhere Temperatur- und Korrosionsstabilität aus, ihre Herstellung ist aber teurer. Es gibt zwei Legierungen, das  $\text{SmCo}_5$  mit  $(\text{BH})_{\text{max}} = 200 \text{ kJ m}^{-3}$  und  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  mit  $(\text{BH})_{\text{max}} = 260 \text{ kJ m}^{-3}$ . Oberhalb  $150^\circ\text{C}$  übersteigt das Energieprodukt  $(\text{BH})_{\text{max}}$  der SmCo-Magneten dasjenige von NdFeB-Magneten.

**Tabelle 14.6** SEM in Permanentmagneten

Seltenerdmetall	Symbol	Bemerkungen
Neodym	Nd	Hauptkomponente von NdFeB-Magneten. $(\text{BH})_{\text{max}} = 512 \text{ kJ/m}^3$
Praseodym	Pr	Direkter Ersatzstoff für Nd.
Dysprosium	Dy	Erhöht Temperaturbeständigkeit von NdFeB-Magneten.
Terbium	Tb	Wirkungsvoller als Dy für Temperaturbeständigkeit von NdFeB-Magneten, aber deutlich seltener. Konkurrierende Anwendungen.
Samarium	Sm	Hauptkomponente von SmCo-Magneten. $\text{SmCo}_5$ : $(\text{BH})_{\text{max}} = 200 \text{ kJ/m}^3$ $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ : $(\text{BH})_{\text{max}} = 260 \text{ kJ/m}^3$
Gadolinium	Gd	Erhöhen Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit von SmCo-Magneten.
Cer	Ce	

## Metalle und Legierungen

Seltenerdmetalle sind aufgrund ihres extremen Oxidationspotenzials schwer herzustellen. Die überwiegende Menge der Metalle wird durch Schmelzflusselektrolyse hergestellt. Dieser Prozess ist der Aluminiumgewinnung recht ähnlich, da er auf einem Bad aus geschmolzenen Fluoriden basiert, in dem die Seltenerdoxide gelöst sind. Der anodisch freigesetzte Sauerstoff verzehrt die Kohlenstoffelektrode während der Elektrolyse. Das kathodisch gebildete SEM sammelt sich unterhalb einer Wolframelektrode und wird von Zeit zu Zeit abgestochen. Im Falle der Herstellung von DyFe-Vorlegierungen lässt sich die Badtemperatur bei vergleichsweise geringen Temperaturen halten, indem eine Eisenkathode verwendet wird, auf der sich Dy abscheidet. Unter den Elektrolysebedingungen ist DyFe flüssig, sodass sich die Kathode mit der Zeit auflöst.

Neben den Permanentmagnetlegierungen gibt es andere technisch wichtige SE-Legierungen wie die Wasserstoffspeicherlegierungen auf Basis von Lanthan-Nickel (LaNi), das in Nickel-Metallhydridakkumulatoren (NiMH) eingesetzt wird. Die Bedeutung der NiMH-Akkumulatoren nimmt beständig zu, obwohl sie in Konkurrenz zu einer Reihe von Alternativen wie Li-Ionenakkumulatoren stehen, da sie sich seit langer Zeit als sichere Stromspeicher bewährt haben.

Aufgrund des hohen Wasserstoffvolumens, das sie bei vergleichsweise geringen Drücken absorbieren können, besitzen Lanthan-Nickel (LaNi<sub>5</sub>)-Legierungen Potenzial für eine breitere Verwendung für Wasserstoff als Energiespeicher. Jede LaNi<sub>5</sub>-Einheit kann durchschnittlich 6,6 Wasserstoffatome speichern. Diese Technik ist für stationäre Speicher geeignet, ist aber aufgrund des geringen Gewichtsanteils für Wasserstoff von max. 1,3 Gew.-% keine Lösung für mobile Anwendungen.

Es gibt noch weitere Legierungen, die bereits in begrenztem Umfang eingesetzt werden oder sich in einer erst frühen Nutzungsphase bzw. noch in Entwicklung befinden. Eine Legierung

aus Terbium (Tb), Dysprosium (Dy) und Eisen (Fe) der allgemeinen Zusammensetzung (RE)Fe<sub>2</sub>, bekannt als *Terfenol*, weist enorme magnetostriktive Eigenschaften auf (TbFe<sub>2</sub>:  $\lambda_{||} = 1.753 \cdot 10^{-6}$ , Tb<sub>0,3</sub>Dy<sub>0,7</sub>Fe<sub>2</sub> (Terfenol-D)  $\lambda_{||} = 1.600 \cdot 10^{-6}$ ), was sie für die Herstellung von Ultraschallgeneratoren oder Sonaren prädestiniert. Scandium(Sc)-Aluminium(Al)-Legierungen werden für zivile Anwendungen genutzt, sind aber auch für die Entwicklung von hochfesten Materialien geringer Dichte für die Luft- und Raumfahrttechnik denkbar. SEM werden außerdem manchen Magnesium(Mg)-Legierungen zugesetzt, von denen man sich Gewichtseinsparungen für die Luftfahrt verspricht.

Der magnetocalorische Effekt ist für Anwendungen von SE-Metallen und Legierungen in der Festphasenkühlung interessant. Ursprünglich wurde dieser Effekt für Gadolinium (Gd) gefunden, in jüngerer Zeit haben sich Legierungen des Typs La(Fe<sub>1-x</sub>Si<sub>x</sub>)<sub>13</sub>, z. T. auch teilhydriert, als vielversprechend erwiesen.

Untergeordnete Beimengungen von SEE werden zur Herstellung von Spezialstählen und zur Modifizierung von Gusseisen verwendet. Vor allem Lanthan (La) und Yttrium (Y) werden als hitzebeständige Legierungen für den Luftfahrzeugbau eingesetzt. In oxidischer Form, zusammen mit Zirkonium (Zr), dienen sie zur Herstellung von Wärmedämmschichten.

## Katalysatoren

Seltene Erden werden in zwei vollkommen unterschiedlichen Katalysatoren eingesetzt:

- *Fluid Catalytic Cracking* (FCC) in Erdölraffinerien,
- mobile und stationäre Abgaskatalysatoren, bei denen ein Katalysatorträger mit einer komplexen Substanz aus verschiedenen anorganischen, SEE- und edelmetallhaltigen Oxiden, dem sogenannten *Washcoat*, belegt ist. Der Dreiwege-Autokatalysator ist die sicherlich bekannteste Anwendung.

In der Erdölraffinerietechnik besteht das Erfordernis, die Ausbeute an Leichtsiedern zu

erhöhen, indem schwere Mineralölfractionen zu leichteren Kohlenwasserstoffen umgewandelt werden. Dies wird mittels Katalysatoren für das katalytische Cracken (*Fluid-Cracking*-Katalysatoren) erreicht. Auf diese Weise lässt sich die Siedepunktverteilung der eingespeisten Öle in Richtung Leichtsieder verändern. Das Verfahren wird auf ca. 7 % des Raffinerieausstoßes angewandt und arbeitet bei 500 bis 530 °C. Da der Katalysator sehr schnell verkocht, muss er regeneriert werden, was bei 650 bis 680 °C geschieht. Die Katalysatorpellets bestehen aus einer Aluminiumoxidmatrix, einem Binder und dem Seltene Erden beinhaltenden Zeolith. Letzterer kann 10 bis 50 % des Katalysatorpellets ausmachen, wobei der Seltenerdgehalt bei gerade einmal 2 Gew.-% des Katalysators liegt. Yttrium (Y) wird für die Zeolithsynthese benötigt, und die SEE Cer (Ce) und Lanthan (La) ersetzen in der Alumosilikatstruktur des Zeoliths Natrium (Na)-Ionen.

Bei den Abgaskatalysatoren, die Umweltschadstoffe aus Autoabgasen und anderen Abluftquellen entfernen, handelt es sich normalerweise um Platingruppenmetalle (PGM), die auf einem keramischen Trägermaterial aufgebracht sind, das wiederum mit einer SEO/Zirkonia ( $\text{ZrO}_2$ )-Schicht ummantelt ist. Diese Materialien unterliegen einer ständigen Weiterentwicklung, um mit Änderungen im Umweltrecht mitzuhalten sowie um den Anforderungen für unterschiedliche Treibstoffe zu genügen bzw. das Niedertemperaturansprungsverhalten für den Kaltstart zu optimieren. Die für Ottomotoren gebräuchlichste Seltene Erde ist Cer gefolgt von geringeren Anteilen an Lanthan. Die katalytisch aktiven Verbindungen werden durch gemeinsame Fällung mit anderen Übergangsmetallen wie Zirkonium aus Lösung gewonnen; die jeweilige Rezeptur unterliegt der Geheimhaltung. Die Funktion der SE-Komponente ist es, Sauerstoff zu speichern und abzugeben, was in der Fähigkeit der SEM, nichtstöchiometrische Oxide bilden zu können, begründet liegt, und was auf diese Weise die katalytische Wirksamkeit der PGM-Katalysatoren in der Abgasbehandlung substantiell verbessert.

## Schleif- und Poliermittel

Seltenerdverbindungen werden seit Jahren in Schleif- und Poliermitteln eingesetzt, z. B. in der Herstellung von Gläsern oder Halbleiterwafern. Aufgrund ihrer durch SE-Beimengungen, vorwiegend Praseodym (Pr), verursachten braunen bis roten Farbe sind sie auch als „Cerium Rouge“ bekannt. Der Vergang beruht auf einer chemomechanischen Politur bzw. Abtragung. Die SE-Komponenten sind typischerweise eine Kombination aus Cer (Ce)-, Lanthan (La)- und Praseodym (Pr)-Oxiden, bei denen ein Ce:La-Verhältnis von 2:1 üblich ist, bei einem Pr-Anteil von ~5 %. Aufgrund der hohen Nachfrage nach Pr zur Herstellung von Permanentmagneten werden zunehmend Pr-freie Polituren auf reiner Ce/La-Basis entwickelt. Ironischerweise ist die Nachfrage nach diesen Pr-freien Schleif- und Poliermitteln gering, da ihnen die typische rotbraune Farbe fehlt.

## Glas

Seltene Erden erfüllen in Gläsern die Funktion eines Farbgebers wie Entfärbers. Cer(IV)oxid ( $\text{CeO}_2$ ) wird benutzt, um durch Eisen (Fe) verursachte Färbungen zu neutralisieren. Bei Zugabe von ~1 % wirkt es wiederum selbst als Farbgeber zur Herstellung gelber Gläser. Andere nützliche Effekte aus der Beimischung von SEE ergeben sich aus der Verwendung von Lanthan (La) zur Herstellung von hochfeuerfesten Gläsern. Als Farbgeber dienen ferner Neodym (Nd), Nd/Pr (Didym), Praseodym (Pr), Holmium (Ho) und Erbium (Er). Unter ihnen sind Nd und Nd/Pr besonders wichtige Additive, da sie Schweißergläsern ihre wichtigen UV-absorbierenden Eigenschaften verleihen.

Von der Möglichkeit zur Anpassung der Brechkraft mittels SE-Beimengungen wird in der Herstellung von Glasfaseroptiken Gebrauch gemacht, indem die Oberfläche der



Glasfasern umgewandelt wird, um eine verbesserte innere Reflexion zu erreichen und damit längere optische Übertragungswege.

Leuchtstoffe

Seltene Erden haben eine breite Anwendung als farbige Leuchtstoffe. Früher wurden sie in den Kathodenstrahlröhren der Farbfernseher und Computermonitore verwendet, und auch heute werden sie für die Herstellung von Bildschirmanzeigen (LED-Bildschirme) und anderen optischen Anzeigen benötigt, einschließlich Flüssigkristall(LCD)- und Plasmatechnologien. Ferner sind sie essenziell für die Herstellung von Leuchtstoffröhren und Energiesparlampen, sowohl auf Röhren- als auf LED-Basis. Die Leuchtstoffverbindungen sind komplex und sehr unterschiedlich, sie werden individuell für den jeweiligen Anwendungszweck entwickelt (Tabelle 14.7).

Die in Leuchtstoffen hauptsächlich verwendeten SEE sind Yttrium (Y), Europium (Eu) und Terbium (Tb). Im grünen Leuchtstoff beträgt der Tb-Gehalt ~10 %. In den blauen Leuchtstoffen liegt der Eu-Gehalt bei ~5 %. In Leuchtstoffröhren wird ein Gemisch aus drei Leuchtstoffen verwendet, üblicherweise beträgt das Verhältnis 55 % rot, 35 % grün und 10 % blau.

Scandiumiodid wird in lichtstarken Bogenlampen zur Erzeugung von Flutlicht (Stadienbeleuchtung) eingesetzt.

Tabelle 14.7 Chemische Zusammensetzung von wesentlichen Leuchtstoffen

Leuchtstoff-Farbe	Chemische Formel
Rot	$\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}$
Grün	$\text{LaPO}_4\text{:Ce,Tb}$
Blau #1	$(\text{Ba,MgAl})_{10}\text{O}_{17}\text{:Eu}$
Blau #2	$(\text{Sr,Ca,Ba})_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl:Eu}$

Die Anwendung als Leuchtstoffe verbraucht zwar nur ca. 7 % der Seltenerdproduktion, verlangt aber hochreine und damit hochpreisige Materialien, weswegen die Herstellung der in den Leuchtstoffen eingesetzten Seltenerdverbindungen überproportional hohe Kosten verursacht.

Keramiken

Seltene Erden werden zur Herstellung von Keramiken für medizinische, elektronische und mechanische Anwendungen verwendet. Sie stellen nur selten das Hauptelement dar, sind aber unverzichtbare Komponenten, um die Materialeigenschaften ihren Bestimmungen anzupassen. Yttrium (Y) ist das bei Weitem am häufigsten genutzte SEE in Keramiken, z. B. in yttriumoxid-stabilisiertem Zirkoniumoxid ( $\text{ZrO}_2$ ) oder in Yttrium-Aluminium-Granat (YAG) für Nd-dotierte Laser. Andere nennenswerte Anwendungen ergeben sich aus neuen Materialien für die Ummantelung prothetischer Implantate, und Yttriumoxid sowie andere SEO werden für hitzeabweisende Beschichtungen von Düsentriebwerksschaufelblättern verwendet. Andere SEE (La, Ce, Pr und Nd) werden benötigt, um Kondensatoren herzustellen oder um die Temperaturkompensation bzw. Leitfähigkeitscharakteristik von dielektrischen kreamischen Kondensatoren auf Basis von Bariumtitanoxid anzupassen.

Seltenerdverbindungen können in Volumenphasen, aber auch als Deckschichten auf Keramiken ihre Farbe verleihen, wie z. B. Dekorfliessen; Pr ergibt Gelb, Y Orange und Nd ein helles Lila.

Andere Anwendungen

Seltene Erdelemente haben eine Reihe ungewöhnlicher Eigenschaften und Anwendungen. Gadolinium (Gd) hat den höchsten Neutroneneinfangquerschnitt überhaupt und findet somit

Anwendung in der Kerntechnik und -forschung, bis hin zu seiner Verwendung als Kontrastmittel in der Medizin. Ähnliches gilt für Dysprosium (Dy) und Erbium (Er) in der Kerntechnik. Ce-Verbindungen werden in der Entkeimung von Wasser eingesetzt sowie zur Entfernung von Arsenbelastungen in der Wasserversorgung. Zusätzlich zu ihrer Verwendung in Keramiken besitzen Cer (Ce) und Scandium (Sc) Potenzial für die Entwicklung von SOFC-Brennstoffzellen (*Solid Oxide Fuel Cells*). Bislang sind für SEE keine schwerwiegenden toxikologischen oder ökologischen Probleme bekannt, vielmehr wurden sie in China sogar, wenngleich mit begrenztem Erfolg, als Düngemittel eingesetzt.

Unter der Annahme, dass die Verfügbarkeit dieser Materialien eher kurz bemessen ist, wird angenommen, dass neue Entwicklungen aufkommen, wie z.B. der erste keramische Hochtemperatursupraleiter auf Basis von Yttrium-Barium-Kupfer-Oxid.

## Quellenverzeichnis

- Europäische Kommission (2010) Critical raw materials for the EU, Report of the ad-hoc working group on defining critical raw materials. Juli 2010
- Gutfleisch O, Liu JP, Willard MA, Brück E, Chen CH, Sankar SG (2010) Magnetic materials and devices for the 21<sup>st</sup> century: stronger, lighter, and more efficient (review). *Advanced Materials* 23, 7: 821–842
- GWMG (2013) Great Western Minerals Group Ltd., Release of Resource data conforming to NI 43-101, März 2013
- IAEO (2011) Safety Report Series No. 68: Radiation protection and NORM residue management in the production of rare earths from Thorium containing minerals. International Atomic Energy Agency, Wien
- Kingsnorth DJ (2012) Rare Earths Supply Security: Dreams or Possibilities. Präsentation des Centre for Research in Energy and Minerals Economics (Curtin University, W Australia) und Industrial Minerals Company of Australia Pty Ltd (IMCOA) zum IV. Symposium Freiburger Innovationen, Strategische Rohstoffe – Risikoversorge, in Freiberg, Sachsen, 19.–20. April 2012
- Lewis-Gray E (2012) CEEC the future, Coalition for Eco-Efficient Comminution, Presentation to SAIMM 2012, [http://www.saimm.co.za/download/branches/Johannesburg/CEEC-SAIMM-ELG-FinalClean-120206%20\(2\).pdf](http://www.saimm.co.za/download/branches/Johannesburg/CEEC-SAIMM-ELG-FinalClean-120206%20(2).pdf)
- Read D, Andreoli MAG, Knoper M, Williams T, Jarvis N (2002) The degradation of monazite: implications for the mobility of rare-earth and actinide elements during low-temperature alteration. *Eur J Mineral*, 14: 487–498. [http://www.schweizerbart.de/papers/ejm/detail/14/54232/The\\_degradation\\_of\\_monazite\\_Implications\\_for\\_the\\_m?l=DE](http://www.schweizerbart.de/papers/ejm/detail/14/54232/The_degradation_of_monazite_Implications_for_the_m?l=DE). Letzter Zugriff 13.08.2013
- Roskill; IMCOA (2010) Rare earths: facing the uncertainties of supply. Präsentation der Roskill Information Services Ltd und Industrial Minerals Company of Australia Pty Ltd. (IMCOA), 6th International Rare earths Conference, Hong Kong, November 2010. <http://de.slideshare.net/Tehama/rare-earths-facing-the-uncertainties-of-supply>. Letzter Zugriff 23.07.2013
- Selby JH (2012) Feasibility of Producing Rare Earths from Southern African Monazites, Presentation at Thorium and Rare Earth Conference on Energy security in a post fossil fuel era. 21–22 Februar 2012. Southern African Institute of Mining and Metallurgy
- Sherrington LG (1961) Patent Separation of Lanthanons from Thorium. Patent assignee: Thorium, Ltd. Updated 2008, Report Number GB 870950
- Technology Metals Research (2013) verschiedene Berichte von Gareth Hatch
- Watanabe Y (2010) Rare earth usage in Japan: Future requirements, sourcing challenges and the Japanese perspective. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST, Geological Survey of Japan) Wissenschaftliche Präsentation, 21. Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and their Applications, 29. August–2. September 2010, Bled, Slovenia

## Kernaussagen

- Seltene Erden mögen häufig vorkommen, und es mag weltweit viele höfliche Vorkommen geben, doch es handelt sich um komplexe, unbeständige Ressourcen; jede von ihnen verlangt eine detaillierte Beurteilung und ausgiebige Verfahrensausarbeitungen für die metallurgische Aufarbeitung. Die Ausbringung ist komplex und ressourcenintensiv. Die Elemente sind sehr unterschiedlich in ihren Verwendungsmöglichkeiten, und die Verteilung der Elemente in den Lagerstätten ist ein Schlüsselfaktor für deren Ausbeutung.
- Die Anwendungen sind vielfältig, und nach nur 50 Jahren Forschung und Entwicklung ist das Potenzial dieser Metalle und ihrer Verbindungen sehr reichhaltig. Bestimmte Einsatzgebiete wie Permanentmagnete und Leuchtstoffe erscheinen im Lichte der einzigartigen Eigenschaften dieser Elemente unersetzbar. Die moderne Industrie ist auf eine wachsende Anzahl Elemente zwingend angewiesen; die EU-Kommission hat im Jahre 2010 einen Bericht herausgegeben, mit dem Titel: „Kritische Rohstoffe für die EU“; hierin werden 14 kritische Rohstoffe genannt, die mindestens 35 getrennte Elemente umfassen. Die Seltenen Erden werden als Gruppe zusammengefasst unter der Rubrik „kritische Materialien“ aufgeführt, obgleich dies im Wesentlichen nur für Nd, Pr, Dy, Tb, Eu und Y zutrifft.
- Fünfzehn verschiedene Elemente aus den wirtschaftlich genutzten Vorkommen zu gewinnen und einer Verwertung zuzuführen, ist eine komplexe Herausforderung. Der Schlüsselfaktor für zukünftige Anwendungen für die Metalle liegt in einer ausgewogeneren Angebots- und Nachfragesituation. In der Industrie gilt der Spruch: „Fünf Elemente werden benötigt, fünf können verkauft werden und fünf werden eingelagert“. Strategische Forschungsanstrengungen werden zunehmend darauf ausgerichtet, Anwendungen für diejenigen Elemente zu finden, für die ein Überangebot herrscht.

# 15 Aufbereitung mineralischer Rohstoffe – Chancen und Herausforderungen

Patrick R. Taylor

## 15.1 Einleitung

Das Fachgebiet „Aufbereitung mineralischer Rohstoffe“ geht bis in die Frühzeit menschlicher Zivilisation zurück. Erze wurden schon vor Beginn der Zeitrechnung wirtschaftlich aufbereitet und Metalle daraus gewonnen. Ein Mann aus Sachsen publizierte einen der ersten wissenschaftlichen Texte zum Thema (Agricola 1556). Die Grundlagen der Freisetzung von wertvollem Material aus dem wertlosen Gestein (Gangmaterial) sowie die nachfolgende Trennung zur Konzentration der Wertbestandteile über diverse physikalische und oberflächenchemische Prozesse sowie die chemischen Eigenschaften der Stoffe sind von Anbeginn die Leitlinien der Entwicklung.

Die Aufbereitungstechnik entwickelt sich inzwischen sehr schnell weiter, da die wachsende moderne Gesellschaft in einer zunehmenden Zahl von Ländern ständig neue Anforderungen stellt und an den zivilisatorischen und technischen Annehmlichkeiten teilhaben will. Die moderne Aufbereitung profitiert heute von mehr als 100 Jahren der Grundlagen- sowie der angewandten Forschung. Dies trug dazu bei, dass wir heute Techniken auf einer viel besser wissenschaftlich begründeten und ingenieurtechnisch effizienter umgesetzten Basis verwirklichen können. Gerade in den letzten Jahrzehnten gab es eine Reihe wesentlicher Fortschritte, die es erlauben, deutlich größere

Mengen umzusetzen, mit niedrigeren Wertstoffgehalten im Erz zurechtzukommen und zugleich schärfere Regeln zum Umweltschutz in wirtschaftlicher Weise einhalten zu können.

Zu den großen Fortschritten bei der Zerkleinerung gehören Semiautogenmühlen (SAG), Hochdruck-Mahlwalzen, die automatisierte quantitative Mineralogie, verbesserte Siebtechniken, Innovationen bei Verdickungsmitteln und Filtrationsmethoden, Modelle für das Design von Zerkleinerungsmühlen und Erzbrechanlagen, Modelle zur Populations-Bilanz sowie für weitere Techniken einer Aufbereitungsanlage (Hydrozyklone, Siebe, Verdicker, etc.); und nicht zuletzt für Voraussagen zu Materialflüssen und Bruchverhalten in den Zerkleinerungsanlagen.

Wesentliche Fortschritte bei der stofflichen Trennung konnten bei Seltenerd-magnetseparatoren (und anderen magnetischen Trennhilfen), bei Erzsortierung, Säulenflotation, verbesserter Trennung dichter Medien sowie bei der Schweretrennung (Spiralen, Knelson-Konzentrierer etc.) erzielt werden. Dazu gehören ein besseres Verständnis und eine leistungsfähigere Analyse der zugrundeliegenden Oberflächenchemie, verbesserte großmaßstäbliche Flotationsanlagen, und nicht zuletzt wieder die Modellierung des Partikelverhaltens und der Materialflüsse in den einzelnen Teilprozessschritten.

Ein erheblicher Anteil der heute verwendeten Techniken in der Extraktionsmetallurgie

wurde vor vielen Jahren entwickelt. Seitdem gab es einige deutliche Fortschritte in unserem Verständnis der chemischen Prozesse bei Extraktion und Trennung. Dazu gehören exzellente chemisch-thermodynamische Prüfmethoden, welche die Gibbs'sche Energieminimierung und weitere Methoden nutzen; verbesserte Extraktionsmethoden, die auf einem fortgeschrittenen Verständnis der chemischen Kinetik, dem Design der Reaktoren und der Transportphänomene (Wärme, Masse und Impuls), beruhen sowie einem tieferen Verständnis der Lösungsreinigungstechniken (wie Lösemittelextraktion und Ionenaustausch), der Elektrochemie bei der Schmelzsalzelektrolyse und anderen Metallgewinnungstechniken, und auch bessere Konstruktionsmaterialien, die mit heißen, reaktiven Systemen umgehen können. Nicht zuletzt gehören leistungsfähigere Modelle und Software für die chemischen Reaktionen und optimierte Prozessabläufe dazu.

Alle dieser jüngeren Fortschritte wurden durch unsere Nachfrage nach mehr Metallen und Mineralen zu niedrigeren Kosten und schärferen Umweltkontrollen erreicht – und durch den Ehrgeiz von Ingenieuren und Firmen, Produkte weiterhin zu verbessern und Prozesse effizienter zu gestalten. Dieser Beitrag wird im Folgenden eine Reihe von aktuellen Herausforderungen und Chancen diskutieren und dabei Themen ansprechen, die in die Zukunft weisen. Dies schließt die Berücksichtigung der Wasserproblematik ein (Wasser wird immer schneller zu einer begrenzten Ressource), von Energiefragen (der wesentliche wirtschaftliche Kostenfaktor in Zerkleinerungsprozessen), sowie die Themen Modellierung, automatisierte Mineralogie und kritische Materialien.

## 15.2 Wasser

Zum Thema Wasser in Bergbau und Zerkleinerung veröffentlichte Dunne (2010) einen sehr guten Überblicksbeitrag, dessen wesentliche Aussagen hier zusammengefasst werden. Ein

Kernaspekt gilt der Zustimmung der Öffentlichkeit zu den Aktivitäten. Dazu gehören in der Regel:

*„Bedenken zum Einfluss von Bergbau und Verarbeitung auf die Wasserqualität in Flüssen, im Grundwasser sowie im marinen Umfeld, das Umleiten von Oberflächengewässern, und nicht zuletzt auch eine verringerte Wasserverfügbarkeit für die Kommunen durch den hohen Bedarf in Bergbau und Aufbereitungsbetrieben.“*

*Strategien des Wassermanagements gehen auf diese Bedenken ein. Dadurch erhöht sich die Effizienz der Brauchwassernutzung, größere Wasserrückgewinnung und damit ein verringerter Frischwasserbedarf, verringerte Einflüsse auf lokale Wasserressourcen durch verminderte Abgabe von verschmutzten Bergbauwässern und nicht zuletzt das Einhalten staatlicher Umweltschutzzorgaben und das Berücksichtigen des langfristigen Bedarfs nach Schließung des Bergwerks“.*

Die Wässer können generell aus unterschiedlichen Teilsystemen genutzt werden:

- Grundwasser (dies kann salzig sein, variable pH-Werte aufweisen und kann natürlich vorkommende Schwermetalle mitführen),
- Oberflächenabflusswasser (kann leicht sauer sein, einen hohen Anteil suspendierter Feststoffe und eher niedrige Metallgehalte führen),
- Bergbauwasser aus der Grubenentwässerung (meist hohe Salinität und Metallbelastung),
- saure Bergbauwässer (mit sehr geringen pH-Werten, hohen Metall- und Sulfatgehalten)
- wiederaufbereitetes Prozesswasser (meist kontaminiert, kann Schwermetalle, Salze und Prozesschemikalien enthalten),
- Niederschlagswasser (mit leicht saurem pH-Wert),
- Abwasser (mit pathogenen Keimen sowie erhöhten Konzentrationen an Ammonium, Phosphor sowie organischen Chemikalien),
- Meerwasser (mit Natriumchlorid, korrosiven Eigenschaften und Magnesiumsalzen, die eine pH-Veränderung puffern).



Der Großteil des Wassers im Bergbau und bei der Erzverarbeitung wird für Mineralaufbereitung und die Schmelz- und Anreicherungsprozesse gebraucht. Bei Letzterem liegt der größte Bedarf bei der Flotation. Der Verbrauch kann durch Strategien im Wassermanagement, durch Kreisläufe bei den Prozesswässern sowie durch verminderte Verdunstung, Versickerung und Entwässerung der Tailings vor deren Ausbringung (*dry stacking*) erreicht werden. Eine weitere Möglichkeit liegt in der Nutzung alternativer Wasserquellen, so zum Beispiel Salzwasser, Meerwasser oder auch Abwässer. Ein gutes Management wird auf eine geschlossene Wasserbilanz im Bereich des Bergwerkes achten (Turcotte 1986). Eine gute Praxis schließt die Entwässerung in einem Verdicker und die Rückgewinnung von Wasser aus Tailings ein. Verluste, zum Beispiel aus Versickerung und Verdunstung, können identifiziert und kompensiert werden.

Bergbaubetriebe mit einer positiven Wasserbilanz, die Wasser auf Gebiete außerhalb des Betriebsgeländes führen, müssen Bedenken und Einschränkungen der Behörden zu Mengen und Qualität von Abflusswasser berücksichtigen (Umweltbehörden auf lokaler und nationaler Ebene). Hier handelt es sich um einen dynamischen Prozess und sich wandelnde Regeln, auf die es sich mit besserer Technik einzustellen gilt, wenn die Anforderungen steigen.

Betriebe mit einer negativen Wasserbilanz haben entsprechend Bedenken und Einschränkungen der Behörden zum zusätzlichen Wasserbedarf (Niederschlagswasser, Oberflächen oder Grundwasser) sowie Schwankungen der Verfügbarkeit zu berücksichtigen. Wasserhaltung, Kreislaufwirtschaft und Abfallverminderung sind zentrale Themen für das Wassermanagement.

Entwässerung und Wasserrückgewinnungsmethoden schließen Siebtechniken, konventionelle und pastöse Verdickung, Lamellenseparatoren, Filtration und Sedimentation ein. Chemikalien werden für die Koagulation und Flokkulation gebraucht, um die Trennung zu

erleichtern. Dabei hat sich die Technologie für Verdickungsmittel in den vergangenen 20 Jahren mit erhöhten Abflusssichten und der Fähigkeit, auch schwierige Erze zu behandeln, wesentlich verbessert. Pasten oder hochdichte Produkte haben zahlreiche Vorteile zu bieten; es kann mehr Prozesswasser zurückgewonnen werden, die Trocknungszeiten sind kürzer, und das Material lässt sich zum Wiedereinbau im Bergbaubetrieb nutzen.

Ein reduzierter Wasserbedarf hat mehrere wesentliche Auswirkungen auf Bergbau und Erzmühlenbetrieb. Das beginnt mit dem verminderten Bedarf an externen Wasserzulieferungen. Wo immer es möglich ist, sollte das Wasser im Kreislauf gefahren werden. Dabei lassen sich unter Umständen auch nicht genutzte Reagenzien rezyklieren (sofern diese nicht im Prozess Schaden anrichten können). Damit sind dann auch positive soziale bzw. gesellschaftliche Konsequenzen am Standort verbunden. Es gibt zahlreiche Beispiele von Bergbaubetrieben, die rezykliertes Prozesswasser nutzen. Die Anteile bewegen sich zwischen 25 und 80 % im Kreislauf gefahrenen Wassers.

Für die Entwässerung stehen neben konventionellen Verdickern und Hydrozyklonen mehrere Alternativen zur Verfügung. Dazu gehört die Anwendung elektrokinetischer Entwässerung für tonmineralreiche Erze oder Erze mit sehr hohem Feinkornanteil. Auch sollte daran gedacht werden, die Verdunstung aus Absatzteichen durch geeignete Abdeckungen zu reduzieren.

Die trockene Tailingslagerung hat sich ebenfalls zu einer Alternative entwickelt – durch den Druck von Umweltbehörden und die Öffentlichkeit gegenüber großen Absatzteichanlagen. Fortschritte bei Vakuum- und Druckfiltertechnik mit hoher Kapazität erlauben es, Tailings im nichtgesättigten Zustand zu lagern. Die filtrierten Tailings können über Laufbänder oder Lastwagen transportiert und in einer stabilen und dichten Form gestapelt werden. Dieser Prozess ist inzwischen etabliert (bis zu 20.000 Tonnen pro Tag), wie Tabelle 15.1 zeigt.

Tabelle 15.1 Einige Bergbaubetriebe, die Tailingsentwässerung anwenden (nach AMEC 2008)

Bergwerk	Raglan	La Copia	Green Creek	El Sauzal	Alamo Dorado	Pogo
Land	Kanada	Chile	AK, USA	Mexiko	Mexiko	AK, USA
Wertstoff(e)	Ni, Cu	Au	Pb, Ag, Zn, Au	Au	Ag, Au	Au
Tägliche Menge (t d <sup>-1</sup> )	2.400	16.000	2.000	5.300	4.000	2.500
Filtrations-methode	Druck	Vakuum	Druck	Vakuum	Druck	Druck
Lager-methode	Lastwagen	Förderband	Lastwagen	Lastwagen, Förderband	Lastwagen	Lastwagen

Wesentliche Fortschritte wurden dabei erzielt, Prozesswasser zurück in die Mühlen zu führen. Dabei waren wiederum staatliche Regulierung von Abflüssen sowie der Gewässerschutz ausschlaggebend. In vielen Fällen erfordert diese Kreislaufwirtschaft eine chemische Aufbereitung des Wassers, um schädliche Stoffe vor der Wiedernutzung zu entfernen. Denn Reagenzien und Zersetzungsprodukte aus der Kreislaufführung können deutlich störende Effekte auf Flotation und Laugungskeisläufe haben. Bei einigen der jüngsten Entwicklungen wurden gewisse Laugungsprozessen Behandlungsschritten unterworfen, in denen die benötigten Reagenzien (Säuren und Basen) mit einer Elektrodialyse-Einheit (EDU) oder Trennsalztechnologien regeneriert werden.

Typische Behandlungsalternativen können in fünf breite Kategorien eingeteilt werden (Van Niekerk et al. 2006; Tabelle 15.2): Säureneutralisation mit Kalk, Metallentfernung durch Fällung (z. B. als Hydroxid oder Sulfid), Entsalzung, Membrantechnologie sowie die gezielte Entfernung von spezifischen Stoffen (z. B. As, Hg, Se, Cd, Tl).

Die Membrantrennung mit Umkehrosmose ist inzwischen eine gut eingeführte Technik. Ziel ist es, die Wasserrückgewinnungsrate zu maximieren und den Anteil als saliner Lösung, die anschließend weiterbehandelt werden muss, zu minimieren. Die Niedrig-pH-Osmose ist dagegen eine neuere Entwicklung. Die folgenden fünf Prozessschritte werden hierbei für die Behandlung saurer Grubenwässer genutzt: Neutralisation mit Kalk, Enthärten und Ausfällen mit der Kristallisation von Gips, Mikro-Ultrafiltration zum Entfernen feiner Partikel, die Zugabe von Entkalkungsmitteln, um die Verschmutzung von Filtermembranen zu verhindern, sowie die Umkehrosmose.

Die bei der Umkehrosmose gebildeten salzigen Lösungen erfordern eine weitere Behandlung, um gefällte Metalle zu entfernen und zu stabilisieren, bevor das Material endgelagert werden kann. Dies erfordert chemische Prozesse, die eine Verringerung der Metallkonzentrationen auf genehmigte Werte in Endlagerqualität erreichen. Schlämme der Salzlösungen werden entweder vor Ort in kunststoffummantelten Anlagen gelagert oder an eine ge-

**Tabelle 15.2** Wasserbehandlungstechniken der Bergbauindustrie (nach Van Niekerk et al. 2006)

Neutralisation	Metallentfernung	Entsalzung	Entfernung spezifischer Stoffe
Kalk/Kalkstein Prozess	Hydroxid-Fällung	Biologische Sulfatentfernung	Zyanidzerstörung
Natriumbasierte Alkalien	Karbonat-Fällung	Membran-basierte Prozesse	Entfernung radioaktiver Nuklide
Ammoniak	Sulfid-Fällung	Ionenaustausch-Prozesse	Arsen-Entfernung
Biologische Sulfat-Entfernung	Wetland Oxidationsbecken	Elektrochemische Prozesse	Andere
Andere	Reaktive Barrieren	Andere	

nehmigte Deponie außerhalb geschickt. Diese Endlagerung kann einen erheblichen Teil der Wasserbehandlungskosten ausmachen.

Die biologische Sulfatreduktion ist eine der erfolgreichen Methoden, die zur Abwasserbehandlung entwickelt wurde. Unter reduzierenden und sauerstofffreien Bedingungen sowie in Anwesenheit organischer Nährstoffe können sulfatreduzierende Bakterien das Sulfat aus dem sauren Bergbauwasser in Sulfid umwandeln. Das dabei als Atmungsprodukt entstehende Kohlendioxid produziert Bikarbonat-Alkalinität. Dies führt zu einem Anstieg des pH-Wertes, während die Sulfide unlösliche Metallkomplexe bilden.

Weitere Möglichkeiten schließen die Nutzung von Meerwasser ein (verschiedene Mühlen haben erfolgreich und ohne schädliche Effekte mit Meerwasser gearbeitet; siehe Tabelle 15.3). Auch Abwasser konnte erfolgreich zu diesem Zweck eingesetzt werden (es gibt viele Beispiele für erfolgreiche Abwassernutzung in Mühlen). Entsalzungswasser (die Umkehrosmose wird in Australien und Chile erfolgreich eingesetzt) und die Umkehr-Elektrodialyse

(EDU) sind hier zu nennen. Letztere wird erfolgreich in Südafrika und in der Tschechischen Republik genutzt. Es ist eine Nischentechnologie, die jedoch unter bestimmten Randbedingungen leistungsstärker als die Umkehrosmose sein kann. Zudem ist die Wasserrückgewinnung mit 95 % sehr hoch, und es kann mit hohen Siliziumwerten gearbeitet werden.

Wenn es möglich wäre, Erze statt in Wasser im trockenen Zustand zu mahlen und zu verarbeiten, dann wäre das Wasserdilemma schon beinahe gelöst. Die Erzsartierung ist ein Beispiel für einen wasserfreien Prozess, doch für viele Erze würde dies typischerweise für eine Höherstufung vor dem wasserbasierten Weiterverarbeiten eingesetzt. Die trockene Vermahlung wird in einigen Betrieben eingesetzt, in denen das Erz danach geröstet wird. Es gibt Forschungsarbeiten zur Entwicklung von trockenen Dichte- und/oder Korngrößenseparatoren. Dennoch ist noch mehr Forschungsaufwand notwendig, um neue Prozesse zu entwickeln, die große Tonnagen effizient und bei vermindertem Energieaufwand verarbeiten können.

# 15

**Tabelle 15.3** Bergbaubetriebe, die Meerwasser nutzen bzw. dies erwägen (nach GWI 2011)

Firma	Operation	Kapazität (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	Typ	Status
Citic Pacific	Sino Iron Magnetite Projekt	139.726	Meerwasser-Entsalzung	In 2011 gestartet
BHP Billiton	Olympic Dam	280.000	Meerwasser-Entsalzung	Wartet auf Genehmigung
Minara Resources	Murrin Murrin	15.000	Entsalzung von Bohrlochwasser	Seit Mitte der 1990'er
BHP Billiton	Colosoa Werk bei Escondida	45.360	Meerwasser-Entsalzung	Seit 2006
++ Minerals	Michilla Mine	6.500	Direkte Meerwassernutzung für die Laugung	Seit den frühen 1990er-Jahren
Antofagasta Minerals	Esperanza	62.200	Meerwasser für die Kupferflotation	In 2011 gestartet
CAP	Cerro Negro Norte	17.280–34.560	Erwägen Entsalzung (Umkehrosmose)	Mitte 2012
Anglo American Chile	Mantoverde	10.368	Erwägen Entsalzung (Umkehrosmose)	2012
Aguas de Barcelona	Copiapo (Erweiterung)	86.400	Erwägen Entsalzung (Umkehrosmose)	2012–2013
Freeport McMoran	Candelaria (Erweiterung)	25.920	Erwägen Entsalzung (Umkehrosmose)	2012
Xstrata/Barrick	El Morro	64.000	Entsalzung	Machbarkeitsstudie
BHP Billiton	Escondida (Erweiterung)	276.480	Entsalzung	Genehmigt
Quadra FNX	Sierra Gorda	65.664	Direkte Meerwassernutzung	2013–2014

Die folgenden Schlussfolgerungen könnten abgeleitet werden: Süßwasser wird weiterhin und zunehmend eingeschränkt verfügbar sein. Dies wird zu Spannungen zwischen potenziellen Nutzern führen. Abwasser aus Bergbaubetrieben wird zunehmend härteren Umweltauflagen genügen müssen. Die entsprechende

Anpassung der Industrie wird auf die Wiedernutzung (Recycling) und die Einsparung von Wasser setzen, ebenso wie die Nutzung alternativer Quellen. Dies wird zu erhöhten Forschungsanstrengungen führen sowie zu neuen oder verbesserten Technologien zur Wasserbehandlung in Bergbau und Aufbereitung.

# 15.3 Energie

Eine weitere Sorge für die Bergbauindustrie sind die Energiekosten in Bergbau und Aufbereitung. Es können verschiedene Methoden zur Ermittlung der Energieeffizienz angewendet werden. Entsprechende Energieermittlungsverfahren sind von derselben Bedeutung wie es zuvor zum Thema Wasser vorgestellt wurde. Musa et al. (2011) diskutierten ein Energie-Audit für einen Goldabbau und zeigten, dass in diesem Fall der größte Kostenanteil auf Abbau und Transport sowie Zerkleinerung entfällt. Deshalb sind die Betriebskosten empfindlich gegenüber den Kosten für Kraftstoff und Elektrizität. Nun sind Abbau und Transport nicht Teil der hier geführten Diskussion; dennoch ist es ein Thema mit intensiver Entwicklung. In Mahlwerken können die verschiedenen Anteile der Energiekosten heruntergebrochen werden (Tabelle 15.4).

Der Hauptteil der Kosten entfällt auf das Mahlen, also die Feinzerkleinerung. Dieser Schritt ist von größter Bedeutung, weil das Erz fein genug vermahlen werden muss, um die wertvollen Bestandteile herauszulösen. Verschiedenste Studien haben ermittelt, wie ein optimiertes Sprengen die Vermahlungskosten reduzieren könnte. Ein Beispiel für einen Vermahlungszyklus ist in Abbildung 15.1 dargestellt (Musa et al. 2011).

Vier grundlegende Bereiche der Energieeff-

izienzsteuerung in Erzaufbereitungsanlagen sind zu nennen: i) Erhöhung der Energieeffizienz der Aufbereitungsanlagen; ii) Entwicklung von Ablaufplänen für neue Aufbereitungsanlagen, in denen Energiekosten (Betriebskosten) im Vergleich den Kapitalkosten (Investitionskosten) gegenübergestellt werden, indem die verschiedenen Typen der Zerkleinerungstechniken (z.B. Hochdruck-Vermahlungsrollen gegenüber SAG-Mühlen) verglichen werden; iii) Grundlagenforschung, die der Frage nachgeht, wie Veränderungen die gesamte Energiebilanz des Zerkleinerns beeinflussen (z.B. Design der Hebevorrichtungen sowie Konfiguration und andere Parameter) sowie iv) die Entwicklung vollkommen neuer Methoden zur Erzzerkleinerung.

Musa et al. (2011) diskutieren die Optimierung zur Erhöhung der Durchsatzleistung einer Anlage über die Elimination von Engpässen. Sie wiesen darauf hin, dass die folgenden Schritte notwendig sind, um die Energieeffizienz einer Zerkleinerungsanlage zu erhöhen: i) Evaluierung der Anlagen im Hinblick auf die Durchsatzleistung; ii) effektive Arbeitsstunden und Leistung der Anlage; iii) bessere Kontrolle und Auslastung im Zerkleinerungskreislauf; iv) Neukonstruktion der Anlage und veränderte Arbeitsabläufe, z.B. durch die Entfernung bestimmter Korngrößen aus dem Stoffstrom und die Integration der optimalen Beschickungsbedarfs für die Aufbereitung in die Ablaufplanung von Abbau und Sprengen.

Tabelle 15.4 Energie und Kosten für Stadien der Zerkleinerung (nach Workmann u. Eloranta 2003)

Operation	Eingangsgroße (cm)	Produktgröße (cm)	Energieeinsatz (kwh pro Tonne)	Energiekosten (US\$ p. Tonne)
Sprengstoffe	unendlich	40,0	0,24	0,087
Erstes Brechen	40,0	10,2	0,23	0,016
Zweites Brechen	10,2	1,91	0,61	0,042
Mahlen	1,81	0,0053	19,35	1,35
Gesamt			20,43	1,50



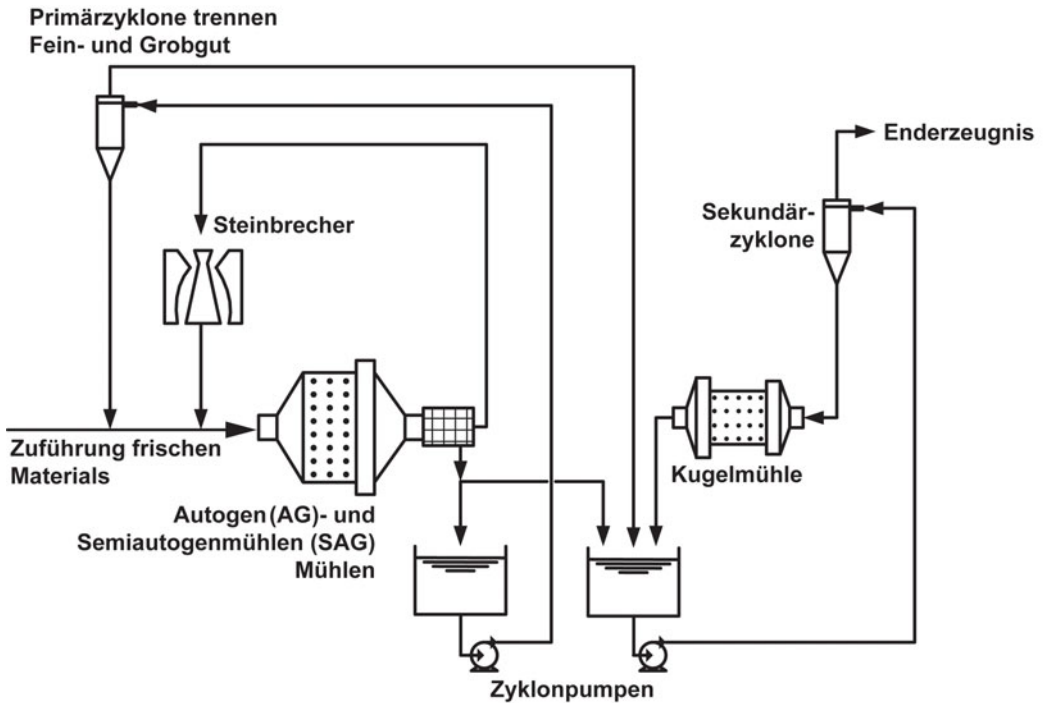


Abb. 15.1 Beispiel für einen Zerkleinerungskreislauf (übersetzt und modifiziert nach Musa et al. 2011)

Zusätzlich identifizierten die Autoren die folgenden wesentlichen Kriterien für eine Betriebsleitung: i) Eigenschaften des Erzes (Veränderungen dieser Parameter können signifikante Effekte auf die Effizienz des Verkleinerungsvorganges haben); ii) Beladung im Aufbereitungszyklus (Korngrößenverteilung bei der Erzaufgabe, Füllhöhe und Größe der Mahlkörper); iii) Belastung der Zerkleinerungsanlage (typischerweise bei 250 %; darüber ist es ineffizient); iv) Semi-Autogenmøhlen (SAG) können mit Material kritischer Größe verstopfen; v) Hydrozyklon-Leistung (schlechte Leistung ist mit schlechter Trennung gleichzusetzen); vi) Belastungsausgleich im Zerkleinerungskreislauf (Anpassung der Übergangskorngrößen zwischen den einzelnen Mahlstadien); vii) Møhlenbeladung (zu niedrig = Tonnage erhöhen) durch Kontrolle der SAG Møhlenzufuhr (Aufbau kritischer Materialgröße) mit Hochdruckwalzenmøhlen

(HPGR) oder Kegelmøhlern oder ein Schließen des SAG-Schrittes mit Hydrozyklonen; viii) Größe und Zahl der Mahlkörper (größere Mahlkörper = höherer Impact, geringere Frequenz = mehr Mahlkörper führen zu vermehrten Impacten); ix) Verminderung des Übermahlens (zu langes Vermahlen) und x) mögliche Vorkonzentration durch Vorabersortierung.

## 15.4 Modellierung

Ein breites Spektrum von Modellieranstrengungen lässt sich auf dem Gebiet der Mineral- bzw. Erzverarbeitung beobachten. Mehrere Gruppen arbeiten weltweit an Modellen für die Aufbereitungstechnik, von denen einige im Folgenden besprochen werden. Im Prinzip gibt es vier Typen von Zerkleinerungsmodellen:

1) solche, die Prozessabläufe modellieren (z. B. JK SimMet, JKMRC Commercial Division 2009, and MinOOcad, Metso 2003); 2) solche, die das Partikelbruchverhalten prognostizieren (*population balance models*); 3) solche, die Materialfluss und Verhalten in den Anlagen prognostizieren und 4) jene, die diskrete Elemente modellieren und/oder Methoden der Strömungsdynamik (CFD), um Arbeitsabläufe zu simulieren.

Verschiedene Modelle wurden zur Vorhersage des Mahlvorganges in Trommelmühlen entwickelt. Die meisten nutzen Modelle zur Populations-Bilanz mit Bruch- und Auswahl-funktionen. Manche nutzen diskrete Elemente und Vorhersagen der Impaktenergie (Größe und Häufigkeit). Der Verfasser und seine Studierenden nutzen ein Programm namens „MillSoft“ (Process Engineering Resources Inc. 2011), um Daten hochzuskalieren, die mit

kleineren Mühlen (1 m Durchmesser) gewonnen wurden. Ziel ist es dabei, die Daten aus dem Labormaßstab (1 m Durchmesser  $\times$  0,5 m Länge der Mühle) auf deutlich größere Industriemaßstäbe zu übertragen. Die Labormühle ist mit einem Drehmoment-Geber und akustischer Ausgabe ausgestattet (Abbn. 15.2–15.3). Ein Beispiel aktueller Modellergebnisse stammt von Tuszczy u. Rajamani (2011) an der Universität von Utah. Sie entwickelten Modelle, die auf der Methode diskreter Elemente (DEM) Impaktenergiespektren basieren. Diese Modelle berücksichtigen sowohl die Stärke der Kollision als auch deren Frequenz. Nicht zuletzt sind sie auch in der Lage, Partikeltrajektorien zu verfolgen. Ein weiteres Beispiel stammt aus der Arbeit von Wang et al. (2011). Auch diese Gruppe nutzt DEM und Kollisionsberechnungen sowie zusätzlich die Strömungsgeschwindigkeitsmuster, um Vermahlungsphänomene zu studieren.

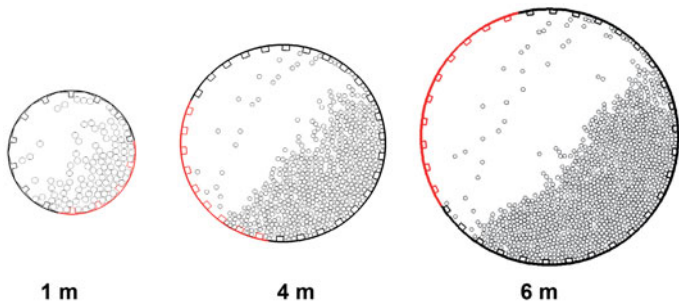


Abb. 15.2 Millsoft-Ergebnisse für die Übertragung auf andere Skalen. Ladungsbewegung in Mühlen verschiedener Durchmesser. Kugelbelastung: 35%, Geschwindigkeit: 70% kritisch

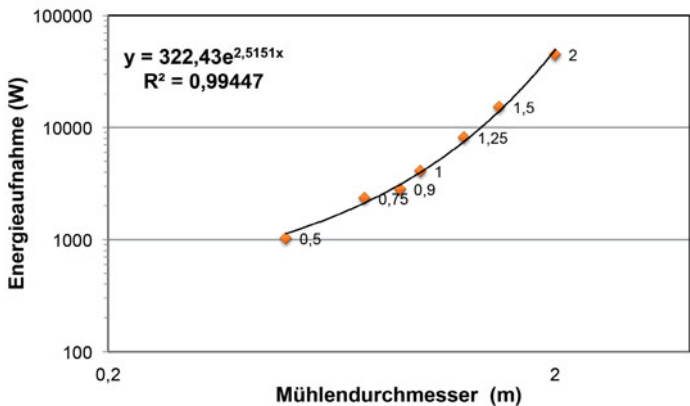


Abb. 15.3 Millsoft-Ergebnisse für eine Mühlenvergrößerung: Veränderung der Energieaufnahme mit dem Mühlendurchmesser. Beladung: 50%, Geschwindigkeit: 60% kritisch

Es hat schon viele Versuche gegeben, energieeffizientere Alternativen zur Zerkleinerung grober Feststoffe zu feinem Material zu finden (Wasserdüsen, elektrische Entladungen, rotierende und gepulste Lufteinblasungen etc.). Bis heute gibt es keine technologischen Durchbrüche, um die konventionellen Trommelmühlen für die abschließenden Zerkleinerungsschritte zu ersetzen. Es wird eines Tages diesen Durchbruch geben – bis dahin ist das eine Thema für anspruchsvolle Grundlagenforschung.

So lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen: Die hohen Betriebskosten durch Energie und den Verschleiß an Mahlkörpern und Auskleidungsmaterial müssen als Notwendigkeit akzeptiert werden. Derzeitige Anstrengungen zur Optimierung betreffen im Wesentlichen eine höhere Energieeffizienz konventioneller Mühlen durch ein besseres Verständnis des Mahlvorganges über Modellierung und Laborexperimente. Die Simulation von Arbeitsabläufen kann dabei verschiedene Alternativen vergleichen und gegenüberstellen. Diese Simulationen sind jedoch nur so gut wie die Modelle (und ihre Eingangsdaten); es wird daran gearbeitet, beide Kenngrößen zu verbessern.

## 15.5 Automatisierte Mineralogie

Es existieren verschiedene Arten „Automatisierter Mineralogie-Systeme“ (*Mineral Liberation Analyzer*, MLA; QEMSCAM®, etc.). Dabei handelt es sich normalerweise um Rasterelektronenmikroskope mit einem oder mehreren energiedispersiven Röntgenfluoreszenz-Spektrometern (EDS) zur Elementdetektion sowie einem Computer samt Datenbasis zur Mineralidentifikation. Diese Systeme funktionieren am besten, wenn erfahrene MineralogInnen dahinter sitzen um Ergebnisse zu definieren und zu interpretieren. Dieses Werkzeug ist außerordentlich hilfreich, um die Herauslösung

von Mineralen und Mineralverwachsungen in den verschiedenen Aufbereitungsstadien zu untersuchen.

Zwei Beispiele von Eisenerzen aus eigener Forschung seien hier vorgestellt. Bei beiden handelt es sich um relative Armerze mit hohen Verunreinigungen (vor allem Phosphor, P). Das Ziel war es in beiden Fällen, den Anteil des Eisens (bei akzeptablen Gewinnungsraten) zu erhöhen und den P-Gehalt zugleich zu erniedrigen. In einer ersten Studie (Abb. 15.4) erwies sich das Erz als oolithisches Eisenerz mit einer Herauslösungskorngröße unter 5 Mikrometern. Die einzige Methode, die sich für den Anspruch eignete, war eine magnetisierende Röstung, der eine Feinvermahlung und danach eine niedrig intensive Magnettrennung angeschlossen wurden (sehr teuer). In einer zweiten Studie (Abb. 15.5) ließ sich der Apatit bei 74 Mikrometern herauslösen. Dadurch konnte eine Form der Schaumaufbereitung als beste Empfehlung abgeleitet werden.

Auf diesem Gebiet wird es kontinuierliche Fortschritte geben. Dies schließt bessere Datenbanken, eine höhere Auflösung und kostengünstigere Geräte ein. Betriebe werden davon profitieren, dass dann Daten nahezu in Echtzeit über die Leistung der einzelnen Anlagen vorliegen können. Dies könnte wiederum mit online-Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie gekoppelt werden, um detaillierte Informationen zu Kontrolle und Steuerung der Anlagenprozesse zu erhalten.

## 15.6 Kritische Materialien

In den letzten Jahren gab es eine Reihe von Elementen, die durch Mangel oder andere Hindernisse als begrenzt in ihrer Verfügbarkeit erschienen (► Kap. 6). Diese lassen sich in zwei primäre Typen knapper Elemente unterteilen. Da gibt es solche, die in erster Linie ein Nebenerzeugnis der Ausbeute anderer primärer Metalle sind. Dazu gehören Rhenium (Re),

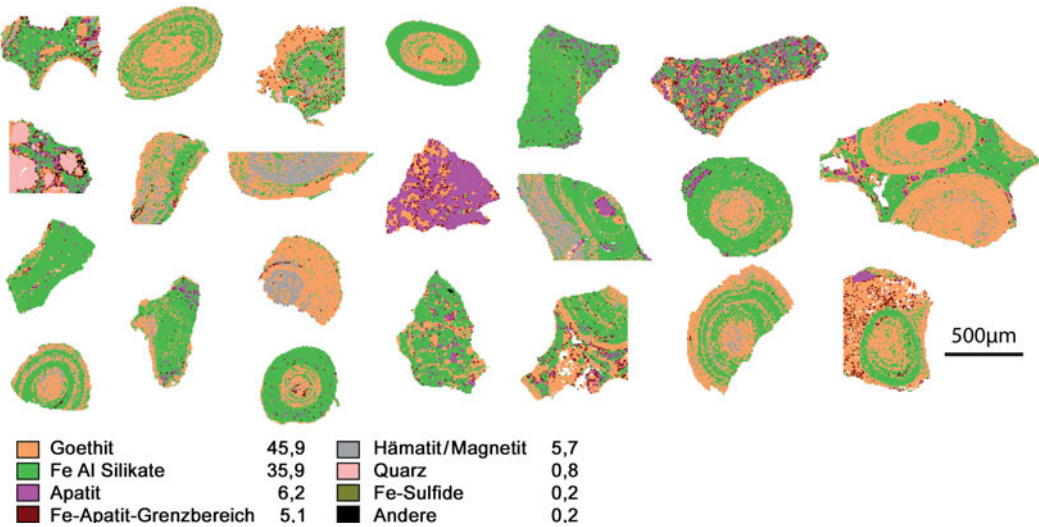


Abb. 15.4 QEMSCAN®-Ergebnisse für ein oolithisches Eisenerz. QEMSCAN Quantitative Evaluation of Minerals by SCANNing electron microscopy

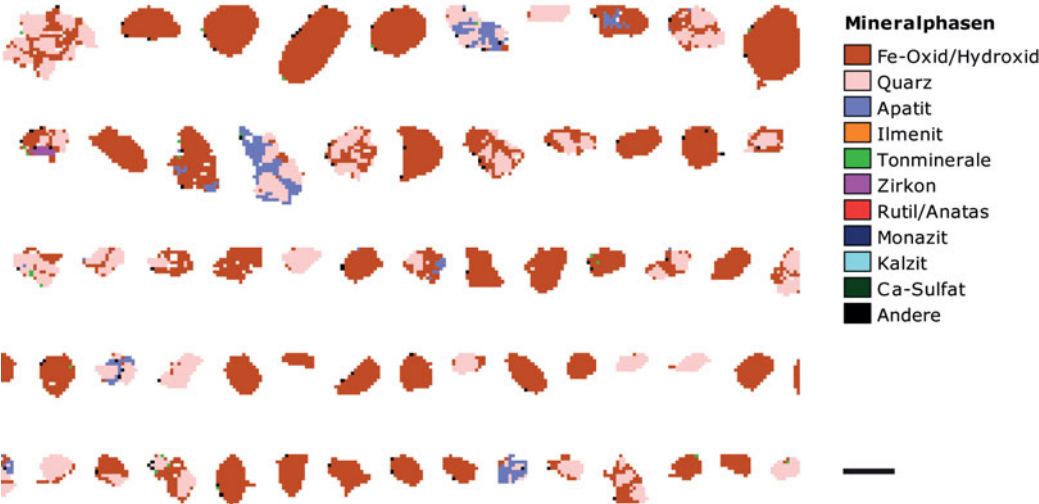


Abb. 15.5 QEMSCAN®-Ergebnisse für ein Apatit-Eisenerz. Der Maßstab entspricht 300 µm

Indium (In), Tellur (Te), Gallium (Ga), Germanium (Ge) und weitere. Und dann gibt es jene, die in eigenen Vorkommen oder auch als mineralisches Nebenprodukt erscheinen, jedoch erhebliche Anstrengungen erfordern, um wirtschaftlich gewonnen und aufbereitet zu werden. Dazu gehören die Seltenen Erden, die Platingruppenelemente, Lithium (Li) usw.

Für die erste Gruppe kann relativ wenig getan werden, mit Ausnahme einer Vergrößerung der entsprechenden primären Erzvorkommen. In einigen Fällen, z. B. für Rhenium (Re), können alternative Aufbereitungsmethoden zu höheren Gewinnungsraten führen. Ein Beispiel wäre die Druckoxidation von Molybdenitkonzentraten anstelle des üblichen Erzröstens. In jedem Fall kann die Weiterentwicklung von Recyclingtechniken dazu beitragen, den Bedarf des Marktes zu decken – sofern sich dies wirtschaftlich realisieren lässt. Die Wiederverwertung von CdTe-Paneele für die Photovoltaik sowie Plasma-Bildschirmpaneele (ITO) mögen als Beispiele dienen.

Lagerstätten mit Seltenen Erden sind nicht sonderlich selten. Doch sind Vorkommen mit wesentlichen Anreicherungen von Seltenen Erden anscheinend begrenzt verfügbar. Solche höherwertigen Erze werden sehr wahrscheinlich in dem Moment entwickelt werden, zu dem die Nachfrage auf einem hohen Niveau bleibt. Zudem sind Seltene Erden eine durchaus normale Beimischung von einigen Phosphaterzen, einigen Eisenerzen, einigen Schwermineralsanden, usw. Derartige Vorkommen werden ebenfalls genutzt werden, sofern die Nachfrage auf hohem Niveau bleibt. Dennoch bleiben problematische Aspekte wegen Verunreinigungen der Erze, für die sichere Verarbeitungs- und Endlagerlösungen gefunden werden müssen. Nicht zuletzt spielt auch bei diesen Elementen die Möglichkeit besserer Wiederverwertungsraten eine wesentliche Rolle.

In jedem Fall kristallisieren sich die folgenden Chancen heraus für die Verarbeitung dieser kritischen Materialien: 1) eine Neuevaluierung des verfügbaren Standes der Technik für Seltene Erden und andere kritische Materi-

alien und deren Verarbeitung; 2) Identifikation und Forschung zu jenen Aspekten, die verbessert werden können wie neue Aufbereitungstechniken, zu Metallgewinnung und zu Metallanreicherungsstechnologien – sowohl für Erze als auch für wiederverwertbare Materialien; 3) Ermittlung des Verhaltens problematischer (Begleit)Elemente bei der Abgabe fester und gelöster Abfallstoffe; 4) Unterstützung bei der Entwicklung von Ingenieurkompetenz, um die nötigen Forschungs-, Entwicklungs- und Produktionsaufgaben zu schultern und schließlich 5) die Beachtung der Grundregel, dass die Wirtschaftlichkeit bei jeder Ressourcenfrage die entscheidende Dominante bleibt.

## Quellenverzeichnis

- Agricola G (1556) *De Re Metallica*. 1950 Hoover Translation, Dover, New York
- AMEC Earth and Environment Inc. (2008) Rosemont Copper Company filtered dry stacks, current state of practice final report. <http://www.rosemonteis.us/documents/012312>. Letzter Zugriff: 2. April 2013
- Dunne R (2010) Water recycling and frugal water use. In: *Proceedings XXV International Mineral Processing Congress (IMPC) 2010*, S. 45–60 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne)
- GW (2011) *Water for mining*. Media Analytics, Oxford UK
- JKMRC Commercial Division (2009) JK SimMet, Queensland, Australia. <http://jktech.com.au/jksimmet>. Letzter Zugriff: 2. April 2013
- Metso (2003) MinOOcad. Colorado Springs, CO. [http://www.metso.com/miningand-construction/mm\\_grin.nsf/WebWID/WTB-041124-2256F-8807E?OpenDocument](http://www.metso.com/miningand-construction/mm_grin.nsf/WebWID/WTB-041124-2256F-8807E?OpenDocument). Letzter Zugriff: 2. April 2013
- Musa F, Stewart M, Weiss G (2011) Energy efficiency in milling – improving comminution circuit efficiency. *MetPlant 2011*, S. 154–162. (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).



- Process Engineering Resources Inc. (2011) Millsoft charge motion simulator. Salt Lake City, UT. <http://www.flsmidth.com/en-US/About+FLS-midth/Our+Product+Brands/PERI>. Letzter Zugriff: 2. April 2013
- Turcotte AA (1986) Water requirements: quantity, quality and effects of recycling. In: Mular AL, Anderson MA (eds) Design and installation of concentrate dewatering circuits. 24: 351–375
- Tuzcu ET, Rajamani RK (2011) Modeling breakage rates in mills with impact energy spectra and ultra fast load cell data. Minerals Engineering 24: 252–260
- Van Niekerk AM, Wurster A, Cohen D (2006) Technology advances in mine water treatment in Southern Africa over 20 years. Proceedings of Water in Mining, AusIMM, S. 373–378.
- Wang MH, Yang RY, Yu AB (2011) DEM investigation of energy distribution and particle breakage in tumbling ball mills. Powder Technol. 223: 83–91
- Workman L, Eloranta J (2003) The effects of blasting on crushing and grinding efficiency and energy consumption. [http://www.elorantaassoc.com/Blasteffects\\_Lyall.pdf](http://www.elorantaassoc.com/Blasteffects_Lyall.pdf). Letzter Zugriff: 2. April 2013

## Kernaussagen

- Der Beitrag vermittelt einen Überblick zu aktuellen Fortschritten auf dem Gebiet der Aufbereitung.
- Die heute verwendete Extraktionsmetallurgie wurden vor vielen Jahren entwickelt; neue Entwicklungen im gesamten Spektrum der Chemie und der Prozessführung, führten zu erheblichen Verbesserungen und Leistungssteigerungen.
- Ein besonderes Augenmerk wird auf die wesentlichen Herausforderungen auf den Teilgebieten „Wasser, Energie, Modellierung, Quantitative Mineralogie und kritische Materialien“ gerichtet.
- Chancen für Forschung und Entwicklung werden identifiziert, insbesondere im Bereich der Seltenen Erden, wie Neuevaluierung technischer Verfahren, Erkennen neuer F&E-Ansatzpunkte, insbesondere in Aufbereitung und Metallurgie, Umgang mit störenden Begleitmineralien und letztlich die Beachtung der Grundregel praxisorientierter Forschung, die Wirtschaftlichkeit nämlich.

# 16 Konsequenzen der modernen Germaniumchemie

Gerhard Roewer

## 16.1 Geschichte

Am 6. Februar 2011 jährte sich die Entdeckung des Elementes Germanium zum 125. Mal, ein Ereignis, dessen in Freiberg (Sachsen) durchaus mit einem gewissen Stolz gedacht wurde. Es war ein Chemiker der TU Bergakademie, Clemens Winkler, dem es gelang, in einer Mineralprobe von Argyrodit aus der Grube St. Michaelis eben dieses Element aufzuspüren, dessen Existenz von Mendelejew als ein Ergebnis seiner Forschungen zur Periodizität der chemischen Elemente vorausgesagt und mit dem vorläufigen Namen Eka-Silizium belegt worden war (Ackermann 1987; Haustein 2011; Abb. 16.1).

Von Freiberg aus ist in puncto Germanium aber nicht nur dieser herausragende Beleg zur wissenschaftlichen Bestätigung des Periodischen Systems der Elemente (PSE) als Grundgesetz der Chemie in die Welt gegangen. Dieses Element ist wegen seiner Halbleitereigenschaften, die 1947 in den Bell Laboratories (USA) durch J. Bardeen und W. H. Brattain und 1948/49 vom deutschen Forscher Mataré zur Entwicklung der ersten Transistoren geführt haben, auch in Freiberg (VEB Spurenmetalle Freiberg) im industriellen Maßstab produziert worden. In Freiberg allein waren es bis 1990 über 40t Germanium in Halbleiterqualität. Damit waren folgerichtig auch umfangreiche Forschungsarbeiten der Natur- und Materialwissenschaftler an der dortigen Universität verbunden.

## 16.2 Eigenschaften des Germaniums

Dieser Beitrag hat zum Ziel, unter chemischen Aspekten – mit dem Fokus auf den modernen Stand der Germaniumchemie – einige aktuelle Einsatzfelder des Germaniums zu analysieren und auf neue Möglichkeiten aufmerksam zu machen. Bei der Suche nach einem passenden



Abb. 16.1 Dmitri Mendelejew und Clemens Winkler, der Entdecker des Elementes Germanium

## 16

chemischen Konzept für die optimale Gewinnung und praktische Nutzung von Germanium und seinen Verbindungen sowie nach potenziellen „Ersatzspielern“ hilft prinzipiell ein Blick in ebenjenes PSE, zu dessen wissenschaftlichem Durchbruch die Entdeckung des Germaniums (Ge) so viel beigetragen hat. In Abb. 16.2 ist der Fokus auf den Vergleich von einigen seiner Eigenschaften mit denen der entsprechenden chemisch „artverwandten“ Elemente Kohlenstoff (C), Silizium (Si), Zinn (Sn) und Blei (Pb) gelegt (4. bzw. 14. Gruppe des PSE).

Germanium kommt in der uns zugänglichen Erdkruste nur mit dem sehr geringen Anteil von  $1,5 \cdot 10^{-4}$  Massen-% vor (53. Stelle) – ca. 175.000 Mal weniger als Silizium, das zweithäufigste Element auf unserem Planeten. Es hat wie C und Si sowie Sn bei tiefen Temperaturen eine Diamant-Festkörperstruktur und – darauf basierend – Halbleiterqualitäten. Seine stabilsten Verbindungen, damit auch die natürlich vorkommenden, enthalten das Element in der Oxidationszahl (OZ) +4. Verbindungen

mit Germanium in niedrigeren Oxidationszahlen (+2, +1, 0) sind daraus chemisch über Reduktionsprozesse zugänglich. Die Neigung zum OZ-Wechsel  $+4 \rightarrow +2$  (unter Kreation eines „einsamen“ Elektronenpaars) ist beim Ge deutlich größer als beim Si. Die Reduktion von Ge(IV) zu Ge(II) gelingt auch mit elementarem Germanium (vgl. Abb. 16.2, rechts); sie hat anwendungstechnische Relevanz.

Analog zur Stabilität der OZ +4 vermindert sich die Säureeigenschaft des Dioxids beim Übergang vom Si zum Ge, wodurch z.B. die Triebkraft zur Hydrolyse von  $\text{GeX}_4$ -Verbindungen ( $\text{X} = \text{Halogenid, Alkoxid}$ ) deutlich geringer ist als jene ihrer Si-Analoga. Die Löslichkeit des Germaniumdioxids ( $\text{GeO}_2$ ) in Säuren und Wasser ist größer als die von  $\text{SiO}_2$ . Damit im Zusammenhang ist die Neigung zur Komplexbildung mit zahlreichen Lewis-Basen unter Überschreitung der Bindungswertigkeit vier ausgeprägt. Der Koordinationszahlwechsel ( $\text{KZ} \geq 4$ ) ist steuerbar durch die Auswahl der relevanten Liganden und Bedingungen für die Synthese des jeweiligen Targetkomplexes.

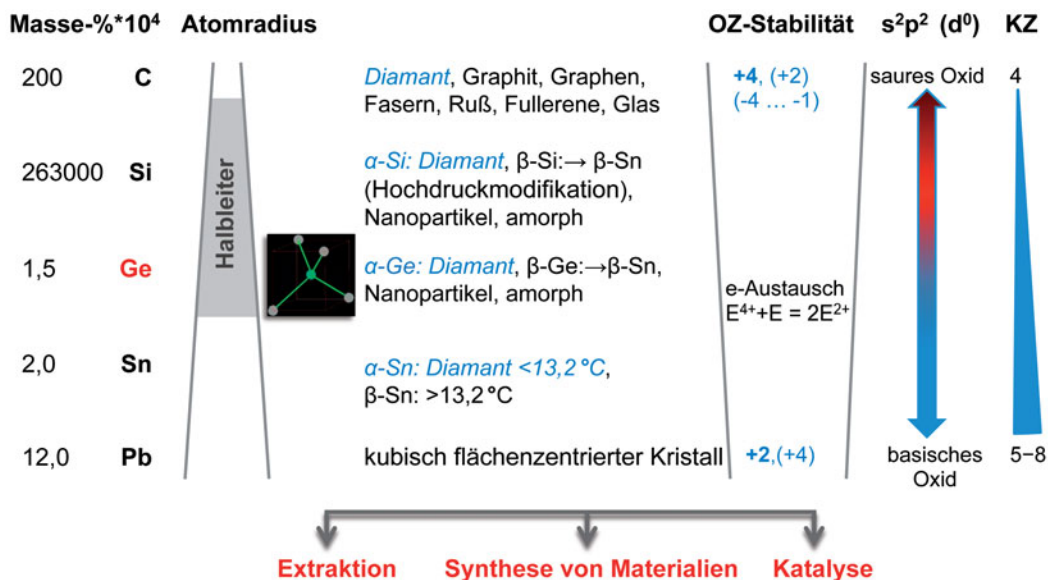


Abb. 16.2 Chemische Verwandtschaft in der Gruppe 14 des Periodensystems der Elemente. OZ Oxidationszahl; s<sup>2</sup>p<sup>2</sup>(d<sup>0</sup>) Valenzelektronen; KZ Koordinationszahl

## 16.3 Verwendung von Germanium

Gemessen am relativ niedrigen globalen geologischen Vorkommen von Germanium gibt es eine große Nachfrage nach diesem Element und seinen Verbindungen für die schon etablierten aktuellen Einsatzfelder (Abb. 16.3). Diese lassen sich etwas salopp mit dem Slogan „*Germanium leitet, lenkt und bringt Licht ins Dunkel*“ umschreiben.

Germanium verdankt seine Nützlichkeit mindestens vier hervorstechenden Eigenschaften:

- Es ist ein intrinsischer elektrischer Leiter – selbst im reinen Zustand –, wenn auch ein schlechter.
- Im kristallinen und im glasigen Zustand ist es für eine gewisse Spektralregion der Infrarotstrahlung (IR) transparent.
- Sein Dioxid ist ein Glasbildner, ähnlich dem Siliziumdioxid.
- Germanium hat einen ausnehmend hohen optischen Brechungsindex und zeigt nur eine geringe chromatische Dispersion.

Diese Eigenschaften – manchmal auch in gewissen Kombinationen – bestimmen die Nützlichkeit von Germanium in elektronischen Bauelementen, Solarmodulen, Nachtsichtgeräten, optischen Linsensystemen und Lichtwel-

lenleitern. Ein spezifischer Einsatz, der aktuell noch eine hohe kommerzieller Bedeutung besitzt, beruht auf der Eignung von  $\text{GeO}_2$  oder Ge-Oxokomplexen als Katalysatoren für die Polykondensation von Glykol mit Terephthalsäure zu farblosem, optisch transparentem Polyester material (Polyethylenterephthalat, PET).

Das Feld Halbleitertechnik hatte trotz der weitgehenden Substitution des einkristallinen, hochreinen Germaniummaterials durch Silizium und Galliumarsenid im Jahr 2011 noch einen Anteil von 15% am globalen Germaniumverbrauch, wird aber in puncto Ge-Einsatzmenge übertrumpft von den Kapazitäten für Lichtwellenleiter, IR-Optikmaterialien und für Katalysatorsysteme, insbesondere beim PET-Syntheseprozess. Die restlichen Anwendungsfelder (hauptsächlich Leuchtstoffe, Metallurgie, Chemotherapie) machen nur etwa 5% des Verbrauchs aus (Angerer et al. 2009; Erdmann et al. 2011).

In Abb. 16.4 sind aktuelle Materialbeispiele für das Element sowie für in der Praxis interessante Elementkombinationen mit Germanium (intermetallische, oxidische und nitridische Systeme), ihre Morphologie (Kristall, Nanopartikel, Dünnschicht oder Glas) und die relevanten Syntheseeingangswege angeführt. Molekulare Ge-Komplexe sind wichtige Komponenten für die Gewinnung bzw. das Recycling, für die Syntheserouten zu Nanostrukturen, aber auch direkt als Bestandteile

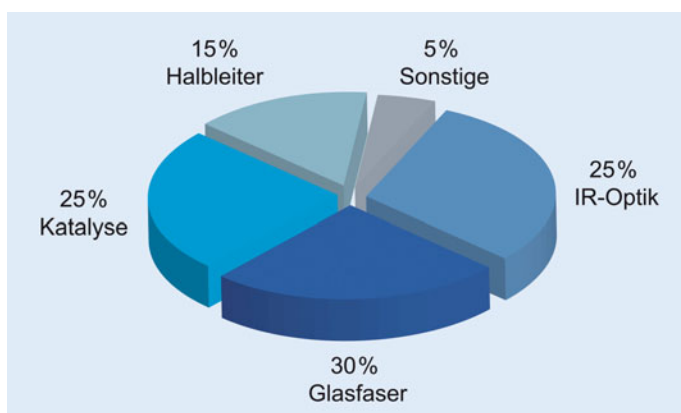


Abb. 16.3 Aktuelle Anwendung von Germanium weltweit

von Katalysatorsystemen im Einsatz bzw. im Gespräch.

Für Germaniumnitrid ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -) kursieren bereits potenzielle Anwendungsmöglichkeiten:

- Elektrodenmaterial,
- Katalysatorkomponente für die photolytische Wasserspaltung,
- Passivierungsschicht,
- Optoelektronikmaterial,
- Material für MOS-Dielektrika (MOS = *Metal Oxide Semiconductor*).

Bisher wird Ge – wie in Abb. 16.4 demonstriert – überwiegend für Zukunftstechnologien im Sinne von Spitzentechnologien eingesetzt. Es wird vor allem für nachrichtentechnische Geräte und Einrichtungen sowie für Mess-, Kontroll-, Navigations- und ähnliche Instrumente benötigt. Sind für Germaniumverbindungen – ausgehend vom aktuellen Kenntnisstand zur Synthese und zu den Struktur-/Eigenschaftsbeziehungen – noch weitere zukünftige Anwendungsfelder identifizierbar? Bevor diese Frage beantwortet wird, zunächst ein Schwenk zur

Versorgungslage und zum Preisniveau von Germanium, die ja auch generelle Limits für jegliche Anwendungen solcher Materialien setzen.

Ausgehend von den Kapazitäten der aktuellen Ge-Einsatzgebiete und deren erwarteter zukünftiger Entwicklung bis 2030, ergibt sich prognostisch für das Germanium ein hohes globales Versorgungsrisiko, das nur von dem für Seltenerd(SEM)- und Platingruppenmetalle (PGM) übertroffen wird. Signifikanten Anteil an dieser misslichen Situation hat auch die starke Konzentration der Lieferanten auf wenige Länder, insbesondere die Volksrepublik China (Angerer et al. 2009; Raw Materials Supply Group 2010). Das hat zu einer engen Versorgungslage und zu einem hohen Preisniveau geführt. 2010 lag der Durchschnittspreis nahe 950 US\$ pro kg Germanium. Die Preisentwicklungen von hochreinem (*zone-refined*) Ge und GeO<sub>2</sub>-Elektronik-Qualität (*electronic-grade*) verlaufen fast parallel. Die Nachfrage wird stärker als das Angebot wachsen. Aus diesem Risiko- und Preisszenario ergibt sich als Konsequenz die Notwendigkeit

Material	Morphologie	Synthese
<b>Ge</b>	Einkristall, Wafer poröse Festkörper, Dünnschicht Nanopartikel Nanostruktur (ultralang): Drähte, Röhren	Reduktion von GeCl <sub>4</sub> Kristallzüchtung CVD von GeH <sub>4</sub> ... Ge/Sb- u. Ge/C-CVD core/shell-Synthese
<b>M<sub>x</sub>Ge</b> (M=Li...Ti, La, Gd)	Kristall	Reaktion in Schmelzen
<b>SiGe<sub>x</sub> (SnGe<sub>x</sub>)</b>	Wafer, Dünnschicht, Nanopartikel	Kristallzüchtung, CVD
<b>GeO<sub>2</sub>, Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub></b>	Kristall, Glas, Faser	CVD, <i>melt-flux-grown</i> (Flussmittelzüchtung)
<b>MO/M'O/GeO<sub>2</sub></b>	Kristall, Dünnschicht	Schmelze, hydrothermal, CVD
<b>Ge<sub>3</sub>N<sub>4</sub></b>	Kristall, Dünnschicht	chemische Synthese, Hochdruck, CVD
<b>MO<sub>2</sub>-M'<sub>3</sub>N<sub>4</sub></b> (M, M'=Ge, Si)	Dünnschicht	Plasma-Synthese, CVD
<b>Ge-Komplexe:</b>	Moleküle	<b>chemische Synthesen</b>
<b>Ge(IV)</b>	<b>Strukturanalyse</b>	Ge-Produktion/Recycling
<b>Ge(II)</b>	<b>Eigenschaftsanalyse</b>	Katalyse Vorläufersubstanzen für Nano-Ge

Zukunftstechnologien

Abb. 16.4 Materialchemie von Germanium und etablierte Anwendungsfelder. CVD chemische Gasphasenabscheidung, eine Methode zur Erzeugung dünner Schichten



einer Prüfung auf Volumina zum Sparen, Recyceln und eventuellen Ersetzen von Ge-haltigen Materialien – allerdings im Einklang mit dem Blick auf die Identifizierung neuer, sich zusätzlich zu den aktuellen Anwendungen auftuenden Zukunftstechnologien. Nehmen wir dazu zunächst die Quellen und Prozesse der gegenwärtigen Ge-Produktion in den Fokus und analysieren ihre Bedingungen und Entwicklungstendenzen.

### 16.4 Rohstoffchemie des Germaniums

Für die Ge-Rohstoffgewinnung gibt es indes nur ganz wenige abbauwürdige Lagerstätten, die diese Minerale enthalten. Der Ionenradius des  $\text{Ge}^{4+}$

unterscheidet sich nur relativ wenig von dem des  $\text{Si}^{4+}$ . Das führt zu einer Anreicherung von Ge in einigen Silikatphasen (0,0004–0,005 %). Die Affinität des Germaniums zu Schwefel (S) resultiert auch in Ge-Anreicherungen in hydrothermalen sulfidischen Phasen. Wegen der nahezu gleichen Ionenradien von  $\text{Ge}^{4+}$  und  $\text{Zn}^{2+}$  kommt es auch zu einer Ge-Akkumulation in den Zinkblende-Erzen (<0,01 %) sowie in der sulfidischen Phase im Enargit ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) (<0,03 %). Im Kristallgitter solcher Minerale ersetzt Germanium partiell Arsen (As), Gallium (Ga), Silizium (Si), Zinn (Sn), Zink (Zn) und weitere Elemente. Schließlich verbergen sich größere Ge-Anteile auch in metallhaltigen Kohlevorkommen und reichern sich in deren Asche an (0,005–0,1 %), aus welcher das Ge auch produziert werden kann. Bekannte Ge-Minerale sind in Tabelle 16.1 aufgeführt.

Tabelle 16.1 Germaniumminerale

Name	Zusammensetzung	Ge-Gehalt	Bemerkungen
Argyrodit	$\text{Ag}_8\text{GeS}_6$	6 %	Das von Winkler analysierte Mineral, das zur Entdeckung von Ge führte
Germanit	$\text{Cu}_{13}\text{Fe}_2\text{Ge}_2\text{S}_{16}$	6 %	Sehr seltenes Mineral. Es kristallisiert im kubischen Kristallsystem und ist ein Kupfer-Eisen-Germanium-Sulfid. Bildet sich in primären Kupfer-Blei-Zink-Erzen
Renierit	$(\text{Cu,Zn})_{11}\text{Fe}_4(\text{Ge,As})_2\text{S}_{16}$	6 %	Relativ seltenes Mineral. Es kristallisiert im tetragonalen Kristallsystem und entwickelt meist massige Aggregate. Wird durch hydrothermale Vorgänge in Ge-haltigen Lagerstätten gebildet
Ultralazit	$\text{Ag}_{22}\text{Pb}_{26}\text{Ge}_3\text{Sb}_4\text{S}_{46}$	2 %	Ein sehr seltener Ge-haltiger Diaphorit aus der Grube Himmelsfürst im Revier Freiberg (Sachsen)
Stottit	$\text{FeGe}(\text{OH})_6$	31,5 %	In der Tsumeb-Mine (Namibia) im oberen Teil der partiell oxidierten Metallsulfid-Schichten sekundär hydrothermal gebildetes Mineral (Einlagerung in einer Ge-reichen Erzformation aus Karbonaten und Oxiden)

16

Aktuell wird Germanium aber vorrangig aus Zinkerzen gewonnen (in geringerem Umfang auch aus Kupfererzen), meist aus Zinkblende (Sphalerit,  $\text{ZnS}$ ), die aber prinzipiell keine hohe Ge-Anreicherung beinhaltet. Seine Anreicherung zu Konzentraten daraus ist relativ aufwendig, sodass festgehalten werden muss, dass die Ge-Erzeugung generell ein Nebenproduktgewinnungsprozess ist.

Zn-Lagerstätten, die den für Ge zu betreibenden Aufwand lohnen, befinden sich vornehmlich in der Volksrepublik China, in Namibia, in der Demokratischen Republik Kongo, in Russland, Kanada und in den USA. In Anbetracht der Tatsache, dass Germanium hauptsächlich als ein Nebenprodukt der Bergwerksproduktion von Zink gewonnen wird,

kann sein Preis auch signifikant durch die Zn-Produktion beeinflusst werden.

Der Produktionsprozess startet mit der Herstellung von „Ge-Konzentrat“. Ein instruktives Fließschema ist im linken Teil von Abbildung 16.5 angegeben (Scoyer et al. 2002). In Abhängigkeit von der Art des zu verarbeitenden Rohstoffs und der gewählten Technologie werden pyrometallurgische Prozessschritte (basierend auf der Flüchtigkeit von  $\text{GeO}$  und  $\text{GeS}$ ) und/oder hydrometallurgische (basierend auf der Ausfällung des Ge als sein Sulfid, Hydroxid) sowie die Komplexbildung mit chelatisierenden Liganden genutzt. Das beim Röstprozess ( $1.200^\circ\text{C}$ ) mitentstehende  $\text{GeO}$  sublimiert mit anderen Metalloxiden ab. Es wird aus den resultierenden Flugstäuben (Rauchgas)

#### BBU-Prozess:

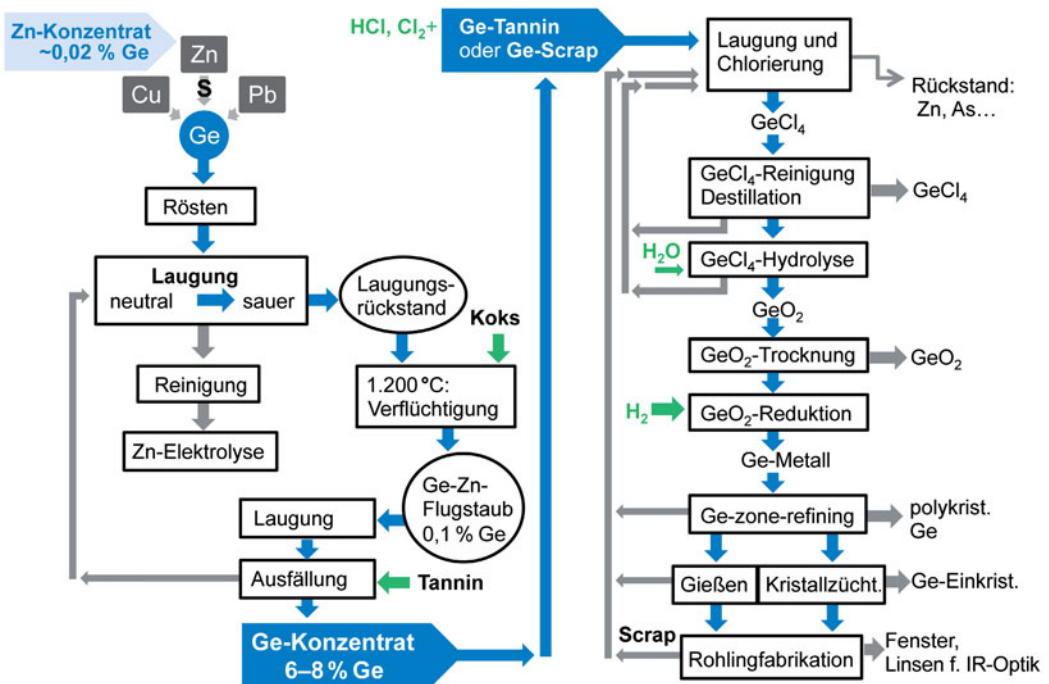


Abb. 16.5 Germanium-Produktion aus Zn/Cu/Pb-Erzen. BBU Bleiberg Bergwerks Union (eine bergbauliche Organisation im Süden Österreichs, die Blei und Zink aus Untertagebergwerken gefördert hat)

stufenweise ausgelaugt. Dann werden die  $\text{Ge}^{4+}$ -Ionen mit potenziellen Chelatliganden zu Komplexen umgesetzt, die entweder mit relevanten Lösungsmitteln extrahiert oder ausgefällt werden können, z. B. mit Tannin als sog. Tannin-Kuchen. Die Ge-Fixierung mit Tannin ergibt allerdings ein relativ Ge-armes Konzentrat. Im Konzentrat-Produktionsprozess der Fa. Aurubis in Olen (Belgien) wird der Ge-haltige Feststoff gelaugt und das Germanium aus dem Extrakt durch Lösungsmittlextraktion separiert. Nach dessen Elution in alkalischem Medium wird schließlich durch Hydrolyse das Ge-Konzentrat ausgefällt. Somit ermöglicht die Lösungsmittlextraktionstechnologie die Produktion eines sehr Ge-reichen Konzentrats, unabhängig von der Ge-Konzentration im Ausgangsstoff (Scoyer et al. 2002). In der ehemaligen DDR ist aus den Flugstäuben der Bleihütte Hettstedt (600 g Ge/t = 0,06 %) durch Laugung und Tannin-Fällung in der Nickelhütte Aue ein Konzentrat (1–2 % Ge) gewonnen worden, das schließlich die Ge-Produktion und -Einkristallzüchtung in Freiberg gespeist hat.

Die rechte Seite der Abbildung 16.5 vermittelt ein generelles Prozessschema, das sich an die Route der Ge-Produktion in der Fa. Metallurgy Hoboken-Overgelt (MHO) in Belgien anlehnt (und prinzipiell auch für das Ge-Recycling gilt). Bei der Erzeugung der Zwischenstufe  $\text{GeCl}_4$  ist gewöhnlich noch eine Chlorierung zur Oxidation und Abtrennung des Arsens notwendig.  $\text{AsCl}_3$  ist flüchtig und kann durch Reaktion mit Chlor ( $\text{Cl}_2$ ) in  $\text{AsCl}_5$  überführt werden, das nach Reaktion mit Wasser Arsensäure ( $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ) ergibt, die abgetrennt werden kann. Das  $\text{GeCl}_4$  muss sodann zu seiner Reinigung einer mehrstufigen Destillation unterworfen werden, bevor durch Hydrolyse in hochreinem Wasser und thermische Behandlung des abfiltrierten Niederschlages im Vakuum Germaniumdioxid ( $\text{GeO}_2$ ) erhalten wird. Hieraus wird schließlich durch chemische Reduktion mit Wasserstoff elementares Germanium gewonnen. Dieses kann zu seiner Feinreinigung auch den für Silizium bekannten Raffinations- und Hochreinigungsprozeduren

unterworfen werden, um die für den jeweils avisierten Einsatz geforderte Reinheit zu erzielen. Nach einem ähnlichen Algorithmus lief auch der Ge-Produktionsprozess in Freiberg ab.

Die Bergwerksproduktion von Germanium hat sich in den letzten zehn Jahren fast verdreifacht. Zwei Drittel der global neu produzierten Ge-Menge (d. h. 80 von 130 t) entstammten 2010 der Förderung in China, ca. 40 t aus Kanada (Nebenprodukt bei der Verarbeitung sulfidischer Erze) und nur noch 5 t aus den USA (neben Finnland, Russland als Produzenten). In China (zwei Werke), Russland (ein Werk) wird außerdem Germanium aus Kohle-Flugasche bzw. direkt aus Braunkohle produziert, in der Demokratischen Republik Kongo (Lubumbashi) in geringem Umfang aus Schlacke (Angerer et al. 2009; Erdmann et al. 2011). Detaillierte Angaben zu den Ge-Gehalten der in Deutschland produzierten Kohlen- und Kraftwerksaschen fehlen leider noch. Nahe Delitzsch in Sachsen existiert aber eine Mineraldienstleistung für bis zu 52.000 t Wolfram, 2.600 Molybdän und 360 t Germanium. Sie wird gegenwärtig durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) auf ihre Abbauwürdigkeit geprüft (Erdmann et al. 2011).

- Die Bedeutung und Verantwortung der Chemie für die zukünftige Entwicklung unserer Gesellschaft in der Konfrontation mit den Herausforderungen zur effizienten Nutzung der Energie- und Rohstoffreserven sowie der Forderung nach ökologischer Nachhaltigkeit steigen stark. Ohne die aktive Einbeziehung der Chemie lassen sich keine zukunftsträchtigen Lösungen für den ressourcenschonenden Einsatz von Rohstoffen und Materialien finden.

# 16

## 16.5 Die Chemie des Germaniums

Eine besondere Bedeutung in der Ge-Gewinnung, -verarbeitung und -nutzung kommt der modernen Chemie zu. Die verfügbare Palette an Ge-Verbindungen mit anwendungstechnisch interessanten Elementkombinationen und Reaktivitätsmustern ist in den letzten 20 Jahren stark angewachsen. Links oben in Abbildung 16.6 sind Verbindungsklassen aufgeführt, aus denen schon Vertreter Eingang in die technische Nutzung gefunden haben. Es gibt einen umfangreichen Zuwachs an neuen Komplexverbindungen, die prinzipiell als Komponenten für die Ge-Extraktion (Ge-Kon-

zentratproduktion und -rückgewinnung) und als Materialpräkursoren (Vorläufersubstanzen) interessant sind.

### Chemie des niedervalenten Germaniums

Ein großer Fortschritt hat sich auch in der Synthese von Verbindungen mit niedervalentem Germanium vollzogen. Die Existenz von Verbindungsmustern mit Ge(II) ist ja – ausgehend von der Elektronenkonfiguration des Ge-Atoms – prinzipiell plausibel. Germanium(II)-Verbindungen lassen sich durch Lewis-Basen auch leicht ionisieren und damit noch variabler einsetzen (Singh et al. 2012). Oben rechts in

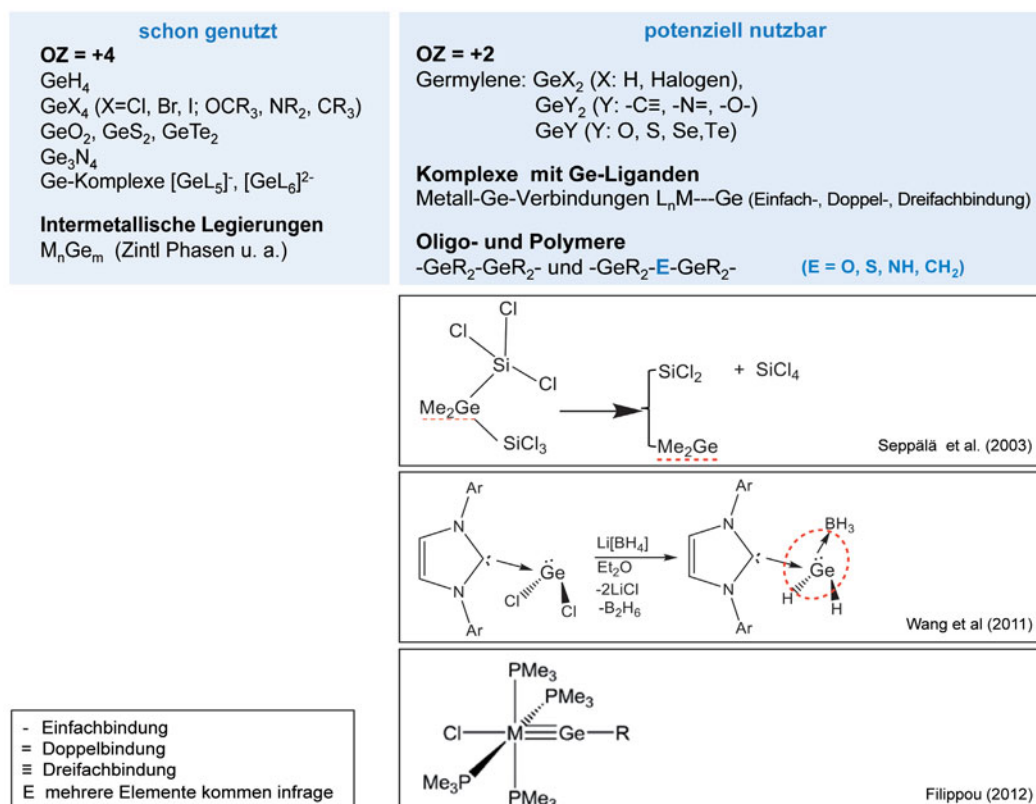


Abb. 16.6 Relevanz der Germaniumchemie – Potenzial von Ge-Verbindungen  $\text{Ge} [\text{Ar}] 3d^{10}4s^2p^2$ . OZ Oxidationszahl; *Zintl-Phasen* Metalllegierungstyp; *L* einzähniger Ligand

Abb. 16.6 ist eine Molekülverbindung gezeigt, durch deren induzierten Zerfall ein Germylene und ein Silylen simultan zugänglich sind. Germylene – und auch ihre Addukte mit den C-Analoga (Carbene) – sind hochreaktive Spezies (Seppälä et al. 2003; du Mont et al. 2004). Die mittlere Gleichung rechts demonstriert das Prinzip der Donor-/Akzeptor-Stabilisierung von Germylenen. Als Donor fungiert hier NHC, ein N-heterocyclisches Carben, als Akzeptor  $\text{BH}_3$  (Inoue u. Driess 2011; Katir et al. 2011; Nagerdran u. Roesky 2008; Jana et al. 2009a, b; Mandal u. Roesky 2012). Somit ist neuerdings auch die Chemie des schwer fassbaren  $\text{GeH}_2$  über diesen Synthesetrick zugänglich. Durch NHC lassen sich sogar Ge-Moleküle mit Ge=Ge-Doppelbindung stabilisieren. Moleküle mit Übergangsmetall-Germanium-Bindungen (Ein- bis Dreifachbindung) sind in den Kategorien stabil bis hochreaktiv designbar (Filippou et al. 2012).

N-heterocyclische Carbene (NHC) erwiesen sich als Schlüssel zur Erforschung der Chemie der subvalenten Verbindungen der Gruppen 13–15 des PSE. Schweratomige Analoga der Gruppen 13 und 14 wie etwa Gallylene ( $\text{NHGa}$ ), Silylene ( $\text{NHSi}$ ) oder Germylene ( $\text{NHGe}$ ) erweiterten nun das Arsenal der vielseitigen Lewis-Base-Liganden, mit denen reaktive Spezies und ungewöhnliche Bindungsverhältnisse stabilisiert werden können. Die eng verwandten Spezies  $\text{E}_2\text{L}_2$  (z. B. „ $\text{Ge}_2$ “, „ $\text{P}_2$ “, „ $\text{As}_2$ “) sind Meilensteine der jüngeren Zeit.

Die Reduktion von  $\text{GeCl}_2$  mit  $\text{Ga}(\text{DDP})/\text{KC}_8$  ( $\text{DDP} = \text{HC}(\text{CMeNC}_6\text{H}_3-2,6\text{-iPr}_2)_2$ ) liefert zwei interessante Reaktionsprodukte:

- ▶  $\text{Ge}_2[\text{Ga}(\text{DDP})]_2$  und
- ▶  $\text{Ge}_4[\text{Ga}(\text{DDP})]_2$ .

Die erstgenannte Verbindung weist einen planaren viergliedrigen  $\text{Ge}_2\text{Ga}_2$ -Ring mit den beiden  $\text{NHGa}$ -Liganden in einer Brückenstellung auf. Das bildet einen interessanten Gegensatz zu den in Ketten angeordneten verwandten Verbindungen  $(\text{DDP})\text{Ge}=\text{Ge}(\text{DDP})$  mit endständigen NHC-Liganden. Die Struktur der zweiten leitet sich von einem  $\text{Ge}_4$ -Tetraeder ab, in dem je ein  $\text{Ga}(\text{DDP})$ -Ligand an zwei gegenüberliegende Ge-Ge-Kanten koordiniert. Die-

ses Strukturmotiv ist für ligandenstabilisierte Halbmetallcluster  $\text{Ge}_n\text{R}_m$  ( $n > m$ ; R=sperriges Aryl, Silylamide usw.) bisher unbekannt (Doddi et al. 2013).

Materialwissenschaftlich interessant sind auch oligomere und polymere Organogermene, die sich leicht mit Organosilizium-Einheiten systematisch verknüpfen lassen. Dies gilt ebenso für Organogermoxane – Analoga der industriell umfangreich etablierten Silikone mit z. B. lumineszierenden Eigenschaften. Komplexstabilisierte NH-Germylene sowie Verbindungen mit  $\text{Ge}(\text{OH})_n$ -Gruppierungen ( $n = 1, 2$ ) sind potenzielle Präkursoren für neue heterobimetallische Materialien mit  $\text{Ge}(\text{II})$ -O-M-Einheiten ( $M = \text{Metall}$ ). Inzwischen sind aber auch  $\text{Ge}(\text{I})$ - und  $\text{Ge}(0)$ -Verbindungen, die vielfältige Elementkombinationen enthalten, synthetisiert worden – auch mit Mehrfachbindungen zwischen Ge-Atomen und zu Atomen anderer Elemente.

Praxisrelevante Einsatzchancen für schon bekannte hochreaktive  $\text{Ge}(\text{I})$ - und  $\text{Ge}(0)$ -Verbindungen deuten sich für die Katalyse an.

## Chemie des vierwertigen Germaniums

Germaniumdioxid ( $\text{GeO}_2$ ) ist nicht nur als Zwischenprodukt der Produktion von reinem Germanium gefragt, sondern auch eine angewandte Material- und Katalysatorkomponente. In seinem Dioxid ist das  $\text{Ge}^{4+}$ -Ion im Temperaturbereich unterhalb  $1.033^\circ\text{C}$  von sechs Oxidionen umgeben (Rutil-Typ-Struktur; Abb. 16.7). Die Kristallstruktur des  $\text{GeO}_2$  unterscheidet sich demnach deutlich von der des  $\text{SiO}_2$ , welches z. B. eine tetraedrische Koordinationssphäre des  $\text{Si}^{4+}$ -Ions in der Quarz-Struktur aufweist. Unter hohem Druck sind die  $\alpha$ - und  $\beta$ -Quarz-typ-Modifikationen des  $\text{GeO}_2$  metastabil. Jedoch bewirkt bereits eine partielle Substitution von  $\text{Ge}^{4+}$  durch  $\text{Si}^{4+}$  auf niedrigem Konzentrationsniveau einen Wechsel der  $\text{GeO}_2$ -Rutil- in die  $\alpha$ -Quarz-Kristallstruktur. Das ermöglicht ein Design von piezoelektrischen Materialien  $\text{Ge}_{1-x}\text{O}_2 \cdot \text{Si}_x\text{O}_2$  ( $x = 0,038 - 0,089$ ) mit einer



$\alpha$ -Quarz-Kristallstruktur (Lignie et al. 2011). Die relativ einfache Materialsynthese gelingt in diesem Fall durch die moderne, sog. *Flux-grown*-Technik (Flussmittelzüchtung) in niedrigschmelzenden oxidischen Flussmitteln (Bugaris u. zur Loye 2012). Als Resultat von ihrem Anwendungsprinzip sind noch mehr neue Materialien mit quaternären und höheren Oxiden zu erwarten. Bisher sind auf diese Weise – wie in der neuesten Publikation von Bugaris und zur Loye aufgeführt – schon 20 neue Ge-haltige Verbindungen synthetisiert worden (Bugaris u. zur Loye 2012).

Mit der CVD-Technik (*Chemical Vapour Deposition*, dt.: Chemische Abscheidung aus

der Gasphase) gelingt die Synthese von Mischoxiden  $\text{GeO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ , die eine neue tubuläre Struktur mit Mikroröhren exakter Form und Größe besitzen. Die Oxide  $\text{In}_2\text{O}_3$  und  $\text{GeO}_2$  werden zeitgleich auf Kohlenstoff-Nanoröhren aufgedampft, wobei  $\text{In}_2\text{Ge}_2\text{O}_7$ -Röhren mit einem solchen Durchmesser resultieren, dessen Größe nahezu der mittleren freien Weglänge von Photonen entspricht. Das sind prinzipiell günstige Voraussetzungen für den Einsatz dieser Materialien zur Lichtwellenleitung und für Mikrolaserentwicklungen (Zhan et al. 2006).

### Polyoxo- und Polysulfido-Verbindungen des Germaniums

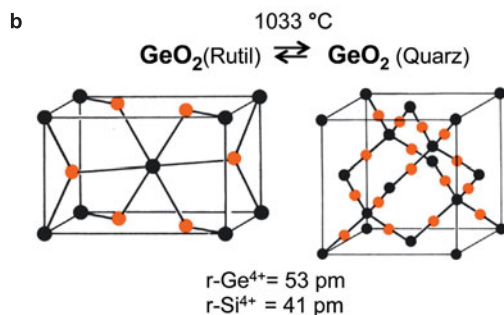
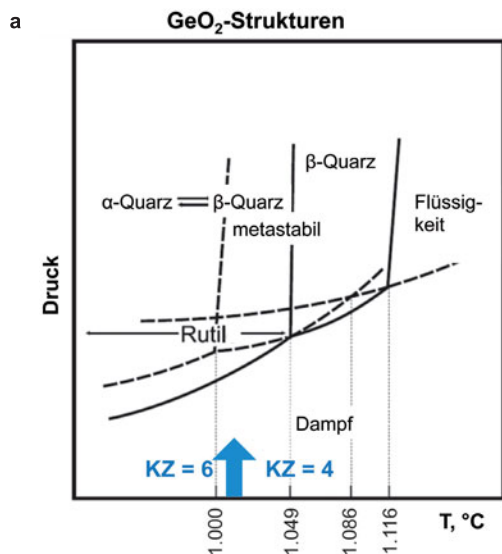


Abb. 16.7a–b Germaniumdioxid: Ge-Koordinationszahl (KZ)

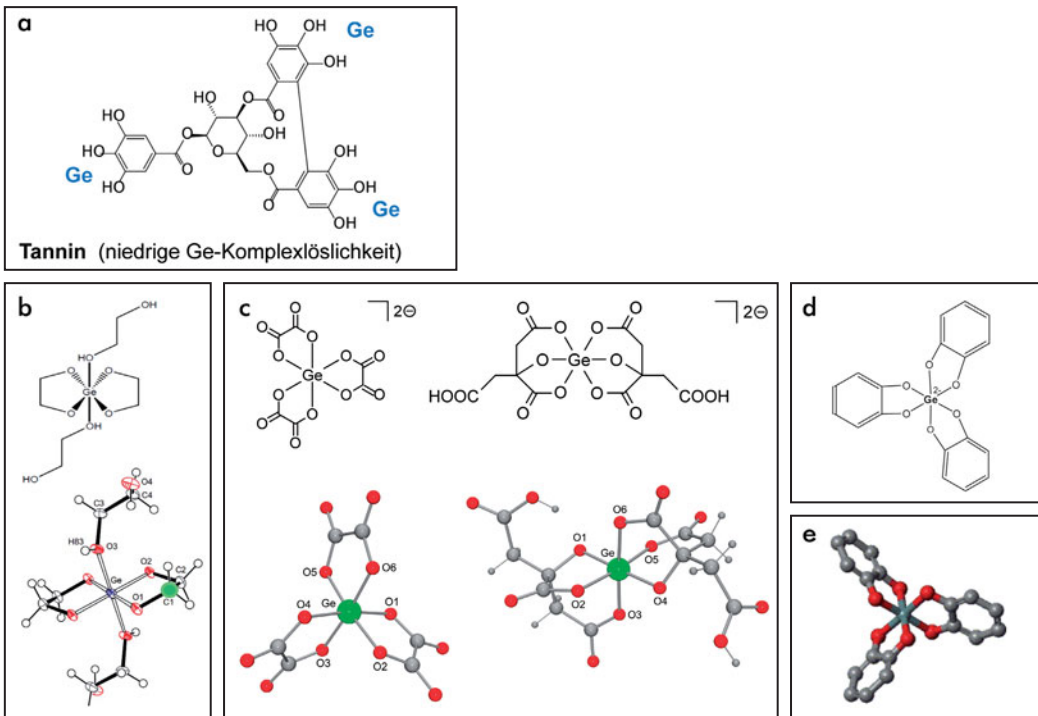
Kürzlich sind neuartige multifunktionale anorganische/organische Hybridverbindungen  $\alpha_2\text{-P}_2\text{W}_{17}\text{O}_{61}\{(\text{RGe})\}^{7-}$  ( $\text{R}=\text{HOOC}(\text{CH}_2)_2\text{-}$  oder  $\text{H}_2\text{C}=\text{CHCH}_2\text{-}$ ) synthetisiert worden (Nomiya et al. 2011). Die Synthese gelang durch die Inkorporation von organischen Blöcken, die terminal funktionelle Gruppen (Carboxyl-, Allyl-) tragen, in die monolacunare Position des Dawson-Polyanions  $[\alpha_2\text{-P}_2\text{W}_{17}\text{O}_{61}]^{10-}$ , das ein internes Baugerüst mit  $\text{PO}_4\text{-}$  plus  $\text{WO}_6\text{-}$ Einheiten enthält. Anwendungsseitig interessant ist, dass sich am Ge-Atom in der Peripherie dieser Blöcke funktionalisierte Organylgruppen unter Formierung von fünffach koordinierten  $\text{Ge}^{4+}$ -Ionen verankern lassen, wodurch sich Chancen für das Design von Katalysatorsystemen eröffnen.

Bemerkenswerte neue, nichtzentrosymmetrische Kristalle der quaternären Sulfide  $\text{La}_2\text{Ga}_2\text{GeS}_8$  und  $\text{Eu}_2\text{Ga}_2\text{GeS}_7$  ( $\text{GeS}_4$  und  $\text{GaS}_4\text{-}$ Baueinheiten) sind durch Hochtemperatur-Festkörperreaktionen synthetisiert worden (Mei-Chun et al. 2011). Diese Verbindungen zeigen eine hohe NLO-Aktivität. Sie ermöglichen die Frequenzverdopplung von Strahlung (SHG: *second harmonic generation*). Ihr SHG-Effekt ist 1,6-fach größer als der der Benchmark  $\text{AgGaS}_2$  bei 205- $\mu\text{m}$ -Strahlung (mittleres Infrarot). Die SHG-Intensitäten entspringen in diesem Fall aus den elektronischen Übergängen zu antibindenden Zuständen der Metall-Schwefel-Bindung.

## Komplexchemie des Germaniums

Die Fähigkeit von  $\text{Ge}^{4+}$ -Ionen zur Komplexbildung mit zahlreichen Lewis-Basen, ist von grundlegender Relevanz für die Gewinnung, das Recycling und den Einsatz von Germanium als Material- und Katalysatorkomponente. Dies hat auch die Chemiker immer wieder herausgefordert, nach neuen Ge-Komplexverbindungen und dabei auch den Vergleich zu Silizium- und Zinn-Analoga zu suchen (Seiler et al. 2002, 2004; Seiler 2005; Klüfers u. Vogler 2007). Die schon erwähnte relative Anreicherung von Ge in Torf und Kohle resultiert offensichtlich aus der Komplexbildung mit Pflanzenbestandteilen, die über eine Vielzahl von koordinationsaktiven Gruppen (OH, COOH u. a.) in solchen Anordnungen verfügen, dass die Bildung von Chelaten als

zusätzlich stabilisierender Effekt eintreten kann (Phytosiderophore). Die detaillierte Kenntnis der hier involvierten chemischen Prozesse ist von genereller Bedeutung für das Sorptionsverhalten des Ge(IV) und somit für die Planung von Ge-(Wieder-)Gewinnungsverfahren. Komplexe des bereits heute zur Ge-Gewinnung eingesetzten Tannins sind in Wasser nur wenig löslich (außerdem ist dieser Ligand relativ teuer). Die in Abbildung 16.8 aufgeführten Beispiele demonstrieren, dass die Ge-Komplexierung auch schon mit einfacheren Liganden, die „O-Zähne“ enthalten, realisierbar sein könnte: Glycol, Catechol, Oxalat, Citrat, Acetylaceton Zucker und weitere Kohlenhydrate. Das Reaktivitätsmuster von Ge(IV)-Verbindungen gegenüber Glykol ist auch von prinzipiellem Interesse für die Klärung der Rolle von  $\text{GeO}_2$  als Katalysator für den PET-Produktionsprozess. In Bezug auf den Einsatz einer Lösungsmittel-Extraktions-



**Abb. 16.8** Lösliche Germaniumkomplexe. (a) Ge-Chelatisierung durch Tannin (industrielle Anwendung). Beispiele von Ge-Komplexen mit O,O-Modell-Liganden von (b) Klüfers u. Vogler (2007), (c) Seiler (2005), (d) Arroya Torralvo et al. (2010) und (e) Marco-Lozar et al. (2011)

technologie scheint ein Screening der Germaniumfixierung durch weitere Ligandenklassen, zusätzlich zu den bereits in Abbildung 16.8 aufgeführten, sehr empfehlenswert. Neben den „Nur-O-Donoren“ kommen auch solche mit NO-Donoratom-Mustern für die Ge-Extraktion in Betracht. Der Einsatz von  $\alpha$ -Hydroxyoximen ist bereits patentiert (Scoyer et al. 2002). Potenzielle Liganden mit S-Donoratomen bieten sich ebenfalls an. Die Möglichkeiten zur Optimierung der Ligandensysteme in Bezug auf die praktische Nutzung zu Ge-Anreicherungsprozessen bzw. zum Recycling erscheinen bei Weitem noch nicht ausgeschöpft.

Es besteht aber auch ein hohes Interesse daran, Ge- und Si-Verbindungen für eine Anwendung in der Katalyse zu finden. Hierzu bieten sich vor allem Verbindungen an, die niedervalentes Germanium enthalten. Bisher sind nur wenige kationische Komplexe bekannt.

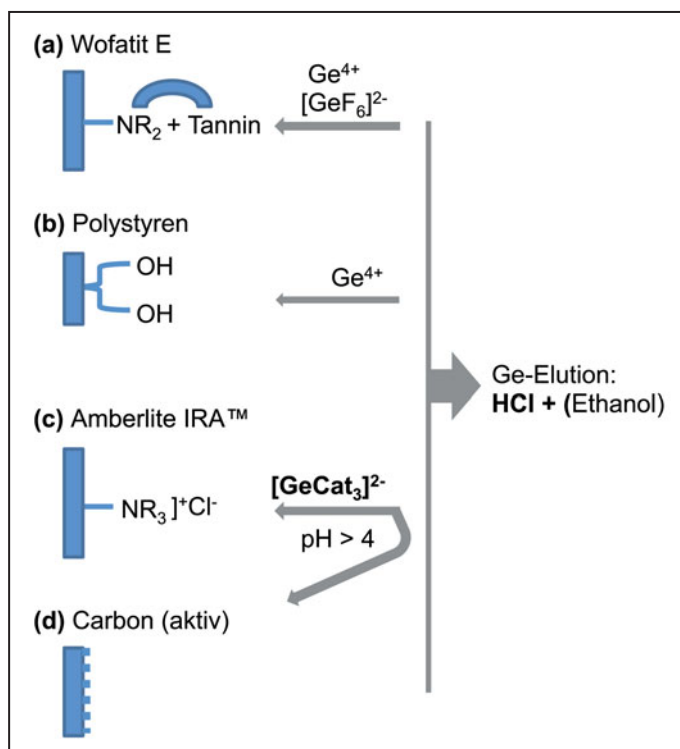
Die Arbeitsgruppe um Baines (Rupar et al.

2008) hat kürzlich eine Möglichkeit zur Stabilisierung des  $\text{Ge}^{2+}$ -Kations durch den Cryptanden [2,2,2] gefunden. Cheng et al. (2009) zeigten, dass auch Thiamakrozyklen und neutrale makrozyklische N- und O-Donoren zur Stabilisierung halogenidfreier  $\text{Ge}^{2+}$ -Kationen geeignet sind.

Die wässrigen Lösungen, die bei Leaching-Prozeduren anfallen, enthalten – durch den Charakter der Lagerstätten und Flugaschen bedingt – nur geringe Konzentrationen an Germanium, aber hohe an Begleitelementen (z. B. Übergangsmetallionen wie  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ). Daraus erwächst die Notwendigkeit zur Anreicherung und Abtrennung von Germanium.

Bisher ausgeübte bzw. beanspruchte Verfahren reichen von der Abdestillation von Germaniumtetrachlorid ( $\text{GeCl}_4$ ), über die Fällung, Lösungsmittelextraktion, Adsorption bis hin zur Chemisorption an mit funktionalisierten Gruppen ausgestatteten Harzen (Abb. 16.9).

Abb. 16.9 Extraktion und Wiedergewinnung von Germanium. Beispiele von (a) Ziegenbalg und Schäffler 1963 und Kunio et al. (1985); (b) Hayashi et al. (1985); (c) Arroya et al. (2010) und (d) Marco-Lozar et al. (2007)



Frühe Versuche dazu gab es auch in Freiberg. Hier haben Ziegenbalg und Schäffler (1963) den schon zur Produktion von Ge-Konzentraten eingesetzten Komplexbildner Tannin auf dem schwach basischen Ionenaustauscher Wofatit E fixiert und somit dieses Harz quasi „germaniumfreundlich“ umfunktionalisiert. Das Verfahren eignet sich sogar zum Recycling von Germanium aus HF/HNO<sub>3</sub>-haltigen Ätzlösungen. Kunio et al. (1985) haben dieses 20 Jahre später für die Wiedergewinnung von Germanium aus verdünnten Lösungen erneut patentieren lassen. Alternativ hierzu haben Hayashi et al. (1985) Diol-Gruppen als potenzielle Ligand-Funk-

tionen an einer Polystyrenmatrix verankert, die aus schwach sauren Lösungen Ge-Spezies binden können. Aktuelle Vorschläge zur Extraktion aus Flugaschen, Anreicherung bzw. Wiedergewinnung von Germanium aus wässrigen Lösungen stammen von den Gruppen um F. Arroya (2010) und J. P. Marco-Lozar (2007). Beide nutzen in Lösung bei pH-Werten >4 (meist zwischen 4 und 8) gebildete anionische Komplexe mit Catechol (Abb. 16.8), die sich dann entweder im Austausch mit Chloridionen an Anionenaustauschern wie Amberlit (IRA-900, IRA-958) oder an aktiviertem Kohlenstoff fixieren lassen (Gl. 1).

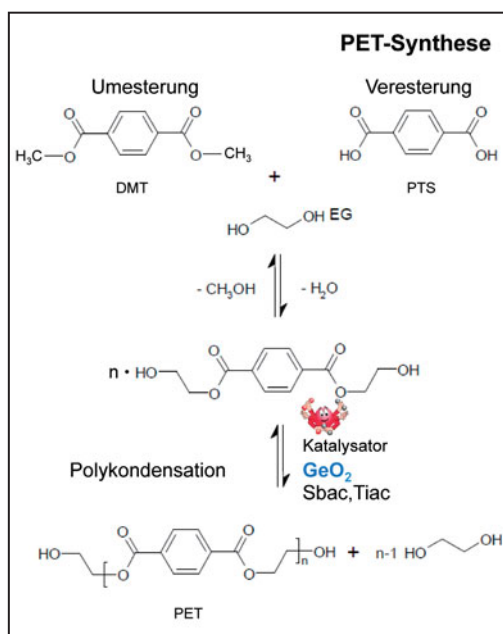
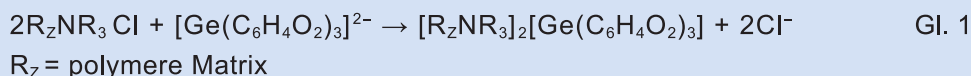


Abb. 16.10 PET-Synthese. **DMT** Dimethylterephthalat; **PTS** Terephthalsäure; **EG** Ethylen glykol; **Sbac** Antimonacetat; **Tiac** Titanacetat; **PET** Polyethylterephthalat

Dieser Ligand ist im Zusammenhang mit der Synthese von Komplexen mit einem hyperkoordinierten Si-Atom gut bekannt. Silizium(IV)- wie auch Eisen(III)-Spezies konkurrieren mit Germanium um die Koordination dieses anionischen Liganden. Angaben zur graduellen Steuerung der Selektivitäten fehlen bisher noch. Zur Elution von Ge eignet sich Salzsäure besser als andere Säuren, zumal der Ionenaustauscher durch HCl wieder zur chloridischen Form regeneriert wird. Bei Amberlit-Säulen wird die Ausbeute durch Zusatz von Ethanol deutlich erhöht.

In Anknüpfung an die Ge-Komplexbildung mit Glykolen und Carbonsäuren ist Bezug auf den technischen Prozess der PET-Synthese durch Umsetzung von Glykol mit Terephthalsäure und ihrem Dimethylester genommen (Abb. 16.10). Der Prozess umfasst zwei prinzipielle Stufen. In der ersten verlaufen die Halbveresterung von Terephthalsäure und Umesterung ihres Dimethylesters durch Glykol sowie erste Kondensationsschritte der dabei erzeugten Verbindungen. In der zweiten

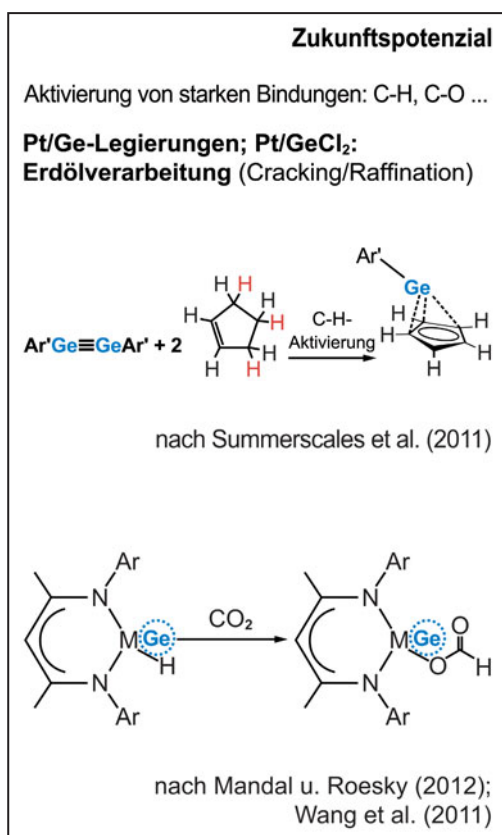
Stufe wird das so erhaltene „Präpolymer“ (kurzkettiges Oligomer) aufgeschmolzen und über Polykondensationsreaktionen in PET überführt. Der katalytische Effekt von  $\text{GeO}_2$  auf den hierbei stattfindenden Kondensationsprozess beruht offensichtlich auf der Aktivierung des Glykol-Halbesters von Terephthalsäure sowie niedermolekularer Kondensationsprodukte durch deren temporäre Aufnahme in die Koordinationssphäre des Germaniums. Auch Antimon- und Titan-Verbindungen – z. B. Acetate – können die Katalysatorrolle mit technisch akzeptablen Aktivitäten übernehmen. Das Problem und damit die aktuelle Unverzichtbarkeit auf Germaniumoxid, besteht aber darin, dass für jenes PET, das als Folie oder Behältermaterial mit Lebensmitteln in Kontakt kommt, diese alternativen Verbindungen wegen toxikologischer Beschränkungen nicht eingesetzt werden dürfen, da der verwendete Katalysator im PET-Produkt verbleibt. Außerdem neigen die Folien dazu, mit anderen Katalysatoren als  $\text{GeO}_2$  opak zu werden. Da  $\text{GeO}_2$  in ohnehin nur katalytischen Mengen vorliegt und über die schiere Produktmenge stark verdünnt ist, wäre ein Germaniumrecycling aus diesen Polymeren mit einem extrem hohen Aufwand verbunden.

Abbildung 16.11 zeigt einige Germaniumverbindungen, die sich potenziell als Komponenten in Katalysatorsystemen für technisch interessante chemische Prozesse eignen.

Für weitere zukünftige Anwendungen des Germaniums in der chemischen Katalyse sind die Reaktivitäten von Ge-Subverbindungen/Phasen, d. h. mit Germanium in niedrigen Oxidationszuständen, für die Aktivierung von C-H- und C-O-Bindungen besonders interessant. In Abbildung 16.11 sind auch zwei sich aus neuesten Forschungsergebnissen andeutende Anwendungen für niedervalente Germaniumverbindungen aufgeführt –  $\text{Ge(II)}$ - und  $\text{Ge(I)}$ -Moleküle (Mandal u. Roesky 2012; Wang et al. 2011; Summerscales et al. 2011). Sie offerieren ein Potenzial für die Lösung brennender Zukunftsfragen, wie die Aktivierung der C-O- und C-H-Bindungen in kleinen

chemisch relativ inerten Molekülen, z. B.  $\text{CO}_2$  und Methan.

Effiziente Lösungen sind von riesiger Bedeutung für die Erschließung des chemischen Rohstoffpotenzials von Kohlendioxid und Erdgas. Ein Durchbruch unter Mitwirkung von Ge in den Katalysatorsystemen würde einen Versorgungsanspruch für Germanium im großen Maßstab bedingen. Die Relevanz lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt aber noch nicht beurteilen. Aktuell in Erwägung gezogen wird die Einführung von Germanium-Platin(Pt)-Legierungen oder  $\text{Pt/GeCl}_2$ -Katalysatoren im industriellen Maßstab zum Cracken bzw. zur Raffination von Erdöl (Asian Metals 2008).



**Abb. 16.11** Germaniumverbindungen in der Katalyse – Zukunftspotenzial. Ar Aryl



# 16.6 Anwendungen des Germaniums

## Anwendungen des Germaniums und seiner Oxide

Germanium, sein Dioxid und weitere Germaniumchalcogenide (Chalkogenide, die Elemente der 6. Hauptgruppe, umfassen O, S, Se, Te) sind etablierte Komponenten in optischen Materialien. Die fundamentalen Effekt-Ziele für das Maßschneiden von optischen Materialeigenschaften unter Nutzung dieser Komponenten sind:

- 1. Ausnutzung der Transparenzregion von Ge-Kristallen (z.B. der Infrarotstrahlungsbereich von Körperwärme, für optische Fenster, Linsensysteme) und Entwicklung von IR-durchlässigen Gläsern,

- 2. Abstufung des optischen Brechungsindex in Glaskörpern, insbesondere lichtleitenden Fasern.

Abbildung 16.12 resümiert die relevanten grundlegenden Eigenschaften solcher Materialien. Für halbleitende und dielektrische Materialien hängt die kurzwellige Grenze für die Strahlungsdurchlässigkeit  $\lambda_k$  von der Größe der Bandlücke  $E_g$  ab (für Ge beträgt diese 0,67 eV). Die langwellige Grenze  $\lambda_l$  korreliert mit den Schwingungsfrequenzen der Gitterbausteine, d. h., je größer deren Massen sind, umso größer ist diese Wellenlänge.

$\text{GeO}_2$  ist, wie schon erwähnt, ein Glasbildner. Die Substitution von  $\text{Si}^{4+}$ - durch  $\text{Ge}^{4+}$ -Ionen in Oxidgläsern führt demnach zu einer bathochromen Verschiebung des optischen Fensters in Gläsern (d. h., die Absorptionswellenlänge verschiebt sich zu größeren Wellenlängen). Dies geschieht ebenso beim Ersatz von Oxidationen des Germaniumdioxids durch Sulfid-, Selenid- oder Tellurid-Ionen, da deren Masse

**Transparenz (von Halbleitern und dielektrischen Materialien):**

**kurzwellige Grenze:**  $\lambda_k (\mu\text{m}) = \frac{1,24}{E_g (\text{eV})}$      $E_g = 0,67 \text{ eV}$     Ge:  $\lambda = 1,85 - 15 \mu\text{m}$  (IR-optisches Material)  
Elektron. Anregung    „Material der Wahl“ in 8–12  $\mu\text{m}$  Region

**langwellige Grenze:**  $\frac{1}{\lambda_l} \sim M^{-1/2}$      $\left\{ \frac{1}{M} = \frac{1}{M_a} + \frac{1}{M_c} \right\}$      $M_a, M_c$ : Massen von „Anion“, „Kation“  
Gitterschwingungen

**bathochrome Verschiebung des optischen Fensters in Gläsern:**

Substitution  $\text{Ge} \rightarrow \text{Si}$     bathochrome Verschiebung von  $\lambda_l$

Substitution ( $\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$ )  $\rightarrow \text{O}$     Bindungsenergie:  $\text{Ge-O} > \text{Ge-S} > \text{Ge-Se} > \text{Ge-Te}$   
optisches Bandgap  $\rightarrow$  bathochrom (farbig)

Strukturänderung: Redox-Synproportionierung:  $\text{GeX}_2 + \text{GeX} = \text{Ge}_2\text{X}_3$   
 $\rightarrow$  grundlegend für IR-transparente Gläser

**Brechungsindex:**  $n \approx 4$  (Ge)  $\rightarrow$  Ge-Linsen

$n(\text{Germanatglas}) > n(\text{Silikatglas}) \rightarrow$  optische Fasern ( $0,85 \leq \lambda \leq 1,55 \mu\text{m}$ );  
Germanatglas (hochbrechend):  
 $\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{GeO}_2 \cdot \text{BiF}_3$   
 $\text{PbO} \cdot \text{GeO}_2 \cdot \text{PbF}_2$

Abb. 16.12 Anwendungen von Germanium und seinen Chalcogeniden in der Optik. *E<sub>g</sub>* Bandlücke in Halbleitern (engl.: energy gap)

16

größer ist als die der Oxidionen. Außerdem ist die Ge-X-Bindungsenergie in diesen Fällen geringer. Der Synproportionierungsprozess



kreiert einen Strukturwandel im Glas, der eine hohe günstige IR-Strahlungsdurchlässigkeit bewirkt.

Ge-Linsen haben den Vorteil des hohen Brechungsindex von reinem Ge-Material ( $n = 4$ ). Sie können deshalb dünn sein, da sie nur eine niedrige chromatische Dispersion erzeugen. Germanatgläser besitzen prinzipiell höhere Brechungsindizes als ihre Silizium-Analoga. Über den Germaniumgehalt lässt sich deshalb der Brechungsindex eines Kieselsäureglases erhöhen und skalieren. Das ist ein Schlüsselfaktor für die Produktion von Lichtwellenleitern. Besonders hohe Brechungsindizes haben Gläser mit den Zusammensetzungen  $\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot \text{GeO}_2 \cdot \text{BiF}_3$  oder  $\text{PbO} \cdot \text{GeO}_2 \cdot \text{PbF}_2$ , die sich für achromatische Linsensysteme eignen.

Abbildung 16.13 demonstriert die Anwendung der gezielten Einstellung des Brechungsindex bei der Produktion von Lichtwellenleitern (LWL). Die für den Informationstransport geforderte Totalreflexion der Strahlung innerhalb der Kabelfaser wird bekanntlich durch deren Kern-/Hülle-Aufbau erzielt. Der Kern

( $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{O}_2$ ) besitzt dank der Dotierung des  $\text{SiO}_2$  mit  $\text{GeO}_2$  einen höheren Brechungsindex gegenüber der  $\text{SiO}_2$ -Hülle. Auf diese Weise werden hochreine  $\text{SiO}_2$ -Mantelgläser hergestellt (*Cladding*). Die Oxide werden durch gesteuerte thermische Umsetzung der beiden Chloride  $\text{SiCl}_4$  und  $\text{GeCl}_4$  mit Sauerstoff erzeugt. Die graduelle Ge-Dotierung und folgende  $\text{SiO}_2$ -Beschichtung des zunächst erzeugten Kerns sind also CVD-Prozesse, in denen höchste Präzision gefragt ist.

In der ersten Produktionsstufe werden Kernstäbe für Monomode- (Stufenprofil des Brechungsindex), Multimode-Fasern (Stufen- bzw. Gradientenprofil des Brechungsindex) oder spezielle optische Fasern gefertigt: durch Materialabscheidung innen in das Rohr hinein. Dieses Kernmaterial der finalen Faser resultiert aus der Abscheidung von multiplen Schichten von reinem und Ge-dotiertem geschmolzenem  $\text{SiO}_2$  an der Innenfläche des Substratrohrs. Als Energiequellen für die CVD dienen Knallgasbrenner, elektrische Öfen und Plasmafackeln. In der zweiten Produktionsstufe – wenn genügend Kernmaterial abgeschieden ist – fällt bei noch höherer Temperatur und unter angelegtem Vakuum das Rohr graduell zu einem festen Kernstab zusammen. Aus dieser sog. „Präform“ wird schließlich in der finalen Produktionsstufe die dünne optische Faser gezogen.

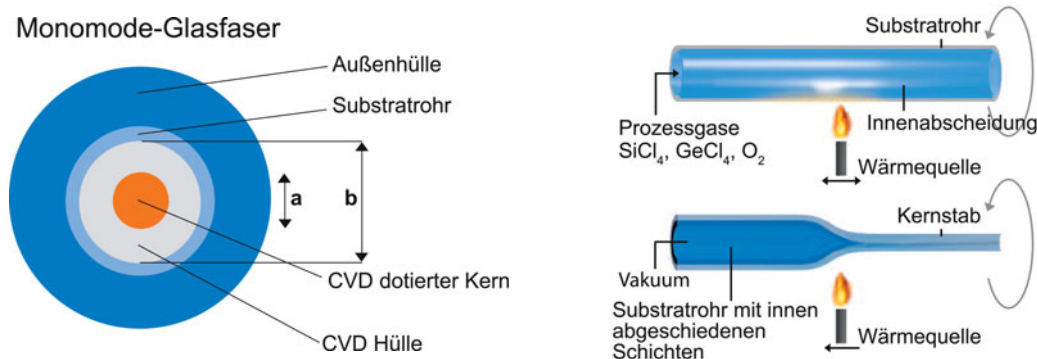


Abb. 16.13  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{O}_2$ : Optische Fasern. Modifiziert und übersetzt nach eine Abbildung der Heraeus Quarzglas GmbH KG (mit freundlicher Genehmigung). CVD chemische Gasphasenabscheidung

Abbildung 16.14 veranschaulicht die mit der Produktion von LWL-Fasern verbundene Wertschöpfungskette für Germanium in Deutschland (Erdmann et al 2011). Pro zu installierendem Kilometer Kabel werden ca. 0,31g Ge gebraucht. Die starke Importabhängigkeit ist eindeutig zu erkennen, insbesondere

von der VR China. Das Produktionsvolumen an LWL steigt im Zusammenhang mit dem Ausbau der Glasfasernetze in Deutschland zukünftig noch weiter. Das verlangt immer noch größere Mengen an Germaniumtetrachlorid ( $\text{GeCl}_4$ ), denn ein „Auswechselspieler“ dafür ist gegenwärtig nicht in Sicht.

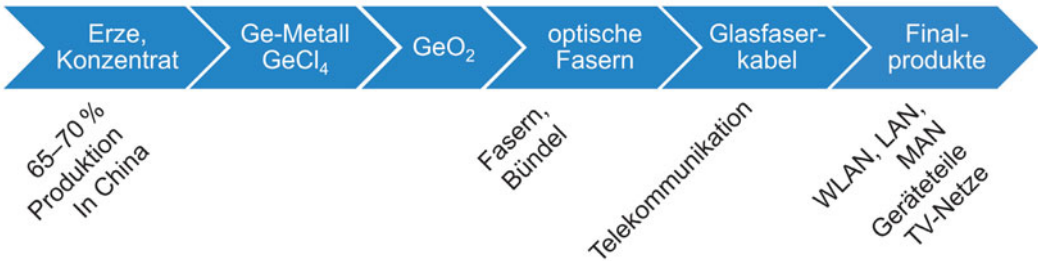


Abb. 16.14 Wertstoffkette der Produktion und Anwendung optischer Fasern

Silizium- und germaniumbasierte Apatit-Verbindungen  $\text{La}_{9,33+x}(\text{Si}/\text{Ge})_6\text{O}_{26+1,5x}$  finden für die Entwicklung von Brennstoffzellen (SOFC) beträchtliches Interesse als neue Festelektrolyte im Temperaturbereich 500–700 °C (Panchmatia et al. 2011). Apatitmaterialien besitzen die generelle chemische Zusammensetzung  $\text{A}_{10-x}(\text{Si}/\text{Ge})_6\text{O}_{26+y}$  ( $\text{A}$  = Seltenerd-/Erdalkalimetallion). Ihre Struktur lässt sich interpretieren als Kombination aus einem  $\text{A}_{4-x}(\text{Si}/\text{GeO}_4)_6$ -Gerüst und  $\text{A}_6\text{O}_2$ -Baueinheiten in darin erzeugten Kanälen. Wie durch DFT-Rechnungen (DFT = Dichte-Funktional-Theorie) und  $^{17}\text{O}$ -NMR-Messungen gezeigt werden konnte, sind interstitielle Oxidionen für den Leitungsmechanismus relevant. Die Defektpositionen der interstitiellen Oxidionen sind mit Oxo-Ge(IV)-Einheiten verknüpft, wobei auch fünffach koordinierte Ge(IV)-Positionen gebildet werden. Die  $^{17}\text{O}$ -NMR-Messungen lieferten den experimentellen Beleg für die Relevanz von interstitiellen Oxidionen, die mit Ge(IV) so assoziiert sind, dass Einheiten mit fünffach durch Oxidionen koordinierten  $\text{Ge}^{4+}$ -Ionen resultieren: Die interstitiellen Oxi-

dionen liegen innerhalb der Bindungssphäre von Ge(IV). Sie können die Kanäle passieren, d.h., Oxidionen wechseln ihre Position zwischen Gitter- und Zwischengitterpositionen. Wie hoch die Einsatzchancen dieser Verbindungen in SOFC aktuell sind, ist noch nicht publiziert. Im Erfolgsfall könnte das Feld ein großer Markt werden.

## Elementares Germanium und seine Legierungen

Vor dem Hintergrund der Anwendung von elementarem Germanium und seinen Legierungen (intermetallische Phasen mit anderen Elementen) erscheinen einige Betrachtungen zum Stand der chemischen Synthese von Ge-Teilchen mit einer Größendimension im Nanometerbereich nützlich. Ihr Einsatz eröffnet Sparpotenzial in den aktuellen, aber prinzipiell auch neue, Anwendungsgebieten. Ge-Cluster sind generell aus  $\text{GeO}_2$  bzw. Ge-Halogeniden aus Lösungen oder aus der Gasphase

(CVD) zugänglich (Lee et al. 2009; Wang et al. 2009). In Anwesenheit von Alkalimetallionen bei der Ge(IV)-Reduktion können Zintl-Phasen, d.h. praktisch ionisch aufgebaute Verbindungen mit Ge-Clusteranionen, erzeugt werden. Diese lassen sich auch zur Synthese intermetallischer Cluster mit Übergangsmetallen nutzen, z.B.  $\text{Co@Ge}_{10}^{3-}$  durch die Reduktion von Cobalt-Organylen  $\text{CoR}_2$  mit der Zintl-Verbindung  $\text{K}_4\text{Ge}_9$  (Wang et al. 2009).

Für elektrische und elektronische Anwendung interessante Ge-Nanodrähte sind über die goldkeimkatalysierte CVD von German ( $\text{GeH}_4$ ) herstellbar (VLS-Methode, *vapor liquid solid*, dt. Dampf-Flüssigkeit-Feststoff-Methode, ein Verfahren für die Herstellung von eindimensionalen Strukturen wie Nanodrähten mittels CVD). Statt Gold sind auch schon zahlreiche andere Metalle als Keim genutzt worden (Ni, Co, Sn, Mn, Ir) sowie auch Organogermane anstelle von  $\text{GeH}_4$ . Mit Metallkeimen gelingt die Nanodrahtsynthese auch in superkritischen organischen Flüssigkeiten, z.B. in Toluol (Tuan et al. 2006; Wang u. Dai 2002).

Besonders aussichtsreich erscheint aber die CVD von Ge(II)- oder Ge(III)-Verbindungen. Als Ge(II)-Edukte für die CVD sind z.B.  $\text{GeCp}_2$  (Mathur et al. 2004) oder Ge(II)-Alkoxide (Gerung et al. 2006) etabliert. Ihre Umwandlung in Ge-Drähte benötigt – wie im Falle von  $\text{GeH}_4$  – die Wachstumsrichtung dirigierende, katalytisch aktive Substanzen. Diese sind beim Einsatz des Präkursors Hexakis-trimethylsilyldigerman als Edukt für den CVD-Prozess, wie von Hobbs et al. im Jahr 2010 publiziert, nicht notwendig. Die Verbindung bietet sich deshalb zur Herstellung von CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*), die auch Silizium als Material enthalten, an.

## Germanium in der Batterietechnik

Wie die Arbeitsgruppe von Cho (Park et al. 2011; Seng et al. 2012) kürzlich gefunden hat,

ist Germanium im Vergleich zu anderen Anodenmaterialien, die Lithium-Legierungsreaktionen unterliegen (z.B. Silizium, Zinn), ein exzellenter Kandidat als Anodenmaterial für Lithiumionen-Batterien. Es zeigt eine hohe theoretische Kapazität ( $1.600 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 4,4 Li-Ionen pro Ge-Atom, gutes Lithium-Diffusionsvermögen und hohe elektrische Leitfähigkeit, jedoch ist sein Preis der Hauptnachteil für eine Kommerzialisierung dieses Elektrodenmaterials. Außerdem erleidet Germanium große Volumenänderungen während der Legierungs- bzw. Entlegierungsreaktionen mit Lithium. Aus diesem Nachteil resultieren negative Effekte in Bezug auf die Zyklus-Performance. Im Sinne einer Erhöhung der Zyklusstabilität von Ge-Anoden ergeben nanoskalige Morphologien eine günstigere Strukturstabilität für das Verkräften von Volumenänderungen, z.B. Nanopartikel, Nanodrähte, Nanoröhren, poröse Strukturen. Auch germaniumbasierte Komposite sind bereits geprüft worden, so z.B. Germanium/Zinn, Germanium/Kohlenstoff-Nanoröhren oder Germaniumoxide sowie mit Kohlenstoff umhüllte Germaniumpartikel. Nanostrukturen mit Ge/C-Clustern haben das Potenzial, ein Hoch-Energie- und hochbelastbares Anodenmaterial für Li-Ionenbatterien zu werden. Eine solche selbstassemblierte Germanium/Kohlenstoff-Nanostruktur (Ge in einer hohlen Kohlenstoffhülle) lässt sich leicht durch eine Kohlenstoffbedeckung auf einem Ge-Präkursor mit einer Acetylen/Argon-Gasmischung bei  $620^\circ\text{C}$  und nachfolgende chemische Reduktion dieser Nanopartikel in einer Wasserstoff/Argon-Mischung erzeugen. Die hervorragende elektrochemische Performance dieser Materialien ist hauptsächlich auf ihre besondere Nanostruktur zurückzuführen. Eben diese selbstassemblierte Nanostruktur gewährleistet eine gute Elektrolytdiffusion in ihren Poren und hohe elektronische Leitfähigkeit durch das untereinander verbundene Netzwerk von Kohlenstoffhüllen. Nanostrukturen widerstehen generell besser dem mechanischen Stress als kompakte Standardmaterialkörper.

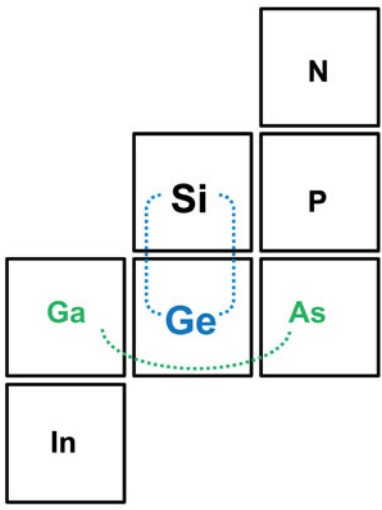
# Germaniumbasierte Halbleiter

Die relativ niedrigen Herstellungskosten von Si-Wafern in Verbindung mit der Möglichkeit, ohne besonderen Aufwand eine Isolierschicht (SiO<sub>2</sub>) darauf zu erzeugen, sowie tolerierbare höhere Betriebstemperaturen haben zur beinahe vollständigen Ablösung des Ge-Wafer-Materials durch Si bzw. GaAs geführt. Trotzdem werden Ge-Scheiben noch immer für spezifische Anwendungen gebraucht. Die größeren Beweglichkeiten der Ladungsträger im Ge im Vergleich zu Si bewirken einen wirksameren Ladungstransfer, d.h., die Geschwindigkeit ist in SiGe- viel höher als in reinen Si-Chips (Abb. 16.15). Hochleistungskomponenten mit niedrigem Energieverlust infolge Aufheizung werden vorzugsweise aus Ge sowie GaAs (Verbindungshalbleiter aus den beiden Elementen links und rechts vom Germanium im PSE) hergestellt. Die geringere Breite der verbotenen Zone

im SiGe- bedingt eine kleinere Sättigungsspannung im Vergleich zum Si-Material.

Wieder bzw. immer noch sind für die elektronische Anwendung auch Si/Ge-Legierungen – sowohl als Wafer als auch als Aufdampfschichten – im Einsatz. Kürzlich ist eine sehr instruktive moderne Darlegung über die Produktion von SiGe-Materialien, ihre Eigenschaften und Anwendungen in der Elektronik erschienen (Shiraki u. Usami 2011). Hochreine Ge-Schichten lassen sich z.B. durch Disproportionierung von GeI<sub>2</sub> herstellen (Abb. 16.15).

In Kombination mit Silizium ist Germanium auch als Transistormaterial wieder gefragt. Nach der fast totalen Verdrängung des Ge durch Si-Material in zahlreichen Anwendungen kommen offensichtlich wieder Neuentwicklungen von Chips mit Germanium als Komponente auf den Markt. Die Prozesse in Transistoren mit Germaniumanteil am Si-Chipmaterial verlaufen 10- bis 100-fach schneller als in jenen, die



Wafer	Ge	Si	GaAs
E <sub>g</sub> (eV):	0,67	1,12	1,42
e/h-Mobilität: e <sup>-</sup>	3.900	1.500	8.500
(cm <sup>2</sup> /Vs) h <sup>+</sup>	1.900	450	400
maximale Operationstemperatur (°C):	100	200	350

## SiGe-Legierungen

### SiGe-Schichten

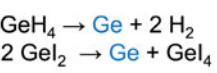


Abb. 16.15 Germanium als Elektronikmaterial.  
E<sub>g</sub>(eV) Bandlücke-Energie (engl.: energy gap)



nur Si enthalten. IBM hat hier die Entwicklung von Prototypen mit geringem Energieverbrauch und höheren Geschwindigkeiten vorangetrieben. Gemeinsam mit Forschern der Universitäten in Purdue (West Lafayette, Indiana) und in Los Angeles ist IBM auch ein wichtiger Schritt in der Nanotechnologie gelungen: Sie haben ein Verfahren gefunden, Nanodrähte in einer Vakuumkammer auf Gold-Tröpfchen so zu erzeugen, dass beide Komponenten auf atomarer Ebene klar voneinander getrennt sind. Somit kann der Elektronenfluss verbessert und kontrolliert ein- und ausgeschaltet werden. Solche heterostrukturierten Nanodrähte ermöglichen die Herstellung sehr kleiner und effizienter Transistoren (Wen et al. 2009).

Germanium lässt sich sowohl epitaktisch auf Silizium abscheiden (Germanium on Isolator: GoI) als auch mit Silizium über die Schmelze zu  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  legieren und zu Wafern verarbeiten.

SiGe-Bauteile werden für drahtlose Geräte, drahtlose Netzwerke (WLAN), optische Kommunikationssysteme, Festplatten, Automobil-Chips sowie *Global Positioning Systems* (GPS) benutzt. Diese SiGe-Transistoren sind kleiner, rauschen weniger und sind effizienter,

woraus auch verlängerte Batterie-Laufzeiten von mobilen Geräten entspringen. Sie arbeiten im ultrahochfrequenten Bereich und sind stabiler bei hohen Temperaturen und lassen sich mit bekannten Technologien der Si-Chipindustrie herstellen. Ihre Technologie ist billiger als die GaAs-basierte. Siliziumgermanium (SiGe)-Komponenten in komplementären Metalloxid-Halbleiter-Chips (SiGe-CMOS) und Transistoren sind kleiner, langlebiger und robuster.

Beispiele solcher vorteilhaften SiGe-Chips sind die von Infineon Technologies AG auf den Markt gebrachten Automotive-Anwendungen als Radar-Sensoren (Long-Range-Bereich 76...77 GHz) für Fahrassistenzsysteme in mittleren Fahrzeugklassen auf SiGe-Transceiver-Basis (Transceiver = Transmitter + Receiver; gekoppelte Baueinheit aus Sender und Empfänger) (Lehbrink 2008). Sie sind auf 8-Zoll-Wafern relativ unempfindlich fertigbar. Die Markteinführung erfolgte 2009. SiGe ist aber kein 1:1-Ersatz für GaAs (Abb. 16.16).

Die von den Firmen Daimler AG und Robert Bosch GmbH gemeinsam entwickelte IR-Kamera für Nachtsicht im Auto (Abb. 16.17) enthält ebenfalls germaniumbasierte Chips.

Abb. 16.16 Radar-Chips aus SiGe (Radarsensoren auf Basis von SiGe-Transceivern).

Beispiele: (a) Fahrassistenzsysteme von Infineon Technologies 2008–2009; (b) Chipmontage (Bare-die assembly) mit Wärmesenke.

MMIC monolithisch integrierte Mikrowellenschaltung (engl.: *monolithic microwave integrated circuits*).

Quelle: nachgezeichnet nach Lehbrink (2008)

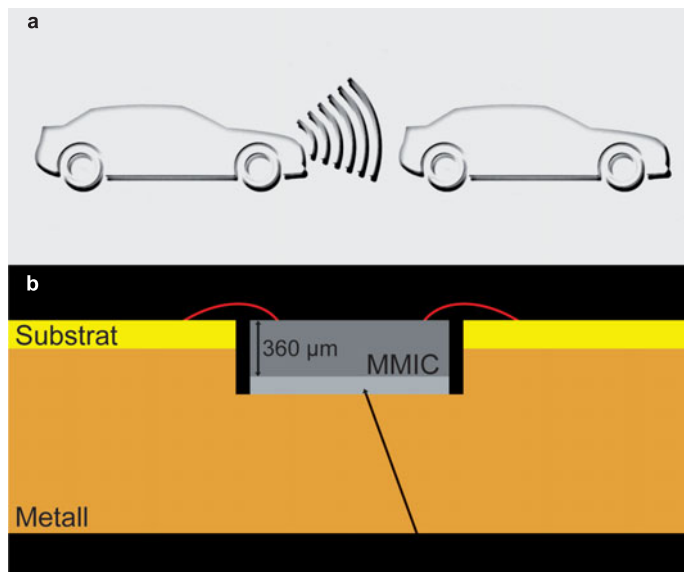




Abb. 16.17 Nachtsichtassistent von Mercedes-Benz – für den Deutschen Zukunftspreis nominiert. Bildquelle: © Daimler AG

Germanium-Photodioden, die IR-Strahlung an einem p,n-Übergang in Strom verwandeln – ausgelegt für einen Wellenlängenbereich von 800 bis 1.800 nm – sind eine preiswerte Alternative zu InGaAs-Photodioden, insbesondere bei großen aktiven Flächen. Germanium-Photodioden werden als gekühlte Infrarotdetektoren auch zum Nachweis der IR-Strahlen verwendet: Thermographie-Kameras arbeiten hiermit, z.B. in militärischen Anwendungsfeldern, d.h. Nachtsichtgeräte, Navigationssysteme, optische Bildgebung, thermographische Geländeaufnahme und Zielevaluierung. Hinzu kommen Facility-Anwendungen in Gestalt von Bewegungsmeldern, thermographische Gebäudeaufnahmen zur Isolationsüberprüfung.

In Nah-Infrarot-Kameras wird Germanium zwar teilweise von InGaAs verdrängt, da dieses Material weniger Dunkelstrom beinhaltet. Aber dieser „Ersatzstoff“ besteht auch aus „Mangelware-Elementen“. Insgesamt werden für den Photodioden-Einsatz aber nur Mengen unterhalb einer Tonne gebraucht. Das ist sehr wenig – verglichen mit ca. 20 t Verbrauch für Linsen und andere optische Bauteile.

Ge-Wafer werden als Substrat für III/V-Solarzellen genutzt, da die Gitterkonstante von Germaniumkristallen der für GaAs ähnelt und deshalb dessen epitaktische Abscheidung gestattet. Germanium-Wafer mit einem Durchmesser von 300 mm können mit dem

Czochralski-Kristallzuchtverfahrens hergestellt werden. Die Mehrfachzellen mit Schichten aus GaAs und GaInP<sub>2</sub> auf einem Ge-Substrat – wie in Abbildung 16.18 demonstriert – ermöglichen einen drastischen Sprung des Wirkungsgrads gegenüber Si-Zellen (von 8–15 % auf 30–40 %). Die Kosten solcher „multijunction solar cells“ (deren Entwicklung auf ihre Anwendung im Weltraum zurückgeht) sind zwar etwa zehnmal so hoch wie die für eine Si-Zelle mit vergleichbarer Oberflächengröße. In Kombination mit dem Einsatz von optischen Vorrichtungen zur Lichtkonzentrierung (Faktor 1.000 erscheint praktisch realisierbar) bieten solche Zellen aber eine wettbewerbsfähige alternative Lösung gegenüber anderen Photovoltaik(PV)-Technologien. Ihre Temperaturresistenz ist besser als die von Solarzellen aus rein siliziumbasiertem Material.

Germanium ist auch ein sehr vorteilhaftes Carrier-Substrat für die aktiven Schichten in LEDs. Es eignet sich sowohl für aktive

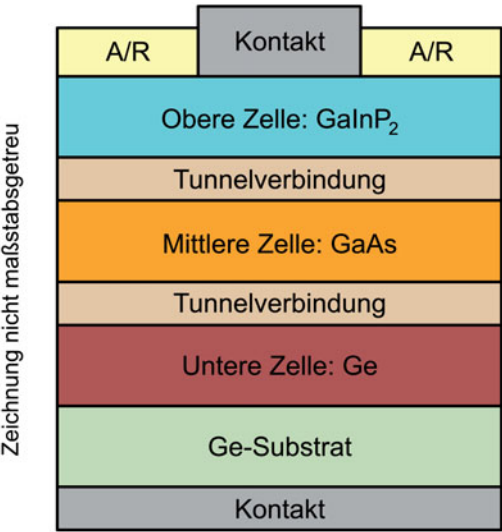


Abb. 16.18 Photovoltaik Zellen, die auf Germanium basieren. A/R Anti-Reflexionsschicht. Quelle: Übersetzt und modifiziert nach © Geens (2008)

GaN/InGaN-Schichten („blue to green“, aufgewachsen auf Saphir) als auch für jene aus InAl-GaP („red to yellow“, aufgewachsen auf GaAs). Gegenüber anderen Carrier-Wafermaterialien besitzt Germanium als Vorteile eine bessere Anpassung seiner thermischen Ausdehnung in Bezug auf die der Saphir/GaN-Struktur und eine größere Lebensdauer (wegen ihrer höheren thermischen Stabilität; Geens 2008). Im Augenblick ist keine klare Prognose zu einem eventuellen Ersatz des Germaniums durch billigere Materialien möglich.

### Thermoelektrika auf Basis von Germanium und seinen Legierungen

Germaniumlegierungen mit Silizium, anderen Elementen und intermetallischen Phasen sind auch thermoelektrische Materialien, d.h., sie verwandeln Wärme in elektrische Energie. Solche Materialien haben eine wichtige Schlüsselstellung für die zukünftige Wandlung von Auspuffwärme in Kraftfahrzeugen und sich seit Jahren schon bewährt im Weltraum sowie in Uhren. Sie nutzen auf der Basis des Seebeck-Effekts das Temperaturgefälle zwischen Körper- und Raumtemperatur. Für Materialien mit einem hohen ZT-Wert (= innerer Wirkungsgrad) von 1,5 bis 2 braucht man eine hohe elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$ , aber niedrige Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ . Auch hier arbeitet man am Einsatz von nanostrukturiertem Material und Dünnschichten, weil er Vorteile gegenüber dem von Bulk-Material verspricht (Wiggers 2007; Kuehling u. Haass 2007; Kong et al. 2007).

Die SiGe-Legierungen  $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$  bzw.  $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$  werden vorzugsweise im Temperaturbereich 330–930 °C genutzt. Durch die starke Herabsetzung der Wärmeleitfähigkeit ergibt sich eine markante Erhöhung des ZT-Werts. Der Einsatz von SiGe im Auto wird u. a. von BMW getestet.

Aus Si/Ge-Legierungen lassen sich auch Kühlelemente, d.h. Wärmepumpen von nur ca. 40  $\mu\text{m}$  Größe zum Abkühlen von sich durch

den Betrieb aufheizenden Chips („hot spots“) herstellen. So kann der Peltier-Effekt (Kühlung durch Anlegen einer Spannung) lokal im Mikrobereich genutzt werden (Fan et al. 2001). Gegenwärtig werden an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Si-Ge-Te-Materialien entwickelt; die Zugabe von Tellur soll eine Verstärkung der thermoelektrischen Qualitäten (ZT-Wert) erbringen.

Außer Si/Ge-Legierungen sind noch weitere hoffnungsvolle thermoelektrische Materialien mit Ge-Komponente bekannt:

- $(\text{GeTe})_x(\text{AgSbTe}_2)_{100-x}$   
(sog. TAGS-Legierungen)
- $\text{Mg}_2\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{Sn}_y$   
(Legierungen für thermisches Spritzen)
- $\text{Pb}_x\text{Ge}_y\text{Te}_z$   
( $0,8 < x < 1,2$ ;  $0 < y < 0,05$ )
- $\text{MRuGe}_{13}$   
M = Yttrium (Y), Dysprosium (Dy),  
Holmium (Ho), Lutetium (Lu)

(Angerer et al. 2009; Erdmann et al. 2011; Kong et al. 2007). Aus diesem Anwendungsgebiet könnten große Nachfrageimpulse resultieren.

### Magnetische Germaniumhalbleiter

Germanium ist auch eine Komponente in einigen Materialien mit ausgeprägten speziellen magnetischen Eigenschaften. Wie unlängst von Gaudin et al. (2011) gefunden, zeigt die intermetallische Verbindung  $\text{GdTiGe}$  einen ferromagnetischen Übergang bei 103 °C und einen antiferromagnetischen bei 139 °C. Sie hat einen hohen magnetokalorimetrischen Effekt (MCE), der sich für eine Nutzung zur ferromagnetischen Kühlung anbietet. Ihr ferromagnetischer Übergang findet in nur relativ geringem Abstand oberhalb der Raumtemperatur statt. Das magnetische Moment und die Curie-Temperatur lassen sich in diesem Fall durch einen Hydrierungsprozess steuern. Das Hydrid  $\text{GdTiGeH}$  ist bei 139 °C paramagnetisch; alle ferromagnetischen Wechselwirkungen in  $\text{GdTiGe}$  werden durch die Hydrierung zerstört.

Wissenschaftler aus dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf haben in Kooperation mit der Industrie einen markanten Fortschritt bei der Herstellung ferromagnetischer Halbleiter erzielt. Mit Ionenimplantation und gepulster Laserausheilung gelang es, ein in den Germanium-Halbleiter eingebettetes ferromagnetisches Nano-Netzwerk herzustellen (Bürger et al. 2012).

## 16.7 Versorgungslage mit Germanium-Rohstoffen

Nach der Zukunftsanalyse von aktuellen und potenziellen Ge-Einsatzfeldern empfiehlt sich ein detaillierterer Blick auf das Vorratspotenzial. Die gesicherten Germanium-Reserven weltweit betragen nach Aussagen der BGR (2009) und des US Geological Survey (2011) rund 8.600 t im Jahr. Andere Schätzungen kommen auf 9.000–10.000 t, davon in China 3.650 t, in Russland 2.990 t. Damit verfügen diese beiden Länder über ca. 70 % der gesicherten Reserven. Größere Vorräte werden auch für die DR Kongo (1.000–2.000 t), Namibia (250–500 t) und die USA (450 t) beziffert (Angerer et al. 2009; Erdmann et al. 2011). Etwas unklar sind noch die in den Kohlelagerstätten vermuteten Ge-Ressourcen (China, Russland, Usbekistan: 13.700 t). Unter Addition all dieser Portionen quantifiziert die BGR (2010) die Vorräte auf 27.000 t.

Der Weltverbrauch an Germanium im Jahr 2010 (ähnlich wohl 2011) ist auf 210 t geschätzt worden. Es wird überwiegend für Zukunftstechnologien (= Spitzentechnologien) eingesetzt. Mittelfristig werden weitere Impulse auf die Germaniumnachfrage erwartet. Für die im Jahr 2030 benötigte Menge schwanken die Angaben zwischen 220 t („moderates“ Wachstum) und 540 t („dynamisches“ Wachstum) (Angerer et al. 2009; Erdmann et al. 2011). Deutschland dürfte daran auch künftig mit ca. 20 % beteiligt sein (Abb. 16.19).

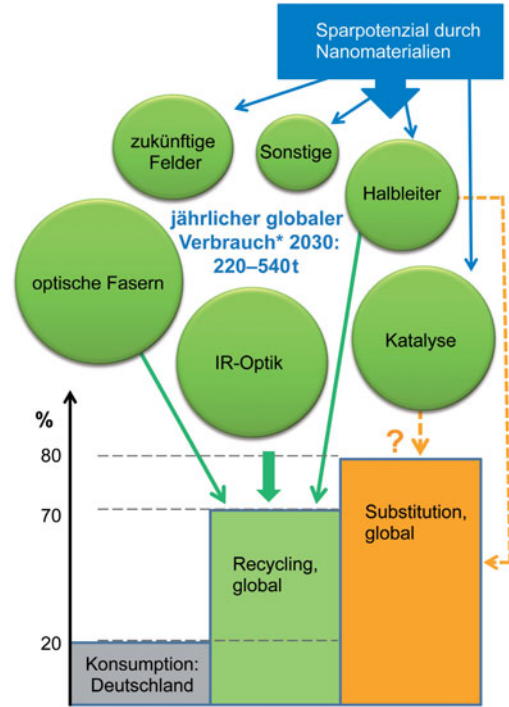


Abb. 16.19 Langzeitprognose zu Germanium-Nachfrage, zu Einsparungen sowie zu globalem Recycling und zur Substitution.  
\*jährlicher globaler Verbrauch der Industrie

Noch sehr unscharf ist der aus der Installation von neuen Zukunftstechnologien zu erwartende Bedarf. Materialeffizienzanalysen für Germanium fehlen in Deutschland bisher. Die Realisierung von Nanotechnologiekonzepten birgt ein wesentliches Sparpotenzial.

Als grundsätzlich wird in Zukunftsstudien des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT)(Angerer et al. 2009; Erdmann et al. 2011) angenommen, dass im Mittel zwischen 60 und 70 % der verarbeiteten Germaniummenge recycelbar sein sollten. Bisher werden aber offensichtlich vornehmlich nur Produktionsabfälle als Edukte für aktuelle Recyclingverfahren eingesetzt, insbesondere was den Glasfasersektor betrifft (allerdings sind auch noch keine großen Faser-Altstoffreserven vorhanden).

Nach Schätzungen im Rahmen einer vor drei Jahren vorgenommenen Recherche werden ca. 30 % des Ge aus Altbeständen gewonnen, wobei es angeblich noch keine Verfahren zur Wiedergewinnung aus Transistoren, Solarzellen, IR-Gläsern gibt (Angerer et al. 2009).

Neu- und Altschrotte von Ge-haltigen Bauteilen für IR-optische Anwendungen sowie Abfälle der Wafer-Produktion ermöglichen ein effektives Recycling, was aktuell wohl auch realisiert wird. Für die Substituierbarkeit von Germanium auf den bisher relevanten Anwendungsgebieten wird in den schon genannten Studien des IZT ein Level von 80 % angegeben. Das aktuelle Ergebnis ist von diesem Limit aber noch weit entfernt. Es bleibt noch viel zu tun!

## Quellenverzeichnis

- Ackermann G (1987) Grundstoff-Verfahrenstechnik und Technische Chemie. Freiburger Forschungsheft A 767, S. 9–16
- Angerer G, Erdmann L, Marscheider-Weidemann F, Scharp MA, Lüllmann A, Handke V, Marwede M (2009) Rohstoffe für Zukunftstechnologien, ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale, S. 87–116; 330–340, Fraunhofer IRB Verlag
- Arroya Torralvo F, Fernández-Pereira C, Compañario M (2010) Recovery of Germanium from Aqueous Solutions by Ion-Exchange Extraction of Its Catechol Complex. *Ind. Eng. Chem. Res.* 49: 4817–4823
- Asian Metals (2008) 2008 Annual Report on Germanium Market, Asian Metals Ltd.
- Bugaris DE, zur Loye HC (2012) Auf der Suche nach neuen Materialien: Kristallzucht von quaternären und höherwertigen Oxiden in Flussmitteln. *Angew. Chem.* 124: 3844–76
- Bürger D, Zou S, Höwler M, Ou X, Kovacs GJ, Reuther H, Mücklich A, Skorupa W, Helm M, Schmidt H (2012) Hysteretic anomalous Hall effect in a ferromagnetic, Mn-rich Ge:Mn nanonet. *Appl. Phys. Lett.* 100: 012406
- Chen MC, Li P, Zhou LJ, Li LH, Chen L (2011) Structure Change Induced by Terminal Sulfur in Noncentrosymmetric  $\text{La}_2\text{Ga}_2\text{GeS}_8$  and  $\text{Eu}_2\text{Ga}_2\text{GeS}_7$  and Nonlinear-Optical Responses in Middle Infrared. *Inorg. Chem.* 50, 24: 12402–12404
- Cheng F, Hector AL, Levason W, Reid G, Webster M, Zhang W (2009) Germanium(II) Dications Stabilized by Azamacrocycles and Crown Ethers. *Angew. Chem.* 121: 5254–5256
- Doddi A, Gemel C, Winter M, Fischer RA, Goedecke C, Rzepa HS, Frenking G (2013) Mit N-heterocyclischem Gallylen stabilisierte niedervalente  $\text{Ge}_2$ - und  $\text{Ge}_4$ -Spezies. *Angew. Chem.* 125: 468–72
- du Mont WW, Gust T, Seppälä E, Wismach C (2004) Dichlorosilylene and dichlorogermylene transfer to alkylidenephosphanes. *Journ. Organomet. Chem.* 689: 1331–36
- Erdmann L, Behrendt S, Feil M (2011) Kritische Rohstoffe für Deutschland (Anhang zum Abschlussbericht von 30.09.2011, IZT und adelphi, Berlin) S. 79–88
- Fan X, Zeng G, LaBounty C, Croke E, Vashae D, Shakouri A, Ahn CC, Bowers JE (2001) High cooling power density SiGe/Si micro-coolers. *Elec. Lett.* 37, 2: 126–27
- Filippou AC, Barandov A, Schnakenburg G, Lewall B, van Gastel M, Marchanka A (2012) Open-Shell Complexes Containing Metal–Germanium Triple Bonds. *Angew. Chem.* 51: 789–793
- Gaudin E, Matar SF, Pöttgen R, Eul M, Chevalier B (2011) Drastic Change of the Ferromagnetic Properties of the Ternary Germanide  $\text{GdTiGe}$  through Hydrogen Insertion. *Inorg. Chem.* 50, 21: 11046–11054
- Geens W (2008) Umicore material solutions for photovoltaic energy. Präsentation S. 28, [http://www.umicore.com/investorrelations/en/news/Publications/presentations/2008/CMD2008/show\\_CMD\\_PV\\_final.pdf](http://www.umicore.com/investorrelations/en/news/Publications/presentations/2008/CMD2008/show_CMD_PV_final.pdf), letzter Zugriff 13.02.2013
- Gerung H, Boyle TJ, Tribby L J, Bunge SD, Brinker JC, Han SM (2006) Solution Synthesis of Germanium Nanowires Using a  $\text{Ge}^{2+}$  Alkoxide Precursor. *J. Am. Chem. Soc.* 128, 15: 5244–5250
- Haustein M (2011) Die Lücke im Periodensystem – Germanium. *Chem. Unserer Zeit* 45: 398–404.



- Hayashi H, Sound HI, Kogyo G (1985) Patent US 4525332
- Hobbs RG, Barth S, Petkov N, Zirngast M, Marschner C, Morris MA, Holmes JD (2010) Seedless Growth of Sub-10 nm Germanium Nanowires. *J. Am. Chem. Soc.* 132, 39: 13742–13749
- Inoue S, Driess M (2011) Stammverbindungen der schweren Methylene: Chemische Tricks zur Erzeugung isolierbarer Komplexe von nicht fassbaren Spezies  $H_2E$  ( $E=Ge$  und  $Sn$ ). *Angew. Chem.* 123, 25: 5728–5730
- Jana A, Ghoshal DD, Roesky HW, Objartel I, Schwab G, Stahlke D (2009) A Germanium(II) Hydride as an Effective Reagent for Hydrogermylation Reactions. *J. Am. Chem. Soc.* 131, 3: 1288–1293
- Jana A, Nekoueisharaki B, Roesky HW, Schulzke C (2009) Stable Compounds of Composition  $LGe(II)R$  ( $R = OH, PhO, C_6F_5O, PhCO_2$ ) Prepared by Nucleophilic Addition Reactions. *Organometallics*. 28, 13: 3763–66
- Katir N, Matiosek D, Ladeira S, Escudie J, Castel A (2011) Stable N-Heterocyclic Carbene Complexes of Hypermetallyl Germanium(II) and Tin(II) Compounds. *Angew. Chem.* 123: 5464–5467
- Klüfers P, Vogler C (2007) Polyol Metal Complexes. Part 55 Germanes with Alkylenedioxy Substituents. *Z. Anorg. Allg. Chem.* 633, 5–6: 908–912
- Kong H, Shi X, Uher C, Morelli DT (2007) Thermoelectric properties of rare earth–ruthenium–germanium compounds *J. Appl. Phys.* 102, 2: 3702/5
- Kriesche G, Thiele U (Zimmer AG) Patent: DE4432839A1 21.03.1996.
- Kuehling K, Haass F (BASF)(2007) Patent: Thermal spraying of Pb/Ge/Te-materials WO 2007/104603
- Kunio S, Akira T, Hiroyuk Y, Masahide H, Shiyozou T, Kouzu K (1985) Patent JP 60166225.
- Lee DC, Pietryga JM, Robel I, Werder DJ, Schaller RD, Klimov VI (2009) Colloidal Synthesis of Infrared-Emitting Germanium Nanocrystals. *J. Am. Chem. Soc.* 131, 10: 3436–3437
- Lehbrink W (2008) Radar-Chips aus SiGe. *Automotive* 3–4, S. 16
- Lignie A, Armand P, Papet P (2011) Growth of Piezoelectric Water-Free  $GeO_2$  and  $SiO_2$ -Substituted  $GeO_2$  Single-Crystals. *Inorg. Chem.* 50, 19: 9311–9317
- Mandal SK, Roesky HW (2012) Group 14 Hydrides with Low Valent Elements for Activation of Small Molecules. *Acc. Chem. Res.* 45, 2: 298–307
- Marco-Lozar JP, Cazoria–Amoros D, Linares-Solano A (2007) A new strategy for germanium adsorption on activated carbon by complex formation. *Carbon*, 45, 13: 2519–2528; (2006) Patent: ES 2257181
- Marco-Lozar JP, Linares-Solano A, Cazorla-Amorós D (2011) Effect of the porous texture and surface chemistry of activated carbons on the adsorption of a germanium complex from dilute aqueous solutions. *Carbon*, 49, 10: 3325–3331
- Mathur S, Shen H, Sivakov V, Werner U (2004) Germanium Nanowires and Core–Shell Nanostructures by Chemical Vapor Deposition of  $[Ge(C_5H_5)_2]$ . *Chem. Mater.* 16, 12: 2449–2456
- Müller S (1993)(Rhône-Poulenc) Patent: Method of producing a polyester, and use of the polyester thus produced. WIPO Patent Application WO/1993/022367
- Nagendran S, Roesky HW (2008) The Chemistry of Aluminum(I), Silicon(II), and Germanium(II). *Organometallics*. 27, 4: 457–92
- Nomiya K, Togashi Y, Kasahara Y, Aoki S, Seki H, Noguchi M, Yoshida S (2011) Synthesis and Structure of Dawson Polyoxometalate-Based, Multifunctional, Inorganic–Organic Hybrid Compounds: Organogermyl Complexes with One Terminal Functional Group and Organosilyl Analogues with Two Terminal Functional Groups. *Inorg. Chem.* 50, 19: 9606–9619
- Panchmatia PM, Orera A, Rees GJ, Smith ME, Hanna JV, Slater PR, Islam MS (2011) Oxygen Defects and Novel Transport Mechanisms in Apatite Ionic Conductors: Combined  $^{17}O$  NMR and Modeling Studies, *Angew. Chem.* 123: 9500–9505
- Park MH, Cho YH, Kim K, Kim J, Liu M, Cho J (2011) Germanium Nanotubes Prepared by Using the Kirkendall Effect as Anodes for High-Rate Lithium Batteries. *Angew. Chem.* 123: 9821–9824

- Raw Materials Supply Group (2010) Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf), letzter Zugriff 13.02.2013
- Rupar PA, Staroverov VN, Ragogna PJ, Baines KN (2008) Cryptand Encapsulated Germanium(II) Dication. *Science*. 322: 1360–1363
- Scoyer J, Guislain H, Wolf HU (2002) Germanium and germanium compounds – resources and raw materials. S. 1–24, In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 6. Auflage, Wiley-VCH Verlag. [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a12\\_351/full](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a12_351/full)
- Seiler O (2005) Beiträge zur Chemie des höherkoordinierten Siliciums und Germaniums: Synthese, Struktur und Eigenschaften dianionischer  $\lambda^6\text{Si}$ -Silicate und  $\lambda^6\text{Ge}$ -Germanate sowie neutraler penta- und hexakoordinierter Silicium-Verbindungen. Dissertation, Universität Würzburg
- Seiler O, Burschka C, Penka M, Tacke R (2002) Dianionic tris[oxalato(2-)]silicate and tris[oxalato(2-)]germanate complexes: synthesis, properties, and structural characterization in the solid state and in solution. *Z. Anorg. Allg. Chem.* 628, 11: 2427–2434
- Seiler O, Burschka C, Penka M, Tacke R (2004) Dianionic complexes with hexacoordinate silicon(IV) or germanium(IV) and three bidentate ligands of the salicylato(2-) type: syntheses and structural characterization in the solid state and in solution. *Silicon Chemistry*. Vol. Date 2002, 1, 5/6: 355–365
- Seng KH, Park MH, Guo ZP, Liu HK, Cho J (2012) Self-Assembled Germanium/Carbon Nanostructures as High-Power Anode Material for the Lithium-Ion Battery. *Angew. Chem.* 124: 5657–5661
- Seppälä E, du Mont WW, Gust T, Manke J, Müller L (2003) Some New Nucleophile-Induced Reactions Involving  $\text{SiCl}_2$ ,  $\text{GeCl}_2$  and  $\text{GeMe}_2$  Transfer In: Norbert A, Johann W (Hrgs) *Organosilicon chemistry — from molecules to materials V*. VCH Weinheim. S. 213–216
- Shiraki Y, Usami N (Hrgs; 2011) *Silicon-Germanium (SiGe) Nanostructures: Production, Properties and Applications in Electronics*. (Woodhead Publishing Series in Optical and Electronic Material) CRC Press, 656 S.
- Singh AP, Roesky HW, Carl E, Stahlke D, Demers JP, Lange A (2012) Lewis Base Mediated Autoionization of  $\text{GeCl}_2$  and  $\text{SnCl}_2$ . *J. Am. Chem. Soc.* 134, 10: 4998–5003
- Summerscales OT, Fetting JC, Power, Philip PP (2011) C–H Activation of Cycloalkenes by Dimetallynes ( $\text{M} = \text{Ge}, \text{Sn}$ ) under Ambient Conditions. *J. Am. Chem. Soc.* 133: 11960–11963
- Tuan HY, Lee DC, Korgel BA (2006) Nanocrystal-Mediated Crystallization of Silicon and Germanium Nanowires in Organic Solvents: The Role of Catalysis and Solid-Phase Seeding, *Angew. Chem.* 118: 5308–5311
- Wang D, Dai H (2002) Low-Temperature Synthesis of Single-Crystal Germanium Nanowires by Chemical Vapor Deposition, *Angew. Chem.* 114: 4977–4979
- Wang JQ, Stegmaier S, Fässler TF (2009)  $[\text{Co}@\text{Ge}_{10}]^{3-}$ : An Intermetalloid Cluster with Archimedean Pentagonal Prismatic Structure, *Angew. Chem.* 121: 2032–2036
- Wang W, Inoue S, Yao S, Driess M (2011) Reactivity of N-Heterocyclic Germylene Toward Ammonia and Water. *Organometallics*. 30, 23: 6490–6494
- Wen CY, Reuter MC, Bruley J, Tersoff J, Kodambaka S, Stach EA, Ross FM (2009) Formation of Compositionally Abrupt Axial Heterojunctions in Silicon-Germanium Nanowires. *Science* 326, 5957: 1247–1250
- Wiggers H (Evonik)(2007) Patent Si/Ge-nanomaterials: DE 10.2007039060.4; (DE 102007039060A1 2009.0219)
- Zhan J, Bando Y, Hu J, Yin L, Yuan X, Sekiguchi T, Goldberg D (2006) Hollow and Polygonous Microtubes of Monocrystalline Indium Germanate. *Angew. Chem.* 118: 234–237
- Ziegenbalg S, Schäffler E (1963) Patent GB 933563

## Kernaussagen

- Germanium verfügt über keine genuinen Erze. Es wird immer als Begleitkomponente gewonnen.
- Germanium besitzt großes technologisches Anwendungspotenzial in der Katalyse, Lichtwellenleitertechnik sowie neuen energieeffizienten Halbleitermaterialien.
- Die Chemie des Germaniums ist noch nicht vollständig ausgelotet. Neue Komplexverbindungen weisen mögliche Wege für effiziente Gewinnungs- und Recyclingsstrategien.
- Germanium wird bislang nahezu ausschließlich aus Primärrohstoffen erzeugt. Die Konzentration der Primärreserven auf zwei Länder zwingt zur Entwicklung von Recyclingverfahren.
- Ohne die aktive Einbeziehung der Chemie lassen sich keine zukunftssträchtigen Lösungen für den ressourcenschonenden Einsatz von Rohstoffen und Materialien finden.

# 17 Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge

Ein Rück- und Ausblick mit  
einer Prise Phantasie . . .

Jörg Matschullat

## 17.1 Die Herausforderung

Was nutzt die beste Idee zum Bau einer neuen Technik, wenn die dafür notwendigen Rohstoffe entweder unerschwinglich oder erst gar nicht in ausreichender Menge verfügbar sind? Was bedeutet technologische Führerschaft, wenn nicht mehr vorgeführt werden kann, dass neue Ideen auch dem harten Test der Wirklichkeit standhalten? Derartige Fragen provozieren und sind doch keine vollkommen absurde Phantasie. Schon mehrfach in der Geschichte menschlicher Kulturen sind Gesellschaften an Grenzen gestoßen, die mit der Verfügbarkeit von Ressourcen verbunden waren – und mit der Unfähigkeit, sich rechtzeitig an andere Rahmenbedingungen anzupassen (Diamond 2005). Auch deshalb geht es hier um strategische Rohstoffe und um Risikovorsorge.

Vieles unterscheidet sich heute grundlegend von den Paradigmenwechseln früherer Zeiten. Niemals gab es eine auch nur annähernd so große Menschheit – mit einem entsprechenden Ressourcenbedarf. Auch gab es bislang keine wirklichen globalen Herausforderungen, sondern im Wesentlichen regionale Konflikte, Probleme und Lösungen. Doch mit der Globalisierung, deren wirtschaftliche Realität einer erkenntnistheoretischen Reise folgte, die mit den ersten Satelliten seit dem Sputnik-Start im Oktober 1957 ihren Anfang nahm, erkennen und erleben wir nicht nur wirtschaftlich, sondern vor allem wissenschaftlich das System

Erde – und sind die erste Generation, die nahezu in Echtzeit Prozesse und (anthropogene) Rückkopplungen in diesem System beobachten kann. Dabei sind wir (leider) noch weit davon entfernt, das System wirklich vollumfänglich zu durchschauen, wenngleich die Entwicklungen bemerkenswert sind und uns zunehmend erlauben, große Erkenntnisfortschritte zu machen (Cornell et al. 2012).

Zu diesen Erkenntnissen gehört auch, dass wir Menschen weiterhin auf primäre Rohstoffe angewiesen sind und auf absehbare Zeit sein werden und dass wir zugleich aus mehreren Gründen das Potenzial sekundärer Rohstoffe ausschöpfen lernen müssen. Dabei ist das, was im deutschsprachigen Raum als Standard wahrgenommen wird (z.B. Duales System Deutschland, DSD), weltweit keineswegs als normal zu betrachten (wenngleich es eine steigende Tendenz gibt, analoge Systeme aufzubauen). Zugleich erkennen wir zunehmend und weltweit, dass sowohl die Ressourcenrückgewinnung (Recycling) als auch die primäre Gewinnung nicht auf Kosten der Umwelt bzw. der Schutzgüter Wasser, Boden und Luft erfolgen darf, sondern sowohl umwelt- als auch sozialverträglich zu sein hat, also nach der Brundtland'schen Definition „nachhaltig“. Dazu gibt es inzwischen nicht nur Ideen, sondern erste Vorbilder, die weiter unten konkreter angesprochen werden.

Ein solcher Nachhaltigkeitsanspruch ist sicherlich leichter formuliert als getan, und je nach persönlicher Disposition können Betrachter

zu eher pessimistischen oder auch optimistischen Ausblicken neigen. Die Herausgeber dieses Buches versuchen seit vielen Jahren, einen realistischen Blick auf die Wirklichkeit zu werfen und neben der Sachstandsanalyse Anregungen und einen Ausblick auf Potenziale und Möglichkeiten zu geben – was nach unserer Meinung in der üblichen öffentlichen Diskussion eher zu kurz kommt. So ist auch dieser Band entstanden, der seinerseits in vier Teile mit jeweils mehreren Beiträgen gegliedert ist:

- I Rohstoffwirtschaft,
- II Primäre Rohstoffe,
- III Sekundäre Rohstoffe und Recycling sowie
- IV Verarbeitung und Produkte.

Damit schließt er unmittelbar an das von denselben Herausgebern publizierte Werk mit dem Titel *„Energie und Rohstoffe. Gestaltung unserer nachhaltigen Zukunft“* an (Kausch et al. 2011), fokussiert jedoch auf strategische Elemente und lässt Energierohstoffe nur implizit aufscheinen.

## 17.2 Eine Nachlese

Strategische Elemente bzw. Rohstoffe sind ein relativer Begriff. Für verschiedene Gesellschaften sowie zu unterschiedlichen Zeiten sind es jeweils andere Rohstoffe, die für uns Menschen strategische Bedeutung haben bzw. hatten. Es ist eine wesentliche Aufgabe von Rohstoffwirtschaft, die Verfügbarkeit von Rohstoffen zu sichern. Dies ist keineswegs trivial, wie auch die Beiträge im ersten Teil anschaulich verdeutlichen.

### I Rohstoffwirtschaft

Substitution von Rohstoffen ist nicht neu (► Kap. 1 von Liselotte Schebek und Beatrix Becker), sondern eine in der gesamten Menschheitsgeschichte praktizierte Herangehensweise, um Mangel auszugleichen. Dabei wirft die heute viel komplexer gewordene glo-

bale gegenseitige Abhängigkeit von Handels- und Wirtschaftsgeflechten zusätzliche Herausforderungen auf und erschwert ein aus rein technischer Sicht rationales und ressourcenschonendes Vorgehen. Letzteres bestätigt der Beitrag von Bertrand Demotes-Mainard aus Sicht eines großen Unternehmens (► Kap. 2). Er zeigt, dass die tiefe Spezialisierung gerade im Hightech-Bereich der Industrie nachgerade dazu zwingt, sehr komplex und auf mehreren Ebenen (Wissenschaft, Politik und Wirtschaft) zugleich zu denken und zu handeln, um die Anforderungen der jeweiligen Produktlinien und deren technischer Verwirklichung erfüllen zu können. Zugleich illustriert der Beitrag, dass zumindest mittelfristig intelligente Lösungen möglich sind – und zugleich Bausteine für zukünftige Herausforderungen jenseits von Firmeninteressen entstehen; zum Beispiel das *Thales Component Information System*, das sowohl der firmeninternen Ressourcenoptimierung dient als auch eine wesentliche Voraussetzung für ein später effizientes Recycling darstellt. Reinhard Bütikofer diskutiert einen weiteren, sehr wesentlichen Aspekt, die Bedeutung der internationalen Kooperation auf dem Gebiet der Rohstoffpolitik (► Kap. 3). Statt Feind- und Zerrbilder aufzubauen (deren oft grausames und langfristiges Unheil mit sich bringende Konsequenzen wir in Europa nur zu gut kennen sollten) sind wir klug beraten, uns im Dialog und auf Augenhöhe um Lösungen zu bemühen. Auch unterschiedliche ethische Wertvorstellungen dürfen nicht zur Entschuldigung dienen, andere Systeme zu verteufeln oder auch nur zur innenpolitischen Propaganda zu nutzen. Ebenso wie die Substitution wird Effizienzsteigerung als ein Weg gesehen, reale oder vermeintliche Ressourcenverknappungen zu umgehen oder zumindest wesentlich hinauszuzögern.

Standardisierung von Produkten und technologischer Fortschritt werden von Andreas Dirk Wiek als ein Weg gesehen, solchen Verknappungen zu begegnen (► Kap. 4). Dennoch müssen wir den Gedanken an uns heranlassen, dass wir Menschen über unsere gesamte Geschichte Effizienzgewinne eher nicht in ein



„Weniger“ an Nutzung bzw. Dispersion investiert haben, sondern in ein „Mehr“ und noch breitere Anwendungen.

Der abschließende Beitrag dieses ersten Teils, von Roland Mauss und Peter Posch, widmet sich vor allem den Marktpreisrisiken rohstoffintensiver Unternehmen (► Kap. 5). Ihre Beschreibung auch der Nutzung finanztechnischer Instrumente erklärt sehr gut, wie eng vernetzt inzwischen die Ressourcenwirtschaft im engeren Sinne, d.h. Bergbau und Produktion, mit der Ressourcenwirtschaft im weiteren Sinne, also Kapitaldienstleistern und Investoren ist. Diese Tatsache, die letzten Endes wiederum nicht neu ist, nur in ihrem Finanzumfang über die vergangene Dekaden deutlich anwuchs, führt zu weiteren Risiken, die von der Primärwirtschaft weitgehend entkoppelt sind.

Besonders anzusprechen ist hierbei das Auseinanderdriften von Anspruch der Gesellschaft (Produktnachfrage) und Liefermöglichkeiten der Industrie (Bergbau). Während erstere, einschließlich der (Konsumgüter-)Industrie in Quartalen und wenigen Jahren denken und operieren, bemisst sich der Planungs- und Gestaltungshorizont Letzterer in Dekaden. Dass es angesichts einer solchen zeitlichen Entkoppelung zu wirtschaftlichen Problemen kommen kann (und kommt), vermag kaum zu überraschen. Hier sind wir als Gesellschaft sicherlich gut beraten, nicht zu verdrängen, wo die von uns geschätzten Produkte herkommen und uns mittel- bis langfristig auf eine andere Art des Wirtschaftens einzustellen (Patel 2010). Dies wird auch im dritten Teil dieses Buches noch einmal explizit angesprochen.

## II Primäre Rohstoffe

Seltene Erden, Lithium und Elemente wie Gallium, Germanium und Indium gehören zu den strategischen Elementen und stehen im Fokus des zweiten Teils. Jens Gutzmer und Andreas Klossek stützen sich in ihrer Analyse auf die Kritikalitätsmatrix, die Bradshaw et al. (2013)

kritisch diskutieren und nutzen Gallium und Indium für eine vertiefte Diskussion (► Kap. 6). Deutlich wird in ihrer Arbeit die Begrenztheit des jeweiligen Zeithorizontes. Wie in den Diskussionen im ersten Teil bezieht sich ein Großteil der Aussagen auf Zeithorizonte weniger Jahrzehnte. Das ist durchaus sinnvoll, weil in dieser zeitlichen Dimension einerseits Investitionen getätigt und Primärproduktionsmengen beeinflusst werden – mit den entsprechenden Rückwirkungen auf Produktentwicklung und Vertrieb. Ein Blick um wenige Jahrzehnte zurück zeigt deutlich, welche Dynamik in jedem Teil der Wertschöpfungskette allein in solchen relativ kurzen Zeiträumen auftritt – was deutlich längerfristige Aussagen nicht nur schwierig, sondern teilweise sogar riskant – sowie in jedem Fall eher von rein akademischem Interesse macht.

Am Beispiel Lithium gibt Wolfgang Voigt einen sehr breiten und eindrucksvollen Überblick sowohl zu den diversen Vorkommen und den Herausforderungen ihrer Gewinnung als auch zu den sehr unterschiedlichen gesellschaftspolitischen Randbedingungen in den derzeitigen Lieferländern (► Kap. 7). Analog zu weiteren strategischen und auch derzeit nicht strategischen Rohstoffen zeigt die Arbeit, dass für absehbare Zeit und auch bei steigendem Bedarf keine Verknappung von Lithium zu erwarten ist.

Dudley Kingsnorth berichtet über den globalen Markt der Seltenen Erden (► Kap. 8), ein Schwerpunktthema dieses Bandes. Dabei weist er auf die besondere Herausforderung hin, effiziente Trennverfahren der einzelnen Seltenerdelemente (SEE) zu entwickeln, um die teilweise noch sehr suboptimale Extraktionseffizienz aus den komplexen Erzen zu erhöhen. Dies ist vor allem deswegen so aufwendig, weil praktisch für jede einzelne Lagerstätte eine „maßgeschneiderte“ Lösung zu finden ist.

Die Seltenen Erden stehen ebenfalls im Mittelpunkt des Beitrages von Helmut Mischo, doch jetzt im Detail an den Herausforderungen eines sich entwickelnden Landes illustriert (► Kap. 9). Ohne qualifizierte Fachkräfte, ohne eine gute technische Infrastruktur

vor Ort (Energieversorgung, Transportwege, Werkstätten, Gesundheitsversorgung, etc.) sind auch reiche Rohstoffvorkommen zunächst einmal wenig geeignet, die Entwicklung eines Landes zu befördern. Dennoch gilt es zugleich, die Techniken der Erkundung, des Abbaus und der Rohstoffverarbeitung weiter zu verbessern, weniger Energie und Schutzgüter zu verbrauchen bzw. zu belasten und zugleich geringere Wertstoffkonzentrationen effizient zu gewinnen.

Damit befasst sich Duncan Large im Hinblick auf die Erkundung (► Kap. 10). Vor dem Hintergrund relativ weniger wesentlicher Neuentdeckungen von Lagerstätten zeigt er Forschungsbedarf auf und motiviert, die inzwischen zumindest im akademischen Bereich bekannten und vorhandenen neuen Techniken in Geochemie, Geophysik und Mineralogie stärker in die Explorationspraxis zu führen.

Hier sieht der Verfasser dieses abschließenden Kapitels eine wesentliche Diskrepanz in Deutschland zwischen den sachlichen Notwendigkeiten exzellenter Ausbildung (die einer hervorragenden Forschungsinfrastruktur bedarf) als unerlässliche Voraussetzung für eine wirklich kompetente Zukunftssicherung und der aktuellen Realität. Kurzfristige „Exzellenzfeuerwerke“ werden dieser Herausforderung definitiv ebenso wenig gerecht wie die künstliche Trennung in „Ausbildungs-“ (= Universitäten) und Forschungsstätten (wie Max-Planck-, Helmholtz-, Leibniz-, Fraunhofer und Blaue Liste-Institute und Zentren).

### III Sekundäre Rohstoffe und Recycling

Der dritte Teil befasst sich mit sekundären Rohstoffen und Recycling. Wie bereits oben angesprochen, liegt hierin eine bei Weitem nicht ausgereizte Möglichkeit, sowohl die Reichweite primärer Rohstoffe zu verlängern als auch mit potenziell geringerem Energieaufwand hoch-

wertige Materialien zu gewinnen und einer neuen Nutzung zuzuführen. Dafür wird heute oft der Begriff „*Urban Mining*“ genutzt, weil in den Städten der Welt, in denen heute mit steigender Tendenz deutlich mehr als 50 % der Weltbevölkerung leben, so viele Wertstoffe zwischengespeichert sind, dass ihre Verwendung nicht nur sinnvoll, sondern in vielfacher Weise geboten ist.

Christian Hagelüken mahnt die Entwicklung und Anwendung besserer Technologien an, um den maximalen Wiederverwertungswert aus Altmaterial aller Art zurückzugewinnen zu können (► Kap. 11). Dabei zeigt er, was bereits heute als beste verfügbare Technologie vorhanden ist, und zugleich argumentiert er analog zu Andreas Wiek für ein klügeres Produktdesign, das bereits bei der Herstellung konsequent die Erfordernisse der späteren Wiederverwertung berücksichtigt.

Wolfram Palitzsch und Ulrich Loser zeigen diese Herausforderungen am Beispiel des Recyclings von Photovoltaik-Produkten und ziehen Querbezüge zur effizienteren Rückgewinnung von Seltenerdelementen aus entsprechendem Metallschrott (► Kap. 12). Die grundsätzliche Botschaft dahinter lautet, den Begriff „Abfall“ in letzter Konsequenz aus dem Wortschatz zu tilgen und stattdessen die Wertstoffe in dem nicht mehr genutzten oder nutzbaren Material zu sehen.

Dies führen Harald Weigand und Martin Bertau, konsequent durchdacht, an einem äußerst kreativen Beispiel der erfolgreichen Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen vor (► Kap. 13). Die größten Herausforderungen lagen dabei beinahe weniger in der Entdeckung einer überzeugenden technischen Lösung als vielmehr im Überwinden bürokratischer Hürden bei der gedanklichen Transformation eines „Abfallstoffes“ (Klärschlamm) in ein Produkt für die Landwirtschaft (Düngemittel). Solche Hürden der „Blindheit“ gegenüber kreativen Innovationen bestehen leider in vielfältiger Form sowie auf zahlreichen Feldern und stehen entsprechend diversen real möglichen Verbesserungen im Weg.

## IV Verarbeitung und Produkte

Der vierte und letzte Teil dieses Buches widmet sich dem Ende der Wertstoffkette vor einer Wiederverwertung, nämlich Verarbeitung und Produkten. David Kennedy diskutiert in Fortsetzung der obigen Diskussion von Dudley Kingsnorth die Aufbereitung und Verarbeitung von Seltenerdelementen (SEE, ► Kap. 14). Dabei differenziert der Beitrag die sehr verschiedenen Produkte, in denen SEE verarbeitet werden – allein dies wohl ein Augenöffner für Viele, die sich sonst nicht die Frage stellen, was denn so in ihren alltäglich genutzten Produkten steckt.

Patrick Taylor dagegen unterzieht die Aufbereitungstechniken mineralischer Rohstoffe einer grundsätzlichen Bestandsaufnahme (► Kap. 15). Dabei unterscheidet er zwischen dem Bedarf an Wasser und Energie mit den damit verbundenen Umweltbelastungen einerseits, sowie andererseits den Notwendigkeiten der weiteren Entwicklung intelligenter Modelle, die sehr zum Ressourcenschutz beitragen können, den Möglichkeiten der (teil-)automatisierten quantitativen Mineralogie und den besonderen Anforderungen der Trennverfahren für kritische Materialien.

Der abschließende Beitrag von Gerhard Roewer verdeutlicht am Beispiel der modernen Germaniumchemie die heute bereits möglichen und öffentlich kaum bekannten Chancen und technischen Entwicklungslinien strategischer Elemente (► Kap. 16). Zugleich wird deutlich, welches weitere Potenzial noch zu schöpfen ist und welche Wissenslücken zu schließen sind, um Elemente wie Germanium, die nicht in eigenen Mineralen auftreten, möglichst vollständig aus den Primärerzen ebenso wie später aus Produkten zu gewinnen und zugleich die Eigenschaften des Elementes optimal für intelligente Anwendungen nutzen zu können. Es gibt also wenig Grund zum Schwarzsehen, sondern vielmehr die Notwendigkeit, weiterhin kreativ und mit vorausschauender Umsicht intelligente Lösungen zu entwickeln.

## 17.3 Was haben wir gelernt und wo stehen wir?

Lässt man diesen Band Revue passieren, dann ist klar geworden, dass der Ressourcenbedarf einer nach wie vor wachsenden Menschheit für absehbare Zeit nicht mit einem noch so guten Recycling allein zu decken ist. Wir brauchen also weiterhin primäre Rohstoffe und dies bis auf Weiteres in eher steigenden Mengen. Trotz anzunehmenden technologischen Innovationen und Materialeinsparungen, trotz Substitution wird Bergbau weiterhin eine Zukunft haben (müssen), auch wenn weltweit zunehmend weniger Toleranz und Passivität dem traditionellen Bergbau begegnen und Bürger nicht nur in den „alten“ Industrienationen Europas und Nordamerikas, sondern auch in afrikanischen, asiatischen und lateinamerikanischen Ländern zunehmend (und zu Recht) kein Verständnis mehr aufbringen wollen für eine Ressourcenwirtschaft, die zukünftigen Generationen Lasten aufbürdet und die Umwelt belastet.

Die Wirtschaftskrise seit 2008 – denn überwunden ist sie nicht – hat zumindest in den Köpfen vieler Akteure, von Alan Greenspan bis zu zahlreichen Staatsoberhäuptern erstmals die Dogmen eines Großteils der Wirtschaftswissenschaftler erschüttert, dass „der Markt“ es schon richten werde. Das berühmt-berüchtigte Buch von Raj Patel (2010) *„The Value of Nothing. Was kostet die Welt?“* legt dazu beredt Zeugnis ab, und die teilweise harschen Reaktionen darauf zeigen, dass es offensichtlich einen Nerv getroffen hat.

Doch es ist nicht die Ressourcenwirtschaft per se, die für diese Wirtschaftskrise verantwortlich ist; eine Wirtschaft, die reale Werte schafft und in diesem Sinne sehr konservativ strukturiert ist – auch wenn es längst Spieler am Rande der primären Ressourcenwirtschaft gibt, die mit den „commodities“ handeln und in nicht wenigen Fällen eher für unangemessene Preisschwankungen und künstlichen Mangel oder Überschüsse sorgen. Mit diesen Aberrationen des Marktes fügen sich die

Gesellschaften Schaden zu – denn Bergbau bzw. die Wertschöpfungskette der Ressourcenwirtschaft ist kein sprunghaftes Unternehmen, sondern basiert von vornherein auf Jahrzehnte hin angelegten Investitionen.

Diese Situation wird absehbar zukünftig noch schärfer insofern, als der Zugang zu primären Rohstoffen zunehmend sowohl einen höheren und aufwendigeren Technisierungsgrad verlangt, zugleich (wiederum zu Recht) strengeren Umweltkontrollen unterliegt und auf Gesellschaften trifft, die immer weniger bereit sind, Kompromisse im Hinblick auf zukünftige Folgelasten einzugehen. (Dabei wäre es nicht nur wünschenswert, sondern wird erforderlich, dass die Gesellschaften in Konsequenz dieser berechtigten Wünsche auch bereit sind, ihr Konsumverhalten zu verändern und in längeren Zyklen zu denken – und zu handeln). Zugleich wäre ein (auch technologisches) „Weiter so“ gleichbedeutend mit einer anderen Herausforderung – der Kritikalität (auch kostenseitig) ausreichender Energieversorgung. Denn Bergbau und die folgende Wertschöpfungskette sind darauf angewiesen, ihren Energiebedarf möglichst störungsfrei decken zu können (► z. B. Kap. 9 am Beispiel Namibias). Unabhängig davon, wie optimistisch jemand diese Kritikalität mittel- bis längerfristig betrachtet, dürfte es wenig Dissens dahingehend geben, dass die Verfügbarkeit von Primärenergie ebenso wichtig ist bzw. sein wird wie das Vorhandensein ausreichender Mengen an (mineralischen) Rohstoffen (Bardi 2013: 155; Bradshaw et al. 2013).

Vor diesem Hintergrund deuten sich mehrere Handlungsstränge an, die im Folgenden angesprochen werden. Unter Anerkennung der weiteren und vermutlich auf lange Zeit eindeutigen Notwendigkeit von Erkundung, Bergbau und Aufbereitung von Rohstoffen, um eine wachsende Weltbevölkerung mit Gütern versorgen zu können, steht zugleich die Forderung, dass dies umwelt- und sozialverträglich zu geschehen hat (Wäger et al. 2012). Denn parallel zu dieser Anerkennung steht eine weitere Erkenntnis – die von grundsätzlich endlichen Ressourcen, zu denen nun auch die Schutz-

güter Luft, Boden und Wasser zu zählen sind. Überspitzt ausgedrückt können wir Menschen sicherlich ohne Mobiltelefone und Automobile leben, doch kaum ohne saubere Luft und sauberes Wasser sowie fruchtbaren Boden.

Eines der größten Hindernisse, die wir uns selbst aufstellen, ist unsere dominante Fixierung auf ein mehr oder minder lineares Denken (z. B. Leggewie u. Welzer 2010). Wir behaupten zwar von uns selbst, rationaler Akteur zu sein, doch bei genauerer Analyse stellt sich meist schnell heraus, dass diese Ratio die komplexe Wirklichkeit nur ausschnittsweise wahrnimmt und im wahrsten Sinne einer Art von Pippi-Langstrumpf-Philosophie frönt, die sich bekanntlich die „Welt so macht, wie sie ihr gefällt“. Diese Mischung aus kindlicher Hybris, Naivität und Sturheit bzw. auch Verdrängung der komplexen Wirklichkeit bremsst oder verhindert kreatives Denken und Phantasie und begnügt sich mit einem „Weiter so“. Damit stehen wir uns selbst im Weg und machen es zusätzlich denjenigen besonders schwer, die in der Lage sind, komplexer, kreativer und „um die Ecke“ zu denken. Im besten Fall verlieren wir so lediglich Zeit.

Doch wäre es auch naiv zu glauben, dass es ausschließlich solche Einschränkungen im Denken sind, die dazu führen, sogar bekannte Alternativen nicht sehen oder nutzen zu können. Denn stets ist auch die Frage zu stellen „cui bono?“, wem dient es denn, wenn alte Wege weiter beschritten werden, wenn es keine Kursänderung gibt. In vielen Fällen genügt es sogar, die Frage zu stellen, wer daran verdient (Orestes u. Conway 2011).

Beide Wege beschreiben gesellschaftliche und menschliche Normalzustände und Konflikte, die es seit vielen Generationen gibt – vermutlich seit sich *Homo sapiens sapiens* entwickelt hat. Und umgekehrt liegt ja auch die Beweislast, dass ein anderer Weg besser, klüger, eher zielführend sei und mehr im Interesse der Allgemeinheit liegt, bei denjenigen, die eine Änderung verfolgen und behaupten, die besseren Lösungen zu haben.



## 17.4 Neue Wege in die Zukunft von Bergbau?

Die Seite 1 in diesem Band zeigt ein Bild der Phoenix Mine bei Skouriotissa auf Zypern. Hier wird eine Lagerstätte seit 2.000 Jahren nahezu kontinuierlich abgebaut ([http://www.cyprusgeology.org/english/3\\_4\\_mineral.htm](http://www.cyprusgeology.org/english/3_4_mineral.htm)). Das ist außergewöhnlich, und dennoch lässt sich an diesem Beispiel etwas veranschaulichen. In der Vor- und Frühgeschichte konnten wir Menschen nur einige wenige Minerale abbauen und sehr wenige Elemente real verarbeiten. Bergbau war sehr selektiv und trennte vor Ort die Wertbestandteile vom Rest ab. Das nicht nutzbare Material, der Abraum, den wir zum Teil noch heute in Bergbauregionen der Welt vielgestaltig antreffen können, war relativ gering. Mit zunehmenden Kenntnissen und der Technologieentwicklung stieg die Zahl der nutzbaren Minerale und damit auch der verarbeitbaren Elemente an; besonders rasant erst ab dem 20. Jahrhundert. Die Abraummenngen wurden nicht geringer, einfach weil die abgebauten Materialmengen stiegen und weil zunehmend geringer konzentrierte Erze abgebaut wurden. Zugleich erschienen Land und Umwelt „unendlich“, und trotz bereits existierender Erfahrung mit Ressourcenverknappung gelang es bislang noch fast jeder Generation, diese Gedanken zu verdrängen. Unabhängig davon, dass das konkrete Beispiel der Phoenix Mine als Tagebau mit potenziell größeren Umweltrisiken verbunden ist als beispielsweise der ebenfalls viele jahrhundertealte Untertage-Bergbau im Rammelsberg bei Goslar, geht es heute darum, einen ressourcenschonenden Abbau zu betreiben. Damit ist sowohl gemeint, ein Maximum an Wertstoffen abzubauen und zu verwerten und zugleich den Bergbau in einer Weise zu betreiben, die einen minimalen ökologischen Fußabdruck hinterlässt.

Heute leben wir im Anthropozän (Crutzen 2011), dem Zeitalter, in dem wir Menschen das Gesicht der Erde sehr wesentlich beeinflussen – zum Teil nach wie vor, ohne alle Konsequenzen

überblicken oder gar erkennen zu können. In Analogie zu Energieversorgungsfragen sind wir sicherlich auch deshalb gut beraten, nicht allein bestimmten einzelnen Formen von Bergbau und Rohstoff-Verarbeitung gegenüber anderen Möglichkeiten den absoluten Vorrang einzuräumen. Stattdessen ist es wohl anzuraten, alle möglich (erscheinenden) Wege zu prüfen und zumindest auszuprobieren, sofern dies nicht mit allgemein als absurd zu bezeichnenden Risiken verbunden ist. Nur so lassen sich mit gewisser Wahrscheinlichkeit optimale Lösungen (für den jeweiligen Stand von Technik und Erkenntnis) finden. Dabei wird schnell deutlich, dass selbst eine solch harmlose Empfehlung bereits Widerspruch provoziert, allein, weil darin im Sinne Ernst Friedrich Schumachers bereits eine Bedrohung zentralistischer Macht gesehen werden kann (Schumacher 2013).

So motivierte kürzlich in Freiberg Professor Robin Batterham, leitender Kopf von Rio Tinto, doch mutiger zu sein bei der Bearbeitung ungewöhnlicher und risikoreicher Pfade. Er hielt zur Einweihung des Biohydrometallurgischen Zentrums Freiberg (BHMZ) den Plenarvortrag und lobte dabei ausdrücklich das große private Engagement der Krüger-Stiftung für ein Projekt, dessen Erfolg erst nach mehreren Jahren erkennbar werden kann ([http://tu-freiberg.de/presse/aktuelles/aktuelles\\_detail.html?Daten\\_satz=1758](http://tu-freiberg.de/presse/aktuelles/aktuelles_detail.html?Daten_satz=1758) und <http://tu-freiberg.de/forschung/bhmz-3>). In diesem Buch haben wir Substitution und Ressourceneffizienz ebenso diskutiert wie die Notwendigkeit von mehr und klügerer Erkundung und besserer Aufbereitung. Zum eigentlichen Bergbau und den damit verbundenen Technologien dagegen war praktisch kaum die Rede. Doch müssen im Jahr 2050 unbedingt Bergleute in Schächte und Tunnel? Ist es nötig, dass Übertage Bergehalden und stetig wachsende Absatzanlagen (*Tailings*) Flächen in Anspruch nehmen und zugleich durch Flugstaub, Lärm und Sickerwässer ihre Umgebung beeinträchtigen?

*Bioleaching* oder *Heap Leaching* (mikrobielle Erzlaugung) sind keine neuen Begriffe. Bereits vor mehr als 2.000 Jahren wurde diese Technik in



China praktiziert (Ehrlich 2001). Doch bis heute findet dies Übertage statt und wird durchaus effektiv auf aufgehaldetes Material angewendet. Stellen wir uns nun einen Bergbau vor, bei dem an der Oberfläche weder Halden noch Absetzanlagen, ja selbst kaum mehr flächenversiegelnde Großanlagen zu sehen sind. Auf kleinen Flächen stehen Anlagen, die als Schnittstelle zwischen tief im Untergrund ablaufenden Prozessen und an geeigneten Orten befindlichen Kapazitäten zur weiteren Reinigung von Reicherzlösungen stehen. Diese Lösungen wurden von Bakterien im tiefen Untergrund direkt aus dem vererzten Gestein gelöst, denn nahe der Erdoberfläche wird es zunehmend schwieriger, reiche Vorkommen zu finden.

Bei der kontinentalen Tiefbohrung auf der Kola-Halbinsel (Russland) von 1970 bis 1989 fand man in mehr als 10 Kilometern Tiefe lebende Bakterien an, die nicht von der Oberfläche eingeschleppt worden waren. Über Tiefbohrverfahren können Wegsamkeiten geschaffen werden, um gezielt wertstofflösende Bakterien in den Untergrund einzubringen und zugleich deren Wohlbefinden kontrolliert zu optimieren, um maximale Ausbeuten der gesuchten Komponenten zu erreichen. Denn bestimmte Bakterien nutzen den metabolischen Zersatz von Mineralen und setzen dabei von uns Menschen erwünschte Elemente in Lösung frei. Da die zirkulierenden Lösungen im geschlossenen Kreislauf geführt werden können (die Technik dazu ist bekannt), sollte das Vorgehen grundsätzlich möglich sein. Doch bevor in sehr große Tiefen vieler Kilometer der Erdkruste vorgedrungen werden wird, müssen Versuche unter realistischen Bedingungen in wenigen Hundert Metern Tiefe zeigen, dass die grundsätzlichen Ansätze und Ideen funktionieren. Dabei gehört neben bohrtechnischen, bergbaulichen, (bio-)geochemischen, hydrogeologischen und mikrobiologischen Arbeiten auch eine Reihe anspruchsvoller ingenieurtechnischer Arbeiten zu Aufbereitungstechnik und Maschinenbau dazu, um die Gewinnungskette zu voller Funktionalität (und Sicherheit) zu entwickeln.

Dass diese Ideen kein Wolkenkuckucksheim sind, zeigen Arbeiten zum Beispiel auch in Japan, wo der Verfasser jüngst sehr ähnliche Versuche beobachten durfte. Dort liefert geothermische Energie zugleich potenziell so hohe Energiemengen, dass damit der gesamte Produktionsstrang betrieben werden könnte. Interessanterweise setzt das Land dennoch nach wie vor eher auf Nuklearenergie, obgleich es bereits eine Reihe beachtlicher und sehr leistungsfähiger Geothermalkraftwerke gibt.

Im Ergebnis würde der Bergbau der Zukunft gezielt Wertstoffe aus größerer Tiefe an die Tagesoberfläche bringen, aus den Erzen gelöst durch Bakterien und gestützt durch Robotik, gefördert über Pumpen in quasi geschlossenen Systemen. Wasser wird im Kreislauf gefahren, und ein Teil der nötigen Energie wird direkt aus den geothermischen Gradienten gewonnen. Die geförderten Lösungen gehen Übertage in eine chemische Trennung, in der die Wertstoffe direkt abgetrennt und weiter verwertet werden. Sollten diese Anstrengungen belohnt werden, dann wird Bergbau in einer absehbaren Zukunft bislang unerreichbare Lagerstätten allein mittels Robotik und mikrobieller Aktivität „abbauen“ und lediglich wertstoffreiche Lösungen an die Oberfläche transportieren, wo die einzelnen Komponenten dann über Trenn- und Fällungsprozesse in die Festphase überführt und der weiteren Nutzung als reiner Rohstoff zugeführt werden.

Das ist Ihnen zu viel Phantasie? Geben Sie doch einmal die Stichworte „*Future Mining*“ bei Ihrer Suchmaschine im Internet ein, und Sie werden vermutlich überrascht sein, dass wir nicht die einzigen sind, die an diesen Konzepten aktiv arbeiten.

Zum Abschluss sei deshalb ein Beispiel angesprochen, das zwischen diesen „Zukunftsphantasien“ und dem traditionellen Bergbau steht – und Ende des Jahres 2013 seine Produktion aufnehmen wird: die Grube Niederschlag im Erzgebirge (<http://www.lapis.de/aktuelles/neuigkeiten/45-premiere-neuer-fluoritbergbau-im-saechsischen-erzgebirge-012011>). Basierend auf einer alten Grube, die im Tiefbau

betrieben wurde, konnte das Bergwerk neu aufgewältigt und mit moderner Technik unter Tage ausgestattet werden. Dafür galt es, sozusagen maßgeschneiderte Technik nach Untertage zu verbringen und zu installieren – ein echtes „Designer-Bergwerk“ zu erfinden. Mit der folgenden Bergbauphase wird es keine Halden oder Absetzteiche mehr geben. Das primäre Erz wird Untertage zerkleinert und aufbereitet; der nicht nutzbare Abraum verbleibt Untertage und verfüllt dort die entstandenen Hohlräume. Die Übertageanlagen sind eher klein und unauffällig, und das Untertage gewonnene Vor-Konzentrat wird Übertage per Bahn oder LKW in die nächste Hütte transportiert (Nickelhütte Aue). Anwohner im dicht besiedelten Erzgebirge werden weder Erschütterungen noch Lärm oder Staubbelastung zu befürchten haben, wenn der Betrieb ordnungsgemäß abläuft (Matschullat u. Gutzmer 2012).

## Quellenverzeichnis

- Bardi U (2013) Der geplünderte Planet. Die Zukunft des Menschen im Zeitalter schwindender Ressourcen. Ein Bericht an den Club of Rome. Oekom Verlag, München, 355 S.
- Bradshaw AM, Reuter B, Hamacher T (2013) The potential scarcity of rare elements for the Energiewende. *Green* 3, 2: 93–111
- Cornell SE, Prentice IC, House JI, Downy CJ (2012) Understanding the Earth system. Global change science for application. Cambridge University Press, Cambridge, 267 S.
- Crutzen P (2011) Die Geologie der Menschheit. In: Crutzen P, Davis M, Mastrandrea MD, Schneider SH, Sloterdijk P (Hrsg) Das Raumschiff Erde hat keinen Notausgang. Edition Unseld, Suhrkamp Verlag, Frankfurt, 113 S.
- Diamond J (2005) Kollaps. Warum Gesellschaften überleben oder untergehen. S. Fischer Verlag, Frankfurt a.M., 800. S.
- Ehrlich HL (2001) Past, present and future of biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy* 59, 2–3: 127–134
- Leggewie C, Welzer H (2010) Das Ende der Welt, wie wir sie kannten. Klima, Zukunft und die Chancen der Demokratie. S. Fischer Verlag, 288 S.
- Kausch P, Bertau M, Gutzmer J, Matschullat J (Hrsg; 2011) Energie und Rohstoffe. Gestaltung unserer nachhaltigen Zukunft. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 193 S.
- Matschullat J, Gutzmer J (2012) Mining and its environmental impacts. In: Meyers RA (Hrsg) *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* 9: 6633–6645. Springer Verlag, New York
- Orestes N, Conway E (2011) The merchants of doubt. How a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming. Bloomsbury Press, London, New York, 368 S.
- Patel R (2010) The value of nothing. Was kostet die Welt? Riemann Verlag, München, 288 S.
- Schumacher EF (2013) Small is beautiful: Die Rückkehr zum menschlichen Maß. Oekom Verlag, München, 320 S.
- Wäger PA, Lang DJ, Wittmer D, Bleischwitz R, Hagelüken C (2012) Towards a more sustainable use of scarce metals. A review of intervention options along the metals life cycle. *Gaia* 21, 4: 300–309

# Sachverzeichnis

Die jeweiligen Stichworte sind zumeist im Singular ausgewiesen und beziehen sich dennoch auch auf die Nutzung im Plural. Englischsprachige Begriffe sind kursiv gesetzt. Spezielle Fachbegriffe teilweise mit Angabe des fachlichen Nutzungsraumes: (bot.: Botanik; chem.: Chemie; geol.: Geologie; hist.: Geschichte; milit.: Militär; min.: Mineralogie; ökon.: Ökonomie; tech.: Technik). Das Kürzel (Fa.) verweist auf eine Firma.

## A

- Abfall 6ff, 68, 79f, 100, 116, 141, 173ff, 184ff, 205, 207, 221, 230, 255f, 264
- Abfallverzeichnisverordnung 186
- Abholzung 184
- Abraum 92, 138f, 267, 269
- Absetz(-anlage, -teich) 221, 268f
  - Tailing
- Abwasser 142, 184, 192, 220ff
  - Wasser
- Acetylaceton ( $C_5H_8O_2$ ; chem.) 243
- Active Phased Array Radar* (AESA) 14
- adelpi (Fa.) 40, 62f
- Admiralty Resources Ltd (Fa.) 85
- Afrika 28, 30, 64, 66, 101, 103, 119, 123ff, 164, 203, 205, 223, an 265
- Afrikanische Union 28
- Agua de Barcelona (Fa.) 224
- Akita (Japan) 60, 160, 200
- Akkumulator / Akku (tech.) 75f, 92, 98, 162, 166, 213
- Alkane Resources Ltd. (Fa.) 103, 118f, 127
- Aluminium (Al) 15ff, 34, 48, 50, 64ff, 80, 162ff, 174f, 192, 211ff
- Amberlite IRA<sup>TM</sup> (chem., tech.) 244
- Ammoniumcitrat ( $C_6H_{17}N_3O_7$ ; chem.) 189ff
- Ammoniumsulfat ( $[NH_4]_2SO_4$ ; chem.) 209
- Anglo American Chile (Fa.) 224
- Angola 142
- Anlagenbau 161
- Anthropozän (geol.) 267
- Antimon (Sb) 16, 63ff, 162, 167, 245ff
- Antofagasta (Chile) 82ff, 224
- Antofagasta Minerals (Fa.) 224
- Antrieb (Elektro-, Hybrid-, Uhren-) 75, 210f
- Antwerpen (Belgien) 167
- Apatit ( $(Ca,Ba,Pb,Sr,etc.)_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$ ; min.) 228f, 249
- Argentinien 76, 79, 82ff
- Argon (Ar) 240
- Argyrodit ( $Ag_8GeS_6$ ; min.) 233, 237
- Arsen (As) 13, 15, 19, 33f, 173, 188ff, 216, 222f, 235ff, 251
- Asche (Klärschlamm-; KSA) 31, 70, 183ff, 237ff
- Ashton Mining (Fa.) 115
- Asien 25, 30, 45, 101, 106, 114, 265
- Atacama Wüste (Chile) 77ff
- Atlantik (Ozean) 126f, 142
- Atomenergie 203, 206f
  - Nuklear
- Aufbereitung (tech.) 20, 73, 92, 104, 110, 115ff, 132ff, 141ff, 165ff, 174, 183, 201, 205ff, 219ff, 265ff
- Aurubis (Fa.) 239
- Australien 26, 64, 76, 82f, 98, 101ff, 144, 156, 203, 205, 223
- Auto(mobil; Kraftfahrzeug) v, 6, 10, 32ff, 50, 75f, 121, 143, 161ff, 212ff, 252ff, 266

## B

- Backwardation* (ökon.) 48
- Bakterien 223, 268
- Baotou (China) 100, 112
- Baotou Iron & Steel Group (Fa.) 103
- Barium (Ba) 215f
- Bastnäsit (Ce, La, Y $[CO_3]$ ; min.) 100ff, 112, 115, 203ff
- Batterham, Robin 267
- Batterie, Nickelmetallhydrid-
  - Akkumulator / Akku
- Batterie(n) (Li-, Sekundär-) 14, 50, 75ff, 92f, 98, 101, 105f, 113f, 162f, 250
- Bauxit (min.) 66ff
- Bayerische Motorenwerke (BMW; Fa.) 254
- Bayun Obo (China) 102, 205
- Beizen (tech.) 70
- Belgien 67, 239
- Benguela Strom (Namibia) 124
- Benzin 10 ► Kohlenwasserstoffe
- Bergbau 15ff, 41, 45, 71, 81ff, 99ff, 123ff, 149ff, 161ff, 202, 207, 220ff, 263ff

- Bergehalden 267 ► Halden, Tailings  
 Bergwerk 70, 99, 118, 124ff, 203ff, 220ff, 238f, 269  
 Beryllium (Be) 16  
 Bevölkerung (swachstum) 183, 261, 264ff  
 BHP Billiton (Fa.) 224  
 Bildschirm (Flach-) 35, 68f, 98, 105, 173, 215, 230  
 ► Monitor, Display  
 Bioethanol 7, 10  
 Biohydrometallurgisches Zentrum für strategische Elemente, Freiberg (BHMZ) 267  
*Bioleaching* 267  
 Bischofit ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ; min.) 78  
 Blaue Liste (Institut) 264  
 Blei (Pb) 8, 17, 35, 50, 77, 132, 165, 189, 193, 201, 233f, 237f, 247  
*Blockcaving*-Verfahren (tech.) 152  
 Boden (erosion) 7, 154f, 183ff, 261, 266  
 Bohrloch (-Elektromagnetik [BHEM], -sensoren, teufe) 130, 153f, 158, 224  
 Bohrung (tech.) 75, 86, 90f, 135, 151ff ► Tiefbohrung  
 Boliden (Fa.) 152  
 Bor (B) 77ff, 85, 88, 91, 156, 179f, 211, 233  
 Borsäure ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ; chem.) 78, 85  
 Boston Consulting Group GmbH (Fa.) ix  
 Botswana 142  
 Brandberg (Namibia) 126ff  
 Brasilien 2, 10f, 26, 60, 64, 66, 101, 103  
 Brechen (tech.) 127, 133, 141, 225f  
 Brecher (Kegel-) 226  
 Brennstoffzelle (SOFC) 14, 163, 216, 249  
 BRIC-Staaten 39  
 British Geological Survey (BGS) 16, 25f  
 Brom (Br) 77  
 Brundtland, Gro Harlem 261  
 Brushit ( $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; min.) 187  
 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) v, 63, 135, 192, 239, 255  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) vi, 61  
 Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) 184  
 Bundesministerium für Wirtschaft und Technik (BMWi) v, 3f  
 Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) v  
 Bushveld (geol.) 66
- C**  
 Cadmium (Cd) 173, 176, 183, 188f, 193  
 Cadmiumtellurid ( $\text{CdTe}$ ) 173, 230  
 Caerhan Salzsee 88  
 Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ; min.) 229  
 Calcium (Ca) 34  
 Canadian Lithium Corp. (Fa.) 80  
 CAP (Fa.) 224  
 Cape Cross (Namibia) 124  
 Carben (chem.) 241  
 Carnallit ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ; min.) 78  
*cash-flow* (ökon.) 51  
 Cassiterit ( $\text{SnO}_2$ ; min.) 126  
 Catecholat (Brenzcatechin,  $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_2$ ; chem.) 243, 245  
 Cer (Ce, Lanthaniden) 14, 16, 97, 108, 110, 114f, 212, 214  
 Cerics (leichte SEO) 97  
 ► Seltenerdelemente  
 Cerium Rouge (tech.) 214  
 Chatham House 28  
 Chemetall (Fa.) 82, 92  
*Chemical Vapour Deposition* (CVD; tech.) 236, 242, 248, 250  
 Chemotherapie 235 ► Medizin  
 Chicago Metal Exchange (CME) 48  
 Chile 26, 70, 76f, 82ff, 222ff  
 China vff, 15ff, 25ff, 61, 64f, 70ff, 83, 88ff, 98, 100ff, 121, 164, 188, 203ff, 216, 236, 238f, 249, 255, 268  
 China International Trust and Investment Corp. (CITIC; Fa.) 89  
 China Ministry of Commerce (MofCom) / Chinesisches Handelsministerium 110ff  
 China Qinghai Minmetals Resources Ltd. (Fa.) 88  
 Chinesisches Zentrum für Seltenerd-Informationen (CREIC) 108ff  
 Chip (Mikro-, Computer-) v, 20, 35f, 61, 251ff  
 Chrom (Cr) 44, 189  
 CIGS 173 ► Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid  
 CIS 173 ► Kupfer-Indium-Diselenid  
 Citic Pacific (Fa.) 224  
 Citrat (Zitronensäure,  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ; chem.) 243  
*Cladding* (tech.) 248  
 Clayton Valley (USA) 82  
 Cloncurry District (Australien) 156  
 Club of Rome 3  
 $\text{CO}_2$ -Effizienz 44  
 Cobalt (Co) 16, 50, 63f, 66, 161ff, 179, 201, 211f, 250  
 Columbit-Tantalit (Coltan,  $[[\text{Fe}, \text{Mn}][\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Sb}]_2\text{O}_6]$ ; min.) 126  
 COMIBOL 87  
*Commodity(ies)* viii, 48, 265  
*Complementary metal oxide semiconductor* (CMOS; tech.) 250, 252  
 Computer (Super-C.) v, 34, 61, 98, 105, 113, 161f, 215, 228  
 Conergy (Fa.) 76  
*Contango* (ökon.) 48  
*Controlled-Source Audio Frequency Magneto-Tellurik* (CSAMT) 155f ► Magnetotellurik

Critical Materials Institute (USA) 29  
 Cullet 178  
 Cyanid / Zyanid 223  
 Czochralski-Kristallzucht 253

## D

Daimler AG (Fa.) ix, 200, 252f  
 Deep Exploration Technologies (Fa.) 153  
*Definitive Feasibility Study* (DFS) / abschließende Durchführbarkeitsstudie 116f  
 Derivatemarkte (ökon.) 56  
 Deutsche Rohstoffagentur (DERA) v, 63  
 Deutsche Rohstoffallianz vi  
 Deutscher Zukunftspreis 200  
 Deutschland vff, 20, 28, 45, 53, 66f, 71, 82, 90, 135, 167f, 173, 178, 184f, 192, 239, 249, 255  
 Dialyse (Elektro-, Umkehrelektro-; tech.) 222f  
 Diamant (C; min.) 123f, 234  
 Diaphorit (geol.) 237  
 Diesel (Biodiesel) 7, 10, 140  
 Display (Flüssig-Kristall) 35  
 ► Monitor, Bildschirm  
 Doppellaktat (chem.) 190  
 Dr.-Erich-Krüger-Stiftung 267  
*Dry stacking* (tech.) 221  
 Duales System Deutschland (DSD) 261 ► Recycling  
 Dubai 92  
 Dubbo (Australien) 119, 203  
 Dubbo Zirconia (Fa.) 103, 119  
 Dünger (Kali-) 8, 83, 183ff, 193, 264  
 Dysprosium (Dy, Lanthaniden) vii, 16, 97, 108, 110, 114, 125, 180, 212f, 216, 254

## E

East Coast Minerals (ECM; Fa.) 92  
 Echolot 14  
 Edelmetall 48f, 155, 158, 161, 166ff, 213

Eintrittswahrscheinlichkeit 41  
 Eisen (Fe) 8, 16, 34f, 44, 60, 64, 77, 92, 100, 113, 115, 132, 161f, 166, 179f, 192, 203, 211ff, 228f, 237, 245  
 Elektrik (Thermo-) 163  
 Elektroaltgeräte 167  
 Elektrodialyse (tech.) 185, 222f  
 Elektrofahrzeug 13, 18, 163  
 Elektrokinetik (tech.) 185  
 Elektrolyse (Schmelzfluss-, Schmelzsalz-; tech.) 209, 213, 220, 238  
 Elektromagnetik (EM; tech.) 154f  
 Elektrotechnik 13  
 Elution (sauer; tech.) 185, 239, 245  
*End-of-life* 21, 70, 176  
 ► *Life cycle*  
 Endlagerung 100, 223  
 Eneabba (Australien) 203  
 Energie (erneuerbare) 4f, 7, 9, 13f, 16, 18, 27ff, 32, 34, 44, 63, 70, 76, 81, 92, 98, 106, 115, 141ff, 161, 167, 173ff, 203, 206ff, 220, 223, 225, 227f, 232, 239, 247f, 250ff, 262ff  
 Energietechnik 16  
 Energieversorgung 264, 266  
 Engineering Council of Namibia (ECN) 144  
 Entwässerung (elektrokinetisch) 220ff  
 Entwicklungsland 25, 123f, 134, 138, 144f  
 Erbium (Er, Lanthanide) 14, 16, 97, 108, 214, 216  
 Erdgas 32, 77, 246  
 Erdöl 3, 32, 77, 98, 213f, 246  
 Erkundung 264 ► Exploration  
 Erzgebirge (Deutschland) 90, 92, 268  
 Ethanol (Bioethanol) 7, 10f, 245  
 Ethylen/Vinylacetat (EVA oder E/VA; chem.) 176, 235, 245  
 Etruscan Resources Inc. (Fa.) 134f

EU-China Clean Energy Centre 27  
 Europa 15ff, 25ff, 41, 56, 62, 90, 110, 125, 149ff, 161, 167, 172, 176, 187, 262, 265  
 Europäische Kommission (EC) 16, 62  
 Europäische Union (EU) 16, 28, 125  
 European Rare Earth Competency Network (ERECON) / Europäisches Kompetenznetzwerk zu Seltenen Erden 29  
 Eutrophierung (Gewässer-) 184  
 Evonik Industries (Fa.) 76  
 Exchange Minerals Ltd. (EML; Fa.) 92  
 Exploration 3, 41, 64, 72f, 82ff, 88, 90, 127, 130ff, 149ff, 155, 158, 183, 264ff  
 ► Erkundung  
 Extraktion (Lösungsmittel-, Solvent-; tech.) 78ff, 92, 99f, 104, 116, 118, 154, 175, 190, 202, 205, 207, 209ff, 219f, 232, 234, 239ff

## F

Fällung (tech.) 184, 268  
 Feldspat (XZ<sub>4</sub>O<sub>8</sub>; min.) 80  
 Fenit (geol.) 130  
 Feralpi Stahl (Fa.) 160  
 Ferrochrom (FeCr) 44  
 Ferronickel (FeNi) 44  
 Festmist 183 ► Dünger  
 Festplattenlaufwerk 166  
 Feuerstein 104 ► Flint  
 Filtration (Druck-, Vakuum-) 219, 221f  
 Finanzkrise v, 54, 100, 104f, 112  
 ► Wirtschaftskrise  
 Flexifuel 10  
 Flint (geol.) 104  
 Flokkulation 221  
 Flotation (Säulen-; tech.) 115, 219, 221ff  
 Flugstaub 238f, 267  
 Flugzeug 6, 14, 163



- Fluid Catalytic Cracking* (FCC; tech.) 213  
 Fluor (F) 80, 109, 190, 208, 213  
 Flussspat ( $\text{CaF}_2$ ; min.) 16, 124  
*Flux-grown*-Technik (Flussmittel-züchtung; tech.) 242  
 FMC Lithium (Fa.) 79, 82  
 Foote Mineral Corporation (FMC; Fa.) 82  
 Frankreich vf, 20  
 Fraunhofer-Institut (für Chemische Technologie, ICT; für System- und Innovationsforschung, ISI) 63, 264  
*free-on-truck* (FOT; ökon.) 49  
 Freeport McMoran (Fa.) 224  
 Freiberg, Sachsen (Deutschland) vff, 79, 87, 90, 92, 233, 237, 239, 245  
 Frühgeschichte (hist.) 267  
 Fujian (China) 203  
 Fusion (Kern) 31  
 Fußabdruck, ökol. 267
- G**  
 Gadolinium (Gd, Lanthaniden) 16, 97, 108, 114, 204, 212ff  
 Galaxy Resources Ltd. (Fa.) 83, 85  
 Gallium (Ga) vi, 8, 13, 15ff, 33ff, 61ff, 167, 173, 176, 230, 235, 237, 251, 263  
 Galliumarsenid ( $\text{GaAs}$ ) 13ff, 33, 173, 235  
 Galliumnitrid ( $\text{GaN}$ ) 13, 19, 33  
 Gallylen (chem.) 241  
 Gangmaterial (geol.) 219  
 Gase, nitrose 175  
 Gefährdungspotenzial 41  
 Genam GmbH (Fa.) 126, 130f  
 Generator (Ultraschall-; tech.) 213  
 Geochemie 151, 154, 156, 264  
 Geologischer Dienst Australiens 156  
 Geologischer Dienst von Großbritannien ► British Geological Survey  
 Geophysik 151ff, 264  
 Geopotenzial 61  
 Georgia Lake (Kanada) 90  
 Geothermie 77, 268  
 Germanit ( $\text{Cu}_{13}\text{Fe}_2\text{Ge}_2\text{S}_{16}$ ; min.) 237  
 Germanium (Ge) vi, 16f, 33, 37, 61ff, 230, 233ff, 251, 259, 263, 265  
 Germynen (chem.) 241  
 Gesamtoxid Seltene Erden (GOSE) 202ff ► Seltene Erden  
 Gesetz (Bundesbodenschutz-) 39, 169, 185  
 Gesundheitsversorgung 264  
 ► Medizin  
 Gibbsit ( $\text{Al}[\text{OH}_3]$ ; min.) 79, 82  
 Gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; min.) 78f, 92, 222  
 Glimmer ( $\text{M}_{2-3}\text{X}_1\text{OT}_4\text{O}_{10}\text{A}_2$ ; min.) 77, 80, 92  
*Global Positioning System* (GPS; tech.) 252  
 Glykol (Ethylenglykol,  $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ ; chem.) 235, 243ff  
 GNREB 87  
 Goethit ( $\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}[\text{OH}]$ ; min.) 229  
 Gold (Au) 3, 32, 60, 64, 123f, 134, 149, 154, 156, 161f, 165ff, 225, 250, 252  
 Goldman Sachs 39  
 ► Rohstoffindex  
 Golmud (China) 89  
*good delivery point* (ökon.) 49  
 Goslar (Deutschland) 267  
 Granit (geol.) 80, 126f  
 Graphit (C) 16, 35, 63ff, 234  
 Great Dyke (geol.) 66  
 Great Western Minerals Group Ltd. (GWMG; Fa.) 103, 118, 127, 205  
 Greenbushes (geol.) 83  
 Greenspan, Alan 265  
 Grönland 28  
 Grootfontein (Namibia) 143  
 Großbritannien vii, 16  
 Guangdong (China) 102, 203  
 Guano 183 ► Dünger  
 Gülle 183 ► Dünger
- H**  
 Hämatit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; min.) 229  
 Halbedelsteine (min.) 123, 132  
 Halde(n) (Berge-, Hütten-) 70, 92, 132, 204f  
 Halit (Kochsalz,  $\text{NaCl}$ ; min.) 78  
 Halogenid (chem.; min.) 234, 244, 249  
 Handelsgesetzbuch (HGB) 53  
 Handy 7, 169  
 ► Mobiltelefon, Smartphone  
 Harwell (Großbritannien) 209  
 Harz (geol.) 92  
*Heap Leaching* 267  
 Hectorit ( $\text{Na}_{0.3}[\text{Mg}, \text{Li}]_3\text{Si}_4\text{O}_{10}[\text{F}, \text{OH}]_2$ ; min.) 77  
*Hedging* (micro-, macro-, proxy-; ökon.) 46ff  
 Helium (He) 31  
 Helmholtz (Institut, Zentrum) 254, 264  
 Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) vf  
 Herbizide 8  
 Hettstedt (Deutschland) 239  
 Hilgenstockit ( $\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$ ; min.) 187  
 Hitachi (Fa.) 114  
 Hoboken (Belgien) 167, 239  
 Holmium (Ho, Lanthaniden) 16, 97, 214, 254  
*HREE (Heavy Rare Earth Elements) /Schwere Seltene Erden* 112, 121, 131, 135f, 145, 204, 210  
 ► Seltenerdelemente  
 Hunan (China) 203  
 Hybridfahrzeuge 13, 75, 98, 113, 121, 163  
 Hydrozyklon (tech.) 219, 221, 226
- I**  
 Jolite (geol.) 130  
 Ilmenit ( $\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$ ; min.) 203, 229  
 Indien 26, 61, 101ff, 203

- Indium (In) vi, 3, 8, 13, 16, 19f, 34ff, 61ff, 162ff, 173, 176, 230, 251, 263  
*Indium Tin Oxide (ITO)* / Indium-Zinn-Oxid 35, 69, 163, 230  
 Indiumphosphid (InP) 19  
 Indonesien 64, 66  
 Induberg Otjisazu Pty Ltd. (Fa.) 131  
 Industrial Minerals Company of Australia Pty Ltd. (IMCOA; Fa.) 104  
 Industrie (Chemie-, Glas-, Halbleiter-, Keramik-, Stahl-, Verteidigungs-) vff, 4, 16, 18ff, 27f, 31ff, 42, 45, 49ff, 60, 69ff, 75f, 80, 85, 97ff, 121, 123f, 143ff, 149ff, 163, 168f, 174ff, 183ff, 192, 201ff, 223ff, 233, 241, 243, 246, 252, 255, 262ff  
 Induzierte Polarisation (IP; tech.) 155  
 Infineon Technologies AG (Fa.) 252  
 Infrarotstrahlung (IR; tech.) 235  
 Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) 40, 63, 255  
 Interdisziplinarität vi  
 Interministerieller Ausschuss (IMA) Rohstoffe vii  
*International Financial Reporting Standards* (IFRS) 53  
 International Renewable Energy Agency (IRENA) 28  
 International Resource Panel 167  
 International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) 201  
 Internationale Atomenergie Organisation (IAEA) 206  
 Internationale Energieagentur (IEA) 28  
 Internationales Energie Forum (IEF) 28  
 Ionenaustausch (tech.) 79, 184, 210, 220, 223, 245  
 Iowa (USA) 29  
 Iridium (Ir) 16, 161, 167  
 Isolator(en) 14, 252  
 Italien vii  
 Ivanhoe Australia Ltd. (Fa.) 156
- J**  
 Jadar (geol.) 155f  
 Jadarit ( $\text{LiNaB}_3\text{SiO}_7[\text{OH}]$ ; min.) 91, 156  
 James Bay (Kanada) 90  
 Japan 18, 25f, 29, 49, 60, 67, 98, 101, 104, 106, 110ff, 160, 200, 268  
 Jiangsu (China) 83  
 Joint Oil Data Initiative (JODI) 28  
*Joint Venture* (ökon.) 19f, 70
- K**  
 Kalium (K) 34, 77f  
 Kalkfeld (Namibia) 127, 130  
 Kanada 26, 64, 90, 135, 154, 222, 238f  
 Kaokoveld (Namibia) 124, 130  
 Karasburg (Namibia) 124, 130  
 Karbonatit (geol.) 124, 130ff, 203  
 Karbonfaserrohre (tech.) 153  
 Karibib (Namibia) 142  
 Kärnten (Österreich) 91  
 Kartierung (tech.) 151  
 Kartoffel (bot.) 194  
 Kasachstan 26, 28, 67, 70, 118  
 Katalysator (Abgas, *Fluid-Cracking*; tech.) 98, 101, 105f, 109f, 113, 161, 163, 168, 211, 213f, 235f, 241ff  
 Kathodenstrahlröhre (tech.) 209, 215  
 Kerala (Indien) 203  
 Keramik 5, 80, 101, 105ff, 161, 163, 211, 215f  
 Kerntechnik 216 ► Atomkraft, Nuklear  
 Kerosin 78, 209 ► Kohlenwasserstoffe  
 KfW Bankengruppe 40  
 Khorixas (Namibia) 130, 134, 142, 144  
 Kings Mountain (USA) 82  
 Kinross (Fa.) 60  
 Klärschlamm 7, 183ff, 198, 264  
 Klimawandel 4, 7ff, 167  
 KMR Stainless (Fa.) 39ff  
 Knelson-Konzentrierer (tech.) 219  
 Koagulation 221  
 Kobalt ► Cobalt (Co)  
 Kohlenstoff (C) 16, 35, 63ff, 234, 238, 241f, 245f, 250  
 Kohlenwasserstoff(e) 32, 214  
 ► Benzin, Diesel, Kerosin  
 Kola-Halbinsel (Russland) 206, 268  
 Kombat (Namibia) 130  
 Kondensator(en) 5, 14, 215  
 Kongo, Demokratische Republik 26, 64, 66, 238f, 255  
 Königswasser (*aqua regia*; chem.) 154, 190  
 Kontrakt (*back-to-back*, Future; ökon.) 46ff  
 Koralpe (Österreich) 91f  
 Korea 67  
 Korruption 28, 30  
 Kosaka (Japan) 160  
 Koyuncu AS (Fa.) 90  
 Kraftstoff (Biokraftstoffe) 7, 10, 225  
 ► Kohlenwasserstoffe  
 Kraftwerk (Geothermal-) 142, 200, 239  
 Kreislaufwirtschaftsgesetz 176  
 Kristallisationsverfahren 184  
 Kritikalität 15, 16, 40, 62, 71, 266  
 Kritikalitätsmatrix 62, 126, 263  
 Krüger-Stiftung  
 ► Dr.-Erich-Krüger-Stiftung  
 Kunene Fluss (Namibia) 142f  
 Kunststoff 4, 8, 161, 166, 176ff, 209, 222  
 Kupfer (Cu) 2, 4, 8, 16f, 28, 48ff, 64, 66, 123, 130, 152ff, 161ff, 173, 186, 189, 193f, 216, 224, 237f  
 Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) 173  
 Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) 173  
 Kwinana (Australien) 83

**L**

- La Negra (Chile) 82  
 La Paz (Bolivien) 86, 88  
 Lagerhaltung 18, 23  
 Lagerstätte(n) viii, 35, 61, 65f, 70ff, 90, 98, 100, 115, 118, 121, 123ff, 147, 149ff, 161, 164, 170, 173, 188, 202ff, 217, 230, 237f, 244, 263ff  
 Landwirtschaft 8, 183f, 194, 264  
 Langelsheim (Deutschland) 82, 92  
 Langer Heinrich Mine 124  
 Langstrumpf, Pippi 266  
 Lanthan (La, Lanthaniden) 13f, 16, 97, 108, 114f, 201ff, 213  
 Lanthaniden 13 ► SEE  
 Länttä (Finnland) 90f  
 Lärm(belastung) 267, 269  
 Laparit ([Na,Ce,Sr][Ce,Th][Ti,Nb]<sub>2</sub>O<sub>6</sub>; min.) 101  
 Laserdioden 14  
 Lateinamerika 265  
 Lautsprecher 166  
 Lebenszyklus 6, 9, 15, 170  
 ► Produktlebenszyklus  
 Leclanche (Fa.) 76  
 LED (*light emitting diodes*)  
 Leuchtdioden 13, 15, 33, 35, 98, 163, 215, 253f  
 Legierung 34, 44, 50, 98, 101, 105f, 110, 114f, 163, 211ff, 240, 246, 249ff  
 Leibniz (Institut) 264  
 Leuchtmittel, Niedrigenergie 16, 98  
 Leuchtstoffe 98, 201, 209, 211, 215, 217, 235 ► Phosphore  
 Li3 Energy (Fa.) 84, 88  
 Lichtwellenleiter (tech.) 235, 248, 259  
*Life Cycle Assessment* 9  
 ► Lebenszyklus  
 Limonit (FeO[OH]·nH<sub>2</sub>O; min.) 132  
 Lithium (Li) vii, 75ff, 105, 156, 163, 166, 230, 250, 263  
 Lithium Americas Ltd. (Fa.) 85  
 Lithium One Inc. (Fa.) 85, 90  
 Lofdal (Namibia) 124ff  
 Lognan, Jiangxi (China) 102, 203, 205  
 London Metal Exchange / Londoner Metallbörse (LME) 17, 48ff  
 Loparit (Na,Ce,Sr)(Ce,Th)(Ti,Nb)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>; min.) 101f, 204ff  
 Loser Chemie GmbH (Fa.) 174  
 Lot (Weich-, Blei-Zinn {PbSn}) 35, 50, 163  
 Lovozerky (Russland) 102, 205  
*LREE (Light Rare Earth Elements)* / Leichte Seltene Erden 112, 204  
 ► Seltenerdelemente  
 Lubumbashi (DR Kongo) 239  
 Lüderitz (Namibia) 142  
 Luft(qualität) 214, 228, 261, 266  
 Luftfahrt 13, 213  
 ► Flugzeug  
 Lutetium (Lu, Lanthaniden) 16, 97, 204, 254  
 Lynas Corp. (Fa.) 103, 111, 115, 117f, 127
- M**
- Magma Kupfermine 152  
 Magna International (Fa.) 85  
 Magnesium (Mg) 16, 34, 63ff, 77ff, 185, 213, 220  
 Magnesium-Ammoniumphosphat (MAP) 185  
 Magnet (Samarium-Cobalt [SmCo]; tech.) 14, 70, 92, 97f, 101, 105ff, 154, 163, 166, 179f, 201ff, 210ff, 217, 219, 224, 228, 254f  
 Magnetotellurik (MT; tech.) 155  
 Magnetscheidung / Magnettrennung (tech.) 92, 115, 228  
 Mahlen (tech.) 80f, 141, 223, 225f  
 Mais (Silo-; bot.) 189ff  
 Malaysia 101, 103, 203  
*Margin Call* (ökon.) 48  
 Marikana Massaker 66  
 Marinkas Quelle (Namibia) 130  
*market of last resort* (ökon.) 50  
 Markt (*spot-, cash-, future-*; ökon.) viif, 3, 6, 8, 10, 15ff, 25, 27ff, 39ff, 48ff, 65ff, 97ff, 121, 123f, 144ff, 149, 163, 185ff, 201ff, 249ff, 263ff  
 Marokko 188  
 Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg 254  
 Maschinenbau 143, 161, 268  
 Massivsulfid-Lagerstätte (geol.) 152ff  
 Matchless (Namibia) 130  
 Max-Planck Institut 264  
 Medizin (Gesundheit) 20, 98, 141, 163, 215f, 264  
 Mendelejew, Dimitri 233  
 Mercedes Benz (Fa.) 200, 253  
*mergers and acquisitions* (M&A; ökon.) 51  
 Merlin (geol.) 155f  
 Messum Komplex (geol.) 128  
*Metal Oxide Semiconductor* (MOS; tech.) 236, 250, 252  
 Metall(e) (Edel-, Sonder-, Technologie-) 3, 6, 12f, 30ff, 43, 49ff, 61ff, 73, 75, 92, 97, 101, 109ff, 121, 123, 126, 145, 149ff, 161ff, 177ff, 188, 201ff, 217, 219ff, 232, 235, 237ff, 250, 252  
 Metallgesellschaft (Fa.) 92  
 Metallurgie (Biohydro-, Hydro-) 70, 109, 121, 163, 169, 205, 208, 232, 235  
 Metallurgy Hoboken-Overgelt (MHO; Fa.) 239  
 Metals Economics Group (MEG) 150  
 Methansulfonsäure (CH<sub>3</sub>SO<sub>3</sub>H; chem.) 175  
 Mexiko 25ff, 222  
 Mikrowelle(n) 14, 252  
 Minara Resources (Fa.) 224  
 Minas Gerais (Brasilien) 2, 60  
*Mineral cracking* (tech.) 207  
*Mineral Liberation Analyzer* (tech.) 228

Mineralogie 115, 118, 152, 202, 204f, 219f, 228, 232, 264f  
 ++Minerals (Fa.) 224  
 Mischabsetzer 209  
 Mitsubishi Corp. (Fa.) 85  
 Mobiltelefon 6f, 13ff, 35, 98, 160ff, 169, 173, 266  
 ► Handy, Smartphone  
 Molybdän (Mo) 5, 26f, 44, 50, 80, 152, 156, 176, 239  
 Molycorp Minerals (Fa.) 99, 103, 111, 115, 118f, 127  
 Monazit (Ce, La, Th, Nd, Y[PO<sub>4</sub>]; min.) 100ff, 112, 115, 132, 203ff, 229  
 Mongolei 28, 70  
 Mongolei, innere (China) 100, 102f, 203  
*Monolithic microwave integrated circuit* (MMIC; tech.) 252  
 Monopol 65, 70f  
 Motor (Elektro-, Verbrennungs-) 14, 32f, 75, 98, 166, 212, 214  
 Mount Weld (Australien) 98, 102ff, 115, 118f, 127, 203ff  
 Mountain Pass (USA) 98ff, 118f, 127, 203ff  
 Mt. Cattlin Mine (Australien) 83  
 Mühle(n) (Autogen, AG; Hochdruckwalzen-, HPGR; Kugel-; Semiautogen-, SAG; tech.) 178, 219, 221ff

## N

Nachhaltigkeit 4, 6, 9, 11, 111, 184, 239, 261f  
 Nachtsichtgerät (tech.) 200, 235, 253  
 Nahrungsmittel 183f  
 Namib (Namibia) 123, 126  
 Namibia 123ff, 147, 237f, 255, 266  
 Namibia Rare Earth Inc. (Fa.) 124, 130  
 Namibian Institute of Mining and Technology 144  
 Namibian Ministry of Mines and Energy (MME) 123

Natrium (Na) 34, 77, 214, 223  
 Natriumhydroxid (NaOH; chem.) 100, 175  
 Neodym (Nd) 8, 13f, 16, 61, 97, 106, 108, 110, 114, 125, 179, 202, 211ff  
 Neutronenaktivierung 154  
 New World (Fa.) 88  
 Nichteisenmetall(e) v, 150  
 Nickel (Ni) viii, 3, 39, 44, 47ff, 162, 165, 189, 201, 211, 213  
 Nickelhütte Aue (Fa.) 239, 269  
 Niederlande 45  
 Niederschlag Mine 268  
 Niob (Nb) 5, 16, 63ff, 203  
 NMR-Spektrometrie (tech.) 249  
 Norra Karr (geol.) 136f  
 Northern Minerals Ltd. (Fa.) 119  
 Nuklear(technik) 163, 268

## O

Okavango (Namibia) 142f  
 Ökobilanz 9, 11  
 Okohandja (Namibia) 130  
 Ökologie, ökologisch 4, 7f, 173, 209, 216, 239, 267  
 Okorusu (Namibia) 124, 130, 132f  
 Olen (Belgien) 239  
 Omaruru (Namibia) 127  
 Ontario (Kanada) 90  
*open outcry* (ökon.) 50  
 Optik, Infrarot 13f, 163, 178, 215, 235ff, 242, 247, 253, 255  
 Optoelektronik 33, 236  
 Oranje Fluss (Namibia) 124, 142f  
 Orissa (Indien) 203  
 Orléans (Frankreich) vi, viii  
 Orocobre Ltd. (Fa.) 84f  
 Oryx Stainless (Fa.) 40, 44ff  
 Osmium (Os) 16, 161  
 Osmose (Niedrig-pH-, Umkehr-) 222ff  
 Otavi (Namibia) 123  
 Otjihase (Namibia) 130  
 Otjisazu (Namibia) 130ff  
 Otjiwarongo (Namibia) 132, 142

Outukumpu (Fa.) 44  
*over-the-counter-* (OTC) Geschäft (ökon.) 48  
 Oxalat (C<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>2-</sup>; chem.) 209, 243  
 Oxalsäure (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>; chem.) 209  
 Oxidation (Druck-) 213, 223, 230, 234, 239f, 246

## P

Palladium (Pd) 16, 63, 66, 161f, 167  
 Panamericum Lithium (Fa.) 84  
 Parisit (CaCe<sub>2</sub>[CO<sub>3</sub>]<sub>2</sub>F<sub>2</sub>; min.) 141  
 Pastos Grandes (geol.) 88  
*Peak Oil* 3, 183  
*Peak Phosphorus* 183  
 Pegmatit (geol.) 77, 80, 83, 90, 124, 126ff  
 Periodensystem der Elemente (PSE) v, 31, 233f, 241, 251  
 Perth (Australien) 83  
 Peru 28, 64  
 Pestizide 8  
 Pharma-Industrie 163  
 Phoenix Mine (Zypern) 2, 267  
 Phosphor (P) 7, 80, 98, 101, 105f, 110, 113, 130, 183ff, 198, 220, 228, 251, 264  
 Phosphore ► Leuchtmittel  
 Photovoltaik 8, 76, 163, 173ff, 230, 253, 264  
 Phytosiderophore (bot.) 243  
*placer deposit* ► Seifenlagerstätte  
 Platin (Pt) 8, 16, 61, 63ff, 98, 161ff, 214, 230, 236, 246  
 Platingruppenelemente (PGE), Platingruppenmetalle (PGM) viii, 8, 16, 63f, 66, 161, 214, 230, 236  
 Pléiades (Satellit) 14  
 Plexiglas 36  
 Polierpulver (tech.) 98, 109f  
 Politik v, vii, 262  
 Polyaluminium-Hydroxidchlorid (Al<sub>n</sub>[OH]<sub>m</sub>Cl<sub>3n-m</sub>; chem.) 175  
 Polyethyldenterephthalat (PET; tech.) 235, 245  
 Polypropylen (PP; tech.) 209

Polystyren ( $[C_8H_8]_n$ ; chem.) 244f  
 Potosí (Bolivien) 80, 87  
 Praseodym vii, 14, 97, 108, 114,  
 180, 202, 212, 214  
 Produktlebenszyklus (*life cycle*)  
 6, 9, 15, 170  
 Promethium (Pm) 97, 202  
 Puna (Argentinien) 83  
 Pyroxen (M1 M2  $T_2O_6$ , min.)  
 130

## Q

Qarhan Salzsee 88  
 QemScan (tech.) 229  
 Qinghai-Becken (China) 79,  
 88ff  
 Quadra FNX (Fa.) 224  
 Quantentopf-Infrarot-Photode-  
 tektor (QWIP) 13  
 Quarz ( $SiO_2$ ; min.) 80, 229, 241f,  
 248  
 Quebec (Kanada) 80, 90  
 Quecksilber (Hg) 188ff, 222  
 Quote 16f, 27, 100, 104, 109ff,  
 121, 165, 168, 176, 209

## R

Radiofrequenz 14  
 Rammelsberg 267  
 Raps (Winter-; bot.) 189ff  
 Rare Element Resources Ltd. (Fa.)  
 119, 127  
 Rasterelektronenmikroskopie  
 (REM) 206  
 Raumfahrt 13f, 19f, 213  
 Ravensthorpe (Australien) 83  
 Recht (Abfall-, Bodenschutz-,  
 Düngemittel-) 9, 92, 131, 134,  
 183ff, 207, 212, 214  
 RecoPhos 38, 183ff  
 Recycling viif, 6, 16, 18, 21, 27f,  
 32, 35f, 41, 45, 64, 68ff, 92, 149,  
 159ff, 172ff, 181, 184f, 198, 224,  
 230, 239, 243ff, 255ff, 261ff  
 Reduktion (biologische Sulfat-,  
 Risiko) 4, 43, 46, 112, 223,  
 234, 238f, 241, 250

*Registration, Evaluation, Authori-  
 zation and restriction of  
 Chemical substances* (REACH)  
 21  
 Rehoboth (Namibia) 143  
 Reiling Glas Recycling GmbH &  
 Co. KG (Fa.) 178  
 Renierit ( $[Cu,Zn]_{11}Fe_4[Ge,As]_2S_{16}$ ;  
 min.) 237  
 Reserve (meist Rohstoff-) 34, 36,  
 47, 54, 64f, 71, 75f, 82, 86, 95,  
 100, 102ff, 117, 149, 153, 183f,  
 188, 239, 255, 259  
 Ressource vi, ix, 7, 18, 27ff, 32ff,  
 41, 48, 64ff, 75f, 85ff, 93, 100,  
 103f, 108, 115ff, 138, 145, 149,  
 156, 170, 173, 176, 184, 187,  
 192, 194, 209, 212, 217, 220,  
 230, 239, 255, 259  
*Restriction of Hazardous Sub-  
 stances* (RoHS) 21  
 Rhenium (Re) 156, 163, 228,  
 230  
 Rhodium (Rh) 16, 161, 163, 167  
 Riesa (Deutschland) 160  
*Ring-session* (ökon.) 50  
 Río Grande de Lipez (Bolivien)  
 87  
 Rio Tinto (Fa.) 91, 156, 267  
 Risikovorsorge 261ff  
 Robert Bosch GmbH (Fa.) ix, 252  
 Robotik 268  
 Rockwood Lithium (Fa.) 82, 92  
 Rohöl 10f ► Erdöl  
 Rohstoffe  
 – -Derivate 54  
 – (erneuerbare) 6f, 12  
 – -Gewinnung, -abbau 4, 8f, 27f,  
 140, 35, 60f, 66, 68, 76, 88, 92,  
 100, 104, 108, 111, 118, 124,  
 139ff, 152, 183, 188, 207, 225,  
 237, 239  
 – -Index 39f  
 – -Knappheit 4, 6ff, 18, 61ff, 108,  
 183f, 202, 228  
 – -Kreislauf 7, 70, 170, 184  
 – -Portfolio 47, 51

## Rohstoffe

– -Preise 3, 10f, 15f, 18, 23, 25,  
 27f, 35, 39ff, 66ff, 85, 93, 98,  
 100, 104f, 109, 111f, 114f, 126,  
 145, 147, 149, 162, 164, 168,  
 174, 183ff, 194, 215, 236, 238,  
 250, 253  
 – (Primär-) vff, 6ff, 44f, 50, 59ff,  
 68, 70, 75ff, 165, 185, 187, 189,  
 191, 259  
 – (Sekundär-) vff, 6f, 9, 12, 44f,  
 70, 161ff, 174ff, 184ff  
 – -Versorgungssicherheit vff, 3f,  
 12, 15ff, 71f, 25, 27ff, 33, 36,  
 39ff, 61ff, 86, 100, 112, 115,  
 125, 161, 164, 168, 178, 183f,  
 212, 255  
 Röntgenfluoreszenz-Spektrosko-  
 pie (RFA) 178, 188, 228  
 Röntgenstrahlung 14  
 Roskill (Fa.) 65, 75f, 102  
 Rössing Uranium (Fa.) 124  
 Ruacana (Namibia) 142  
 Rückstrahlelektronen (BSE *Back  
 Scattering Electrons*; tech.) 206  
 Russland 26, 64, 66, 102, 188,  
 238f, 255, 268  
 Ruthenium (Ru) 16, 161ff, 167  
 Rutil ( $TiO_2$ ; min.) 203, 229, 241f

## S

Sachsen (Deutschland) vi, 160,  
 219, 233, 237, 239  
 Saint-Gobain Glass (Fa.) 178  
 Sal de Vida (Argentinien) 82, 85  
 Salar de Coipasa (geol.) 88  
 Salar de Hombre Muerto (Argen-  
 tinien) 79, 82, 85  
 Salar de Olaroz (Argentinien)  
 84f  
 Salar de Rincon 84f  
 Salar de Salinas Grandes (geol.) 85  
 Salar de Uyuni (Bolivien) 75ff  
 Salares Lithium (Fa.) 83f  
 Salpetersäure ( $HNO_3$ ; chem.) 175  
 Salzsäure (HCl; chem.) 100, 175,  
 178, 245



- Salzsee 75, 77ff  
Samarium (Sm) 14, 97, 103, 108, 114, 179, 202, 211f  
Sambia / Zambia 64, 142  
Saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; min.) 254  
Satellit(en) 14, 261  
Sauerstoff (O) 31, 33f, 213f, 223, 248  
Scandium (Sc) 13, 16, 61, 97, 201f, 205, 213, 215f  
Schlacke 7, 70, 239  
Schlamm (Faul-, Klär-, Rot-) 7, 68, 70, 183ff, 222, 264  
Schmierstoff 163  
Schmuggel (illegaler Export) 27f, 100, 112, 167, 169  
Schrott(platz) 164, 170, 264  
► Recycling  
Schumacher, Eugene 267  
Schutzgut 261, 264, 266  
Schweden 136, 152f  
Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; chem.) 78, 100, 209  
Schwellenland 25, 30, 61, 167  
Schweretrennung (tech.) 115, 219  
Schwingmühle (Exzenter-, Scheiben-) 178  
Sedimentation (tech.) 221  
Seifenlagerstätte (geol.) 66, 100, 124, 203  
Seismik (tech.) 154  
Selen (Se) 162f, 167, 173, 176, 190, 222, 247  
Seltenerdelemente, SEE (Seltene Erden; Seltenerdmetalle) viff, 13ff, 25ff, 63ff, 77, 80, 97ff, 110, 114, 119, 121, 124ff, 162ff, 179f, 201, 204, 208f, 210ff, 230, 263ff  
Seltenerdoxid (SEO; tech.) 97, 99ff, 110ff, 127, 133, 201ff, 213f  
Senkaku Inseln (Japan) 98  
Sensor (IR-Abstands-) 98, 153ff, 163, 252  
Separation (tech.) 116, 118  
Separator (Lamellen-, Seltenerd-Magnet-; tech.) 219ff  
Serbien 76, 91, 155  
*Short Range Radar* (SRR) / Nahbereichsradar 20  
Showa Denko (Fa.) 114  
Sicherheit (Investitions-, Versorgungs-) 3, 13ff, 27ff, 36, 39f, 48, 86, 100, 104, 108f, 125, 136, 161, 169, 183  
Siebtechnik 219, 221  
Silber (Ag) 8, 161ff, 167, 174ff, 222  
Silizium (Si; Eka-; chem.) 15, 33ff, 163, 173ff, 206, 233ff, 245, 248ff  
Sillen (chem.) 241  
Silylamid (chem.) 241  
Simbabwe / Zimbabwe 66, 142  
Singapore Commodity Exchange (SGX) 48f  
Skelettküste (Namibia) 124  
Skellefte Distrikt (Schweden) 152f  
*Smart standardization* 32  
► Standardisierung  
Smartphone 13, 18  
► Handy, Mobiltelefon  
Sociedad Quimica y Minera de Chile (SQM; Fa.) 82  
Soda ( $\text{Na}_2[\text{CO}_3] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ; min.) 78, 81  
Solarkollektor(en) 15  
► Photovoltaik  
SolarWorld AG (Fa.) 92  
Sole (Salz-) 77ff  
Solicium GmbH (Fa.) 92  
*Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC; tech.) 216  
► Brennstoffzelle  
Solvay Okorusu Ltd. (Fa.) 132  
Solventextraktion (tech.) 205, 210  
Sonar (tech.) 213  
Sondermetalle 161, 163, 166ff  
Sorris-Sorris (Namibia) 127  
Sövit (geol.) 130, 132  
sozial 4, 9, 144, 150f, 202, 221  
Sphalerit ( $\text{ZnS}$ ; min.) 238  
Spodumen ( $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ ; min.) 77, 80ff, 95  
SQUID-Sensoren 155  
Stahl (Edel-, Kohlenstoff-) 5ff, 44ff, 113, 143, 153, 160, 166, 168, 211, 213  
Standardisierung 32, 37, 48, 50, 261f  
Standard & Poor's ► Rohstoffindex  
Staub(belastung) 31, 140f, 206, 238, 267, 269  
Stausee (Trinkwasser-) 132  
Steenkampskraal (Südafrika) 103, 118f, 127, 203, 205f  
Steiermark (Österreich) 91  
Stickstoff (N) 34, 251  
Stoffstrom 9, 92, 225  
Stottit ( $\text{Fe}^{2+}\text{Ge}(\text{OH})_6$ ; min.) 237  
Strategie (Effizienz-, Suffizienz-) v, 4ff, 12, 27f, 30, 39, 42ff, 57, 63, 69, 73, 82, 174, 184f, 220f, 259  
Stromversorgung 132 ► Energie  
Substitution 3ff, 12, 27f, 42f, 69, 71, 104, 174, 187, 192, 194, 212, 235, 241, 247, 255, 262ff  
Südafrika 26, 64, 66, 103, 119, 135, 141ff, 164, 203, 205, 223  
Südkorea 18  
Sumikawa (Japan) 200  
Sumitomo (Fa.) 118  
Swakop Rivier (Namibia) 131  
Swakopmund (Namibia) 127  
*Swaps* (ökon.) 48  
Swartbooisdrift (Namibia) 130  
*SWOT*-Analyse (ökon.) 42  
Synchysit ( $\text{Ca}[\text{M}, \text{La}][\text{F}][\text{CO}_3]_2$ ; min.) 141  
Systemanalyse 9
- T**  
Tajinaier Seen (China) 79, 88f  
Tailing 133, 221f, 267  
► Absetzteich  
Talisson Lithium (Fa.) 82ff, 92  
Tannin (chem.) 238f, 243, 245  
Tantal (Ta) vi, 5, 8, 14, 16, 61ff, 101, 124, 126f, 129, 163, 203  
Teilsohlenbau (tech.) 140  
Telekommunikation 13, 20, 249

Terbium (Tb, Lanthaniden) 16, 97f, 108, 110, 114, 125, 132f, 180, 202, 209, 212f, 215, 217  
 Terephthalsäure ( $C_8H_6O_2$ ; chem.) 235, 245f  
 Terfenol (tech.) 213  
 Thales (Fa.) 13ff  
*Thales Component Information System* (TCIS) 20ff, 262  
 Thallium (Tl) 190, 222  
 Thermoelektrik 163, 254  
 Thorium (Th) 100f, 116, 127, 132f, 140f, 203ff  
 Thorium Company (Fa.) 209  
 Thulium (Tm, Lanthaniden) 16, 97  
 Thunder Bay (Kanada) 90  
 Tibet 88  
 Tiefbohrung 75, 86, 268  
 Timok-Komplex (geol.) 155  
 Titan (Ti) 34, 101, 204, 246  
 Ton (Li-) 77, 204f, 209  
 Toyota Tsusho (Fa.) 85, 119  
 Transdisziplinarität vi  
*Transparent conducting oxides* (TCO) 179  
 Transport (tech.) 264, 268  
 Treibach (Österreich) 104  
 Treibhausgasemission 7ff  
 Trennen (tech.) 92, 141, 178, 181, 209, 265ff  
 Trennsalztechnologie 222  
 Trennung (Schwere-; tech.) 42, 68f, 79f, 112, 115, 118, 121, 145, 166, 174, 201, 207, 209, 219ff, 239, 244  
*Trilateral EU-US-Japan Conference on R&D on Rare Earths and Critical Materials* 29  
 Triple-Superphosphat 187ff  
 ► Phosphat  
 Tsumeb (Namibia) 123, 130, 142, 237  
 Tsumeb Copper Ltd. (TCL; Fa.) 130  
 TU Bergakademie Freiberg vff, 79, 87, 90, 92, 233  
 Tuz Gölü (Türkei) 79, 90f

**U**  
 Ugab Rivier (Namibia) 124  
 Uis (Namibia) 124, 126, 128f  
 Ukraine 67  
 Ulexit ( $NaCaB_5O_6[OH]_6 \cdot 5H_2O$ ; min.) 88  
 Ultralazit ( $Ag_{22}Pb_{26}Ge_3Sb_4S_{46}$ ; min.) 237  
 Umwelt 4, 6ff, 18, 21, 27f, 31, 89f, 104, 108, 111ff, 132, 150ff, 161, 163, 168, 175, 183, 202, 207ff, 219ff, 261ff  
 Umweltbundesamt (UBA) 168  
 United States Geological Survey (USGS) 75, 100, 102, 202  
 Universität(en) vff, 79, 87, 144, 227, 233, 252, 254, 264  
 Universität Tomas Frias (Bolivien) 79f  
 Unterseeboot 14  
 Uran (U) 116, 123f, 127, 132, 144, 183, 188f, 202, 205, 207  
*Urban Mine / Urban Mining* 39, 44f, 48, 164, 168, 170, 264  
 Uritit (geol.) 130  
 US Department of Energy (DOE) 16, 63, 125  
 USA ► Vereinigte Staaten von Amerika  
 Usakos (Namibia) 130, 132

**V**  
 Vanadium (V) 5, 188f  
 Verbrennung (Klärschlamm-, Mono-) 75, 184f  
 Verdicker 219, 221  
 Verdickung (konventionell, pastös) 219, 221  
 Verdickungsmittel 219  
 Verein der Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg e.V. ix  
 Vereinigte Staaten von Amerika v, 16, 18, 20, 25ff, 56, 76, 82, 98, 101ff, 113, 127, 152, 179, 188, 203, 205, 209, 222, 233, 238f, 255  
 Vermahlung (Hochdruck-) 223ff

Verordnung (Abfallverzeichnis-, Düngemittel [DüMV]) 21, 185f, 190ff  
 Verstärker (optisch, elektronisch) 14, 32, 34  
 Verteidigung (milit.) 13, 18, 20  
 Videorekorder 113  
 Vietnam 114  
 Völklingen (Deutschland) 76  
 Von-Bach-Damm (Namibia) 131  
 Vorgeschichte (hist.) 267

**W**  
 Wachs 36  
 Wafer (Silizium-) 35ff, 175, 214, 251ff  
 Walvis Bay (Namibia) 142, 145  
 Walze (Hochdruck-Mahl-; tech.) 219, 226  
 Warmbad (Namibia) 124, 126  
 Warren Spring (Großbrit.) 209  
*Washcoat* (tech.) 213  
 Wasser (Ab-, Bergbau-, erdölbe-gleit-, Geothermie-, Grund-, Meer-, Niederschlags-, Ober-flächen-, Prozess-) 77, 81f, 86, 92, 98, 105, 115, 131f, 141ff, 154, 174f, 178, 180, 184, 189ff, 207, 209, 213, 216, 220ff, 234, 236, 239, 243, 261, 265ff  
 Wasserstoff (H) 31, 98, 109f, 175, 178, 213, 239, 250  
 Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ; chem.) 175, 178  
 Weatherly International (Fa.) 123  
 WEEE-Richtlinie 176  
 Weizen (Winter-; bot.) 194  
 Welthandelsorganisation (WTO) / World Trade Organisation 25, 27, 113  
 Wertschöpfung 263, 265f  
 Wertstoff(hof) 164, 264ff  
 ► Recycling  
 Whitlockit ( $Ca_9(Mg,Fe^{2+})[PO_3(OH)](PO_4)_6$ ; min.) 187  
 Windenergie 106  
 ► Windkraft

Windhuk (Namibia) 131, 134, 142f  
Windkraft 13, 16, 76, 98, 106, 108  
Winkler, Clemens 233  
Wirbelschichtfeuerung 186  
Wirtschaftskrise v, 25, 39, 54, 75,  
100, 104f, 112, 265  
    ► Finanzkrise  
Wismut (Bi) 63f, 162f  
Wissenschaftlicher Beirat für  
    Düngungsfragen 184  
Wissenschaftsförderung der Spar-  
    kassen-Finanzgruppe e.V. ix  
Wlotzkasbaken Komplex (geol) 127  
Wofatit E (chem.) 244  
Wolfram (W) vi, 5, 16, 27f, 63ff,  
80, 92, 207, 213, 239  
Wolfsberg (Österreich) 92

**X**

Xenotim (Y, Yb[PO<sub>4</sub>]; min.)  
100ff, 115, 141, 204, 208  
Xstrata/Barrick (Fa.) 224  
Xunwu, Jiangxi (China) 102, 205

**Y**

Yiliping Salzsee 88f  
Ytterbium (Yb, Lanthaniden) 14,  
16, 97, 100, 108, 141, 204  
Yttrics (schwere SEO)  
    ► Seltenerdelemente  
Yttrium (Y) 13f, 16, 65, 97f,  
100ff, 114, 125, 127, 133, 136,  
141, 201ff, 213ff, 254  
Yttrium-Aluminium-Granat  
(YAG; tech.) 215

**Z**

Zabuye Salzsee 88f  
Zimbabwe ► Simbabwe  
Zink (Zn) 16, 28, 49f, 64ff, 124,  
151ff, 165, 186ff, 222, 237f  
Zinnwald (Deutschland) 92  
Zinnwaldit  
(KLiFe<sup>2+</sup>Al(AlSi<sub>3</sub>)O<sub>10</sub>(F,OH)<sub>2</sub>;  
min.) 77, 90  
Zirkon (Zr) 103, 179, 203, 213ff,  
229  
Zirkulator(en) 14  
Zucker 10f, 194, 243  
Zuckerrohr 10f  
Zuckerrübe (bot.) 194  
Zyklon (tech.) 226  
Zypern 2, 267