



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

# Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge

---

# Strategische Rohstoffe — Risikovorsorge

---

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

# Strategische Rohstoffe — Risikovorsorge

 Springer Spektrum

*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 erfuhr 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 Lesern 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 „ <i>smart-standardization</i> “ . . . . .	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 Argentiniens . . . . .	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 Seltene Erden – Ein Balanceakt . . . . .</b>	<b>97</b>
8.1	Die Seltene Erden . . . . .	97
8.2	Die Dimensionen des globalen Seltenerdmarktes . . . . .	100
8.3	Globale Seltenerdressourcen . . . . .	100
8.4	Globales Angebot zu und globale Nachfrage nach Seltene Erden . . . . .	104
8.5	Angebot und Nachfrage zu einzelnen Selteneerdelementen . . . . .	108
8.6	China . . . . .	109
8.7	Japan . . . . .	113
8.8	Preise für Seltene Erden . . . . .	114
8.9	Ein Selteneerdprojekt entwickeln . . . . .	115
<b>9</b>	<b>Lagerstätten Seltene Erden in Namibia . . . . .</b>	<b>123</b>
9.1	Namibia als Bergbauland . . . . .	123
9.2	Die Lagerstätten Seltene 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

<b>10</b>	<b>Neue Technologien in Exploration und Lagerstättenentdeckung – Mit Fokus auf Aktivitäten in Europa</b>	<b>149</b>
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

<b>11</b>	<b>Technologiemetalle – Systemische Voraussetzungen entlang der Recyclingkette</b>	<b>161</b>
11.1	Bedeutung der Technologiemetalle	161
11.2	Recycling – Chancen und Herausforderungen	164
11.3	Voraussetzungen für den Recyclerfolg	168
<b>12</b>	<b>Integrierte Wiederverwendung von Hightech- und Greentech-Abfällen</b>	<b>173</b>
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
<b>13</b>	<b>Von der Klärschlammasche zum Phosphordünger – RecoPhos P38 im Spannungsfeld von Abfall-, Düngemittel- und Bodenschutzrecht</b>	<b>183</b>
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

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...“* (BMWi 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. Sichert 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

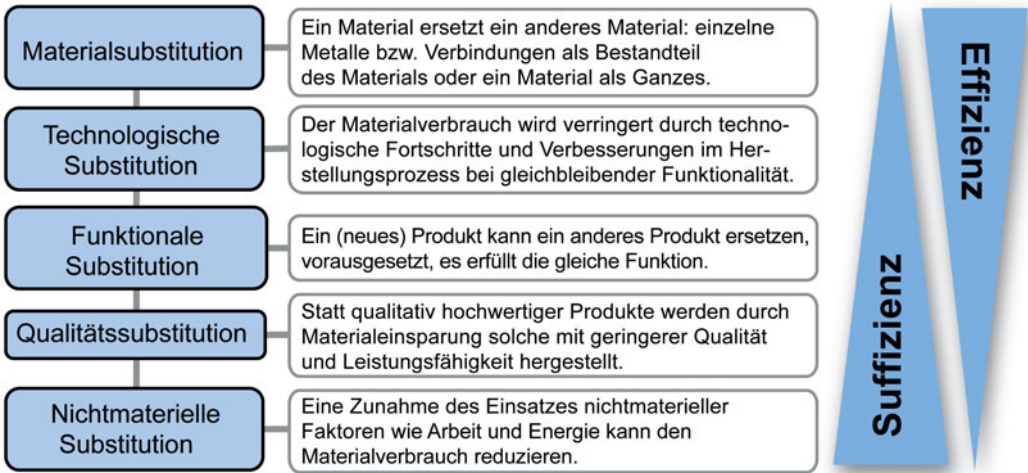


Abb. 1.1 Typen der Substitution (nach Ziemann u. Schebek 2010, nach Tilton 1983) und ihr Bezug zu Effizienz- und Suffizienzstrategie

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

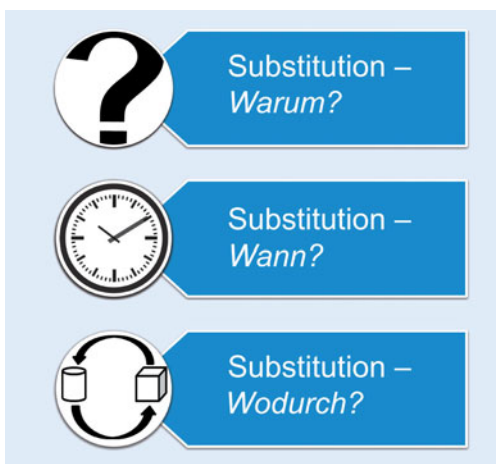



Abb. 1.2 Die drei Fragen nach Substitution

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 absehbarem 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 beispielweise 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 auf-tauchen 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 „Proalcool“ 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).

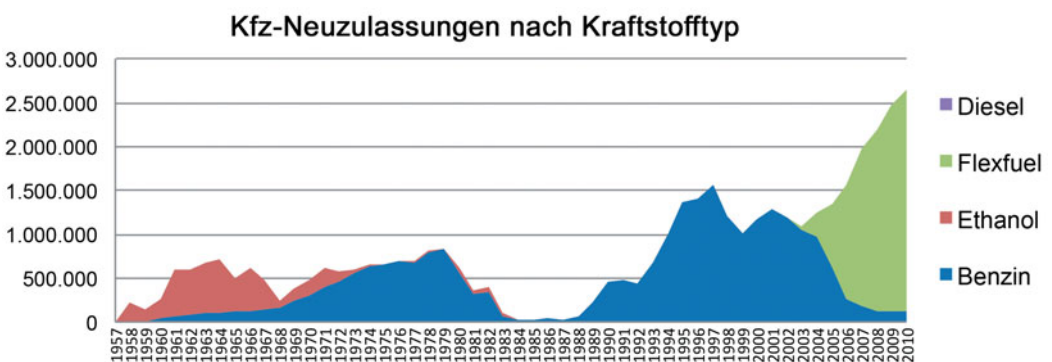


Abb. 1.3 Registrierung von neuen Automobilen nach Kraftstoffart in Brasilien (nach Anfavea 2011)

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
- BMWi (2006) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Arbeitsgruppe Energierohstoffe. Abteilung II. Kurzbericht zur Verfügbarkeit und Versorgung mit Energierohstoffen
- BMWi (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, Bienge 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, Hirschler 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