

Florian Neukirchen
Gunnar Ries

Die Welt der Rohstoffe

Lagerstätten, Förderung
und wirtschaftliche Aspekte

 Springer

Die Welt der Rohstoffe



Florian Neukirchen

Florian Neukirchen ist Mineraloge und Sachbuchautor. Nach dem Studium in Freiburg beschäftigte er sich an der Universität Tübingen mit alkalinen Magmatiten. Forschungsreisen führten ihn zum Oldoinyo Lengai nach Tansania, durch den Hohen Atlas in Marokko und zur Ilimaussaq-Intrusion in Grönland. Derzeit lebt und schreibt er in Berlin. Bisher erschienen *Von der Kupfersteinzeit zu den Seltenen Erden* (2016), *Edelsteine: Zeugen für die Erforschung der Erde* (2012) und *Bewegte Bergwelt: Gebirge und wie sie entstehen* (2011).



Gunnar Ries

Gunnar Ries studierte Mineralogie in Hamburg. Sein Interesse für das Verwitterungsverhalten ostafrikanischer Karbonatite führte ihn nach Uganda und Tansania. Er arbeitet bei der CRB Analyse Service GmbH in Hardegsen und bloggt in seiner Freizeit über geowissenschaftliche Themen bei Scilogs.com.

Florian Neukirchen
Gunnar Ries

Die Welt der Rohstoffe

Lagerstätten, Förderung und wirtschaftliche Aspekte

2. Auflage

Florian Neukirchen
Berlin, Deutschland
mail@riannek.de
www.riannek.de

Gunnar Ries
Marxen, Deutschland
gunnar-ries@gmx.de
www.scilogs.de/wblogs/blog/mente-et-malleo

ISBN 978-3-662-48241-4 ISBN 978-3-662-48242-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-48242-1

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, 2016

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, Meike Barth

Redaktion: Andreas Held

Satz und Digitalisierung der Abbildungen: Fotosatz-Service Köhler GmbH – Reinhold Schöberl, Würzburg

Einbandentwurf: deblik, Berlin

Einbandabbildung: Tagebau in Rio Tinto, Spanien. © Imagevixen/Shutterstock

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+BusinessMedia
www.springer-spektrum.de

Vorwort zur 2. Auflage

Für die im März 2014 erschienene 1. Auflage von *Die Welt der Rohstoffe* bekamen wir durchweg sehr positive Rezensionen und Briefe. Auch unsere vielen Käufer gaben uns recht: Unser durchaus unkonventionelles Konzept ist offensichtlich gelungen, ein Drahtseilakt irgendwo im Spannungsfeld zwischen populärwissenschaftlichem Sachbuch, Lehrbuch und Nachschlagewerk, mit dem wir ein sehr heterogenes Publikum ansprechen wollen. Das Buch sollte möglichst leicht verständlich werden, nicht viel geologisches Wissen voraussetzen und trotzdem tiefgründig schürfen und auch noch dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechen.

Wir freuen uns sehr, dass die wenigen uns übermittelten Kritikpunkte nur Kleinigkeiten betrafen, die wir in der vorliegenden 2. Auflage korrigiert haben. Die Änderungen betreffen überwiegend Schreibfehler, in den Inhalt haben wir kaum eingegriffen. Wir möchten Lars Fischer, Dr. Eberhard Strehl, Prof. em. Walter A. Franke, Detlev Seibert, Markus Hauser und allen Rezensenten danken, die uns auf Fehler aufmerksam machten und Ergänzungsvorschläge schickten.

Florian Neukirchen, Gunnar Ries

Berlin und Marxen, September 2016

Vorwort zur 1. Auflage

Glück auf! Wo Erze und fossile Energieträger zu finden sind, ist nicht nur für Geologen relevant. Dieses Buch richtet sich vor allem an Fachfremde, die sich näher mit dieser Materie beschäftigen wollen. Dennoch sind wir uns sicher, dass auch Geowissenschaftler von diesem Buch profitieren können. Ein gewisses geologisches Grundwissen ist bei der Lektüre sicherlich hilfreich, wir haben aber so weit wie möglich auf Fachbegriffe verzichtet oder diese erklärt. Hintergrundwissen wird in Kästen mitgeliefert, zusätzliche Hilfe leisten ein Glossar und ein Überblick über geologische Zeiten im hinteren Teil des Buches. Wichtige Erzminerale, die im Buch immer wieder vorkommen, werden in ► Abschn. 1.2 ausführlich vorgestellt, weitere finden sich in ► Kap. 2.

Besonderen Wert legen wir auf die Prozesse, die zur Anreicherung der entsprechenden Metalle geführt haben. Dabei haben wir den Anspruch, diese dem aktuellen Forschungsstand entsprechend darzustellen, und zwar so, dass auch komplizierte Zusammenhänge verständlich werden. Nur so wird das Zusammenspiel unterschiedlicher Faktoren deutlich, die zur Entstehung von Erzen beigetragen haben. Auch die Lagerstätten der »Hightech-Metalle« wie Tantal und der Seltenen Erden werden ausführlich erklärt. Während der Hauptteil des Buches nach Prozessen sortiert ist, bietet das zweite Kapitel einen alternativen Einstieg mit einem steckbriefartigen Überblick über die einzelnen Metalle. Auch moderne Anwendungen

von Metallen, an die viele vielleicht nicht im ersten Moment denken, haben wir erläutert, beispielsweise Platin in Katalysatoren. Das Kapitel über fossile Energie beschreibt auch die immer wichtigeren unkonventionellen Lagerstätten ausführlich, einschließlich der damit verbundenen Probleme. Zu guter Letzt geht es um Massenrohstoffe, um Kies, Kalk, Ton und so weiter.

Herzlich danken wir Frau Dr. Herting-Agthe von den Mineralogischen Sammlungen der TU Berlin. Sie hat geduldig unzählige Stufen aus Schränken und Vitrinen herausgesucht und auch Fotos aus dem Archiv zur Verfügung gestellt. Fotos von erstklassigen Mineralstufen aus dem Schwarzwald sind im Zusammenhang mit einem Buch von Prof. Gregor Markl entstanden, das demnächst erscheinen wird. Wir freuen uns sehr, dass wir diese verwenden durften. Thorsten Eckardt half bei der Literaturrecherche. Herzlich danken wir auch allen anderen, die uns Abbildungen zur Verfügung gestellt, unsere Fragen beantwortet oder uns anderweitig unterstützt haben.

Andreas Held danken wir für das sorgfältige Lektorat, Merlet Behncke-Braunbeck und Dr. Meike Barth (Springer Spektrum) für die gute Zusammenarbeit.

Florian Neukirchen, Gunnar Ries
Berlin und Marxen, Februar 2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Was ist ein Erz?	3
1.2	Ausgewählte Erzminerale	4
1.2.1	Sulfide	4
1.2.2	Oxide und Hydroxide	6
1.2.3	Karbonate	8
1.3	Ressourcen, Reserven und Verbrauch	9
1.4	Rohstoffmarkt	12
1.5	Wo suchen und wie?	13
1.6	Fernerkundung	15
1.7	Geophysikalische Exploration	17
1.8	Geochemische Exploration	22
1.9	Bohrungen	22
1.10	Tagebau	25
1.11	Bergbau unter Tage	26
1.12	In-situ-Laugung	29
1.13	Zukunftsmusik? Bergbau in der Tiefsee	30
1.14	Umweltzerstörung, Flächenverbrauch und soziale Verantwortung	30
1.15	Aufbereitung	32
1.16	Verhüttung	36
1.17	Recycling	39
1.18	Gegossen, geschmiedet und ziseliert	39
1.19	Die Zusammensetzung der Erde	41
1.20	Geochemische Einteilung der Elemente	44
	Literatur	48
2	Die Welt der Metalle	49
2.1	Eisen und Stahlveredler	49
2.1.1	Eisen (Fe)	49
2.1.2	Mangan (Mn)	50
2.1.3	Chrom (Cr)	52
2.1.4	Nickel (Ni)	53
2.1.5	Kobalt (Co)	53
2.1.6	Molybdän (Mo)	53
2.1.7	Vanadium (V)	54
2.1.8	Wolfram (W)	55
2.1.9	Tantal (Ta) und Niob (Nb)	55
2.2	Buntmetalle	56
2.2.1	Kupfer (Cu)	56
2.2.2	Blei (Pb)	57
2.2.3	Zink (Zn)	58
2.2.4	Kadmium (Cd)	59
2.2.5	Zinn (Sn)	59
2.3	Edelmetalle	60
2.3.1	Gold (Au)	60
2.3.2	Silber (Ag)	61
2.3.3	Platingruppenelemente (PGE)	61
2.4	Leichtmetalle	62
2.4.1	Aluminium (Al)	62
2.4.2	Titan (Ti)	63
2.4.3	Magnesium (Mg)	63
2.5	Seltenerdelemente (SEE)	63
2.6	Weitere Metalle und Halbmetalle	70
2.6.1	Lithium (Li)	70
2.6.2	Bor (B)	70

2.6.3	Beryllium (Be)	70
2.6.4	Germanium (Ge)	71
2.6.5	Indium (In)	71
2.6.6	Gallium (Ga)	71
2.6.7	Selen (Se) und Tellur (Te)	71
2.6.8	Thallium (Tl)	72
2.6.9	Quecksilber (Hg)	72
2.6.10	Antimon (Sb)	72
2.6.11	Arsen (As)	73
2.6.12	Bismut (Bi)	73
2.6.13	Uran (U) und Thorium (Th)	73
2.6.14	Zirkonium (Zr) und Hafnium (Hf)	74
2.6.15	Silizium (Si)	75
	Literatur	76
3	Magmatische Lagerstätten	79
3.1	Fraktionierung in Magmen (Einführung)	81
3.1.1	Schmelzbildung und Fraktionierung	81
3.1.2	Entmischung von Magmen	89
3.2	Podiforme Chromitlagerstätten in Ophiolithen	94
3.3	Layered Mafic Intrusions (LMI)	95
3.3.1	Magmatisches Layering und seine Ursachen	99
3.3.2	Chrom, Nickel und Platin in basischen Magmen	102
3.3.3	Bushveld	105
3.3.4	Great Dyke	108
3.3.5	Sudbury	109
3.4	Komatiit	113
3.5	Anorthosit	114
3.6	Kiruna-Typ Magnetit-Apatit-Eisenerz	115
3.7	Granit (Einführung)	116
3.7.1	Zinngranit	118
3.8	Pegmatit	118
3.9	Alkaligesteinskomplexe (Einführung)	123
3.10	Karbonatit	124
3.10.1	Phoscorit	128
3.11	Agpait	130
3.11.1	Ilimaussaq	132
3.11.2	Khibina und Lovozero	135
3.12	Ivigtut	136
	Literatur	137
4	Hydrothermale Lagerstätten	143
4.1	Adern und Gänge	148
4.1.1	Hydrothermale Gänge im Schwarzwald	151
4.1.2	Polymetallische Gänge im Erzgebirge	154
4.2	Orogene Goldadern	157
4.3	Epithermale Gold- und Gold-Silber-Lagerstätten	161
4.4	Kupferporphyr	165
4.4.1	Molybdän-Porphyr (Climax-Typ)	181
4.4.2	Goldporphyr (<i>intrusion-related gold</i>)	181
4.5	Zinn-Wolfram-Lagerstätten	181
4.6	Greisen	185
4.7	Eisenoxid-Kupfer-Gold-Lagerstätten (IOCG)	188
4.8	Chimney und Manto	190
4.9	Skarn	190
4.10	Metasomatische Sideritlagerstätten	193
4.11	Carlin-Typ-Gold	193
4.12	Mississippi-Valley-Typ (MVT)	195
4.13	Sandsteingebundene Kupfer- und Blei-Zink-Lagerstätten	199

4.14	Sandsteingebundene Uranlagerstätten und Diskordanzlagerstätten	199
4.15	Hydrothermale Systeme am Meeresboden (Einführung)	201
4.15.1	Schwarze Raucher	202
4.15.2	Marine Sole-Pools und Atlantis II	205
4.16	Vulkanogene massive Sulfidlagerstätten (VMS)	206
4.16.1	Zypern-Typ VMS im Troodos-Ophiolith	209
4.16.2	Besshi (Japan)	211
4.16.3	Kuroko (Japan)	211
4.16.4	Iberischer Pyritgürtel	215
4.17	Sedimentär-exhalative Lagerstätten (SEDEX)	217
4.18	Lahn-Dill-Typ-Eisenlagerstätten	221
	Literatur	222
5	Lagerstätten durch Sedimentation und Verwitterung	229
5.1	Kupferschiefer und Zentralafrikanischer Kupfergürtel	230
5.1.1	Zentralafrikanischer Kupfergürtel	233
5.2	Bändereisenerz (BIF)	234
5.3	Eisenoolithe	241
5.4	Bohnerz	243
5.5	Sedimentäre Manganlagerstätten	243
5.6	Manganknollen	244
5.7	Evaporite	246
5.7.1	Marine Evaporite	250
5.7.2	Salzseen und Salzpflanzen	254
5.8	Phosphorit	258
5.9	Seifenlagerstätten	259
5.10	Verwitterung (Einführung)	263
5.11	Laterit und Bauxit	266
5.11.1	Bauxit	267
5.11.2	Lateritische Nickellagerstätten	269
5.11.3	Lateritische Goldlagerstätten	271
5.11.4	Lateritische SEE-Lagerstätten (Ionenabsorbtionston)	271
5.12	Duricrusts	272
	Literatur	273
6	Fossile Energie	277
6.1	Vom Moor zur Kohle	279
6.2	Von der Alge zum Erdöl	285
6.3	Erdöl und Erdgas: Migration in die Falle	289
6.4	Das Öl vom Persischen Golf	295
6.5	Förderung von Erdöl und Erdgas	297
6.6	Peak Oil	301
6.7	Fracking: Schiefergas und <i>tight oil</i>	303
6.8	Ölschiefer	309
6.9	Teersand, Schweröl	310
6.10	Methanhydrate	312
	Literatur	313
7	Industriemineralien, Steine und Erden	317
7.1	Sand, Kies und Natursteine	317
7.2	Kalk, Mergel, Dolomit	318
7.3	Tuff, Bims, Perlit, Pozzulan und Trass	319
7.4	Feldspat, Quarz und Glimmer	320
7.5	Ton und Kaolin	320
7.6	Alumosilikate	324
7.7	Wollastonit	325
7.8	Granat	325
7.9	Olivin (Forsterit)	325
7.10	Magnesit, Talk und Speckstein	326

7.11 Korund	326
7.12 Diamant	327
7.13 Diatomit (Kieselgur)	328
7.14 Fluorit und Baryt	328
7.15 Zeolithe	328
7.16 Grafit	330
7.17 Schwefel	331
Literatur	332
Glossar	333
Weiterführende Literatur	342
Bildnachweis	343
Stichwortverzeichnis	345

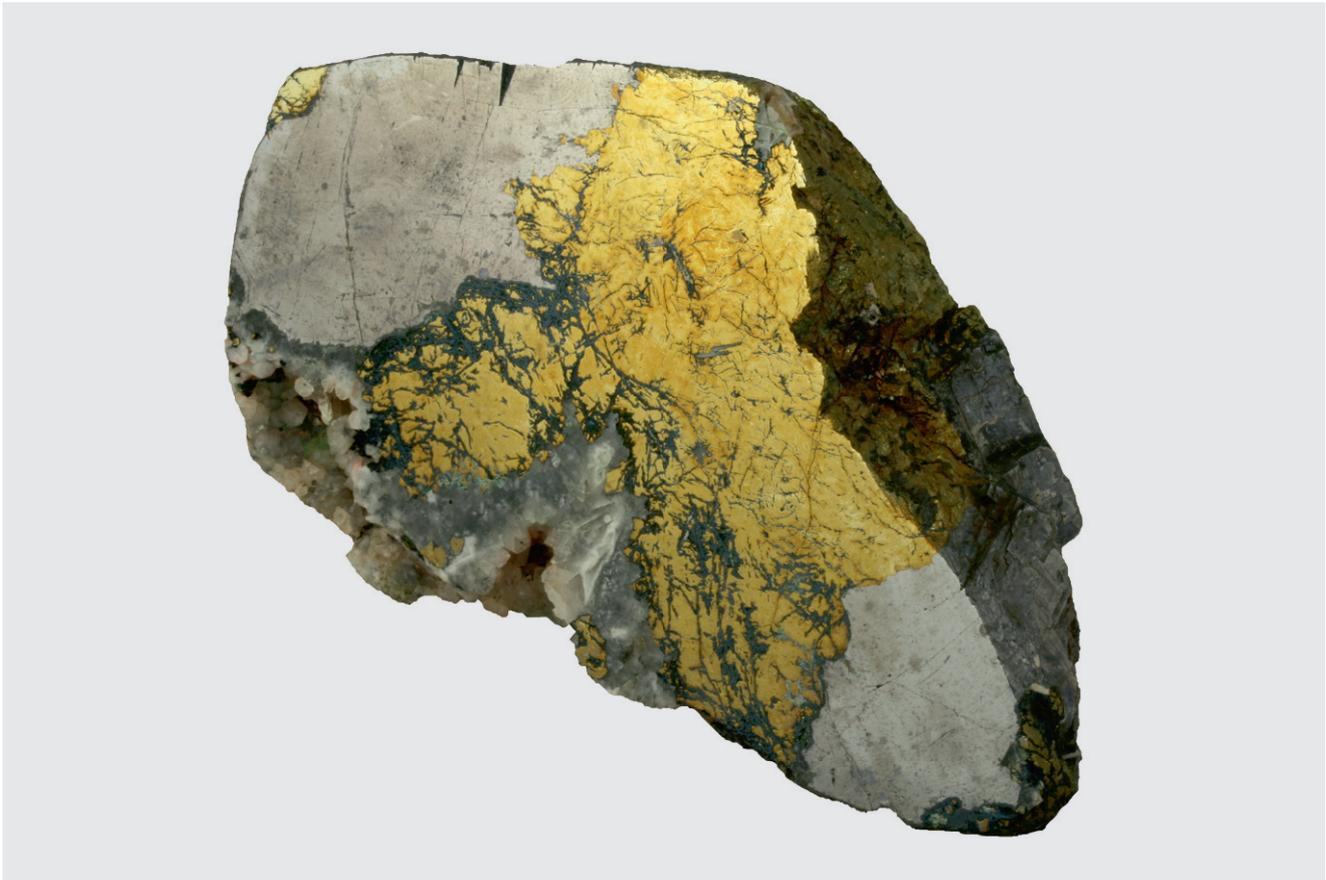
Inhaltsverzeichnis der Kästen

Kasten 1.1 Das Problem der Klassifizierung von Lagerstätten	2
Kasten 1.2 Stratiform, syngenetisch, epigenetisch, schichtgebunden	4
Kasten 1.3 Pyrit	10
Kasten 1.4 Kritische Rohstoffe	12
Kasten 1.5 Seltene Erden – der Weg zu Chinas Monopol	14
Kasten 1.6 Erzmikroskopie	15
Kasten 1.7 Bergrecht	15
Kasten 1.8 Renaissance des Bergbaus in Deutschland?	29
Kasten 1.9 Das Massaker von Marikana	31
Kasten 1.10 Cyanidkatastrophe in Rumänien	32
Kasten 1.11 Aufbereitung alter Halden und Spülteiche	35
Kasten 1.12 Wie die Elemente entstanden sind	41
Kasten 1.13 Chondrite, die Geburt der Erde und ein Kern aus Eisen	43
Kasten 1.14 Die Late-Veneer-Theorie	46
Kasten 1.15 Eisenmeteorite: Metall aus dem All	47
Kasten 2.1 Stahl	51
Kasten 2.2 Superlegierungen	53
Kasten 2.3 Katalysatoren	62
Kasten 2.4 Entdeckung der Seltenerdelemente	64
Kasten 2.5 Seltene Erden – auch in der Kiesgrube nebenan!	69
Kasten 2.6 Halbleiter	75
Kasten 3.1 SiO ₂ -Sättigung	81
Kasten 3.2 Klassifizierung magmatischer Gesteine	82
Kasten 3.3 Schmelzdiagramme	85
Kasten 3.4 Kompatible und inkompatible Spurenelemente	88
Kasten 3.5 Redoxzustand, Redoxpotenzial und die Sauerstoff fugazität	89
Kasten 3.6 Gediegen Eisen in Basalten	90
Kasten 3.7 Ophiolithe	91
Kasten 3.8 Chromit	95
Kasten 3.9 Ural-Platingürtel	102
Kasten 3.10 Norilsk	104
Kasten 3.11 Meteoritenkrater	112
Kasten 3.12 Die Welt im Archaikum	113
Kasten 3.13 Peralumisch, metalumisch, peralkalisch	117

Kasten 3.14	Coltan	122
Kasten 3.15	Phalaborwa	125
Kasten 3.16	Bayan Obo	129
Kasten 4.1	Was ist ein Fluid?	144
Kasten 4.2	Katathermal, mesothermal, epithermal, pneumatolytisch	145
Kasten 4.3	Lösung als Komplexe	148
Kasten 4.4	Flüssigkeitseinschlüsse	148
Kasten 4.5	Mineral- und Thermalwasser im Schwarzwald	151
Kasten 4.6	Kobalt-Nickel-Arsen-Silber-Bismut-Uran-Gänge in Wittichen	153
Kasten 4.7	Wassergefüllte »mobile Brüche«	160
Kasten 4.8	Minas Gerais	162
Kasten 4.9	Kordillere-Typ polymetallische Adern	165
Kasten 4.10	Quecksilber und Zinnober von Almadén	166
Kasten 4.11	Gediegen Kupfer vom Oberen See	167
Kasten 4.12	Porphyry und Kupferporphyry	168
Kasten 4.13	Stockwerk, massive und versprengte Erze	171
Kasten 4.14	Alteration	173
Kasten 4.15	El Teniente	176
Kasten 4.16	Die Oxidationszone in Kupferlagerstätten und der Eiserne Hut	179
Kasten 4.17	Der Cerro Rico von Potosí	182
Kasten 4.18	San Rafael	185
Kasten 4.19	Cornwall	186
Kasten 4.20	Olympic Dam	189
Kasten 4.21	Glasköpfe, Holzzinn und Schalenblende	197
Kasten 4.22	Tsumeb (Namibia), Kipushi (Kongo), Kabwe (Sambia)	199
Kasten 4.23	Oklo: ein natürlicher Atomreaktor	200
Kasten 4.24	»Chalcopyrite Disease«	204
Kasten 4.25	Leben in den Sole-Pools	205
Kasten 4.26	Dehnung im Backarc	209
Kasten 4.27	Abitibi-Grünsteingürtel	212
Kasten 4.28	Rammelsberg	218
Kasten 4.29	Salton Sea	222
Kasten 5.1	Mansfelder Kupferschiefer	233
Kasten 5.2	Stromatolithen: Frühes Leben sorgte für Sauerstoff in der Atmosphäre	238
Kasten 5.3	Kursker Magnetanomalie	240
Kasten 5.4	Beendete ein Meteoriteneinschlag die Bildung der BIF?	240
Kasten 5.5	Snowball Earth	241
Kasten 5.6	Bergbau auf Eisenerz und Rohstoff für den Straßenbau	243
Kasten 5.7	Glomar Explorer	245
Kasten 5.8	Bergwerk Merkers	248
Kasten 5.9	Zigong	248
Kasten 5.10	Kara-Bogas-Gol	251
Kasten 5.11	Sabkha	252
Kasten 5.12	Salzseen als Lebensraum	257
Kasten 5.13	Salz in der Antarktis	258
Kasten 5.14	Minjingu	259
Kasten 5.15	Sukulu und Bukusu (Uganda)	260
Kasten 5.16	Fluviatiler Transport und Sedimentation	262
Kasten 5.17	Nuggets	263
Kasten 5.18	Witwatersrand	264
Kasten 5.19	Schwerter aus dem Moor	272
Kasten 6.1	Das frühe Ölzeitalter	278
Kasten 6.2	Koks	280
Kasten 6.3	Kohleverflüssigung	280
Kasten 6.4	Die Zusammensetzung lebender Organismen	286
Kasten 6.5	Abiotische Kohlenwasserstoffe	288
Kasten 6.6	Zusammensetzung von Erdöl	291

Kasten 6.7	Permeabilität mit Wasser und Öl in den Poren	293
Kasten 6.8	Flüssiggas	301
Kasten 6.9	Erdölraffinerie	302
Kasten 6.10	Deepwater Horizon	304
Kasten 7.1	Zement, Beton und Mörtel	318
Kasten 7.2	Glas	321
Kasten 7.3	Keramik	323
Kasten 7.4	Asbest: Vom gefragten Rohstoff zur Altlast	327
Kasten 7.5	Füllstoffe	328

1 Einführung



Massives Erz mit Galenit (grau) und Chalkopyrit (messingfarben). Grube Friedrich-Christian, Wildschapbach (Schwarzwald). © F. Neukirchen, Sammlung Markl / Tübingen.

Der Verbrauch an mineralischen Rohstoffen ist in den letzten Jahrzehnten immer schneller gestiegen, nicht zuletzt aufgrund des rapiden Wirtschaftswachstums in Ländern wie China, Indien und Brasilien. Erdöl und Erdgas sind weiterhin die wichtigsten Energieträger, die weltweit Motoren und Turbinen antreiben, zugleich ist Erdöl der wichtigste Rohstoff für die Herstellung von Kunststoffen, diversen Medikamenten und anderen Produkten der chemischen Industrie. Metalle sind ebenso wenig aus unserer Welt wegzudenken. Ob in Form von Stahlträgern oder Kupferdrähten, im Tresor eingeschlossenen Goldbarren oder zur Schau gestelltem Silberschmuck, Platin in Katalysatoren, Tantal in elektronischen Kondensatoren, wir nutzen Metalle überall und auf die vielfältigste Weise. Zugleich sind durch immer neue Hightech-Anwendungen Namen von Elementen in aller Munde, die noch vor Kurzem ein Schattendasein am Rand des Periodensystems führten.

Doch die Ressourcen sind begrenzt und der Aufwand, neue Lagerstätten ausfindig zu machen und zu erschließen, nimmt zu. Damit erlangt die Frage, wie Lagerstätten entstehen und wo sie zu finden sind, immer mehr Bedeutung. Zwar ist uns, entgegen so mancher pessimistischer Prognose, bisher noch kein Rohstoff ausgegangen, doch bei einigen kritischen Rohstoffen könnte es durchaus einmal notwendig werden, nach Alternativen zu suchen.

Erz (engl. *ore*) ist ein Mineralgemenge, das aus ökonomischem Interesse abgebaut werden kann.

Lagerstätte (engl. *mineral deposit*): Ein Vorkommen von Erz wird als Lagerstätte bezeichnet.

Zum Glück sind die Stoffe, aus denen unsere Erde besteht, nicht homogen verteilt. Bei der Entstehung von Lagerstätten geht es

um die Prozesse, die zu einer wirtschaftlich nutzbaren Anreicherung der betreffenden Elemente geführt haben. So unterschiedlich die gesuchten Metalle sind, so unterschiedlich sind die Prozesse der Fraktionierung.

Eine besonders einfache und dennoch effektive Fraktionierung ist die Ablagerung von Goldnuggets und Goldflittern durch einen Fluss. Im Verlauf des Flusses ändert sich die Strömungsgeschwindigkeit, im Wasser transportierte Partikel werden dabei nach Größe und Dichte sortiert abgelagert. Gold wird an bestimmten Stellen bevorzugt abgelagert und bildet dort sogenannte Goldseifen (► Abschn. 5.9). Mit einer Waschpfanne oder mit Chemikalien können wir es schließlich aus dem Sand trennen. Ein anderer sedimentärer Prozess ist die Verdunstung, die zur Ablagerung von Evaporiten (► Abschn. 5.7) wie Salz und Gips führt. In diesen kann auch Lithium angereichert sein, ein besonders gut lösliches Alkalimetall, das in Akkus Verwendung findet. Nicht nur die Sedimentation, sondern auch die Verwitterung (► Abschn. 5.10) kann zur Bildung von Lagerstätten führen. Dabei geht es vor allem um jene Elemente, die bei der chemischen Verwitterung zurückbleiben, während alle löslichen Stoffe ausgelaugt werden.

Sehr viele Lagerstätten gehen auf hydrothermale Prozesse zurück (► Kap. 4): In heißem Wasser wurden bestimmte Stoffe

gelöst und an anderer Stelle wieder ausgefällt. Das kann an einer heißen Quelle am Meeresboden sein, in Gesteinsporen oder feinen Rissen oder entlang einer Verwerfung. In anderen Fällen wurde der Platz durch gleichzeitiges Auflösen des Gesteins geschaffen, oder es kam zu einem Stoffaustausch zwischen Wasser und Gestein. In hydrothermalen Systemen können sehr unterschiedliche chemische Reaktionen ablaufen und sehr unterschiedliche Minerale gebildet werden. Entsprechend vielgestaltig sind die hydrothermal gebildeten Lagerstättentypen.

Ein weiterer wichtiger Prozess der Fraktionierung ist Magmatismus (► Kap. 3), denn beim Aufschmelzen und beim anschließenden Kristallisieren kommt es zu einer starken Fraktionierung zwischen Schmelze und Gestein. Die Anzahl an magmatischen Lagerstättentypen ist relativ übersichtlich, es sind aber einige Giganten darunter. Auch als erster Fraktionierungsschritt für die anschließende Bildung von hydrothermalen oder sedimentären Lagerstätten ist Magmatismus nicht zu unterschätzen. Hier zeigt sich bereits, dass die Klassifizierung von Lagerstätten nicht immer leicht ist (► Kasten 1.1).

Die Entstehung von Erdöl, Erdgas und Kohle wiederum geht ursprünglich auf Lebewesen zurück, gefolgt von einer Reihe geologischer Prozesse, die in ► Kap. 6 besprochen werden.

Kasten 1.1 Das Problem der Klassifizierung von Lagerstätten

Es gibt keine zwei Lagerstätten, die sich gleichen. In jedem Einzelfall fanden unterschiedliche Prozesse nacheinander statt und das passierte unter wechselnden Bedingungen. Das macht die Klassifikation schwierig, egal wie viele »Schubladen« man zum Einordnen hernimmt. Es gibt immer einige Beispiele, die herausfallen oder die am besten in die Mitte zwischen zwei »Schubladen« gehören. Selbst die größte Einteilung, nämlich in magmatische, hydrothermale und sedimentäre Lagerstätten, ist problematisch, da es auch hier fließende Übergänge gibt. Entsprechend gibt es unzählige Ansätze zur Klassifikation und es darf nicht verwundern, wenn ein Vorkommen von unterschiedlichen Autoren jeweils in eine andere »Schublade« geschoben wird.

Aus ökonomischer Sicht mag es naheliegend sein, die Lagerstätten nach ihren Metallen zu gruppieren. Aus geologischer Sicht hat sich das jedoch nicht bewährt, es macht höchstens Sinn, die ökonomisch wichtigsten Metalle als zusätzliches Detail anzugeben. Wir sprechen dann zum Beispiel von »Blei-Zink-Gängen« oder »hochsulfidierten epithermalen Gold-Silber-Adern«.

Wesentlich attraktiver ist es natürlich, Lagerstätten nach den wichtigsten Prozessen ihrer Entstehung zu gruppieren. Es gibt nur zwei Nachteile: Zum einen ist dabei immer Interpretation im Spiel und die Einteilung könnte sich bei weiterer Forschung ändern. Zum anderen braucht es immer eine Gewichtung, welcher der beteiligten Prozesse am wichtigsten ist.

Hinzu kommt, dass häufig ganz unterschiedliche Lagerstättentypen aus ein und demselben Magma oder ein und demselben hydrothermalen Wasser entstehen können. Diese Typen kommen daher häufig gemeinsam vor, obwohl sie in unterschied-

liche »Schubladen« gehören. Man könnte die genetisch zusammengehörigen Vorkommen zusammenfassen, doch dann wird es einige Typen geben, die mehrfach genannt werden müssen. Zum selben Ergebnis käme man bei dem Versuch, die Lagerstätten nach der plattentektonischen Situation zu sortieren. Manche Autoren legen großen Wert auf das Gestein, in dem die Erze vorkommen (z. B. sedimentgebunden), andere wiederum mehr auf die Form der Erzkörper (z. B. Adern, Brekzien, versprengt im Gestein) oder den unmittelbaren Prozess der Ausfällung (z. B. Imprägnation, Verdrängung).

Es bleibt eine weitere Möglichkeit, nämlich die Einteilung anhand von wichtigen Prototypen, zum Beispiel »Zypern-Typ VMS«, »Carlin-Typ« oder »Mississippi-Valley-Typ«. Ganz davon abgesehen, dass man beliebig viele Prototypen definieren kann, ist es im Einzelfall oft schwierig zu entscheiden, ob eine Lagerstätte eher dem einen oder dem anderen Typ entspricht. Der Vorteil ist, dass ein einziges Schlagwort schon ein komplexes System beschreibt, das genetische Modell eingeschlossen. Ein interessantes zweidimensionales Schema, das die ökonomische Anreicherung der jeweiligen Metalle mit den wichtigsten Prozessen kombiniert, wird von Dill (2010) vorgeschlagen, aber er muss natürlich jeden Lagerstättentyp, in dem mehr als ein Metall vorkommt, entsprechend häufig besprechen. Wirklich durchgesetzt hat sich kein Klassifikationssystem. In der Regel wird ein Mix aus allem verwendet, so auch in diesem Buch. Man sollte sich dabei im Einzelfall weniger Gedanken um die Abgrenzung unterschiedlicher Typen machen, sondern vielmehr darüber, welche Prozesse bei der Entstehung abgelaufen sind. Ein Blick auf die Gemeinsamkeiten unterschiedlicher Lagerstättentypen kann dabei hilfreich sein.

Selbstverständlich entstehen auch heute neue Lagerstätten, im Vergleich zu unserem Verbrauch ist die Neubildung aber schlicht vernachlässigbar. In der Regel geht es in der Geologie um Zeiträume, die sich der menschlichen Vorstellung entziehen, um Jahrtausende. So lange will sicher niemand auf eine neue Lagerstätte warten, wir sind also auf die endlichen Vorkommen angewiesen, die sich im Lauf der Erdgeschichte gebildet haben, ohne durch Erosion wieder zu verschwinden.

1.1 Was ist ein Erz?

Erz (engl. *ore*) ist ein Mineralgemenge beziehungsweise ein Gestein, das aus ökonomischem Interesse abgebaut werden kann – wobei es in der Regel um die Gewinnung von Metallen geht. Der Begriff umfasst also nicht nur die Erzminerale selbst, wie zum Beispiel Chalkopyrit, Sphalerit, Magnetit, sondern auch die jeweiligen Gesteine, die mehr oder weniger hohe Anteile dieser Minerale enthalten. Was gewinnbringend ist, hängt natürlich von der aktuellen Marktlage und auch von technologischen Entwicklungen ab.

Wie hoch der Metallgehalt sein muss, ist je nach Metall sehr unterschiedlich. Eisenerz enthält oft mehr als 50 % Eisen, bei Zink und Blei sind es nur wenige Prozent des jeweiligen Metalls. Bei Kupfer und Nickel geht es schon bei 0,5 % los, bei Gold reichen schon 0,0001 %. Werden mehrere Metalle aus dem Erz gewonnen, dürfen die Werte entsprechend niedriger liegen. Der Gehalt des wirtschaftlich interessanten Metalls im Erz wird Erzgrad (engl. *ore grade*) genannt. Doch nicht nur der Metallgehalt spielt eine Rolle für die Bauwürdigkeit einer Lagerstätte, sondern auch, wie leicht das Metall durch Aufbereitung und Verhüttung aus dem Erz gewonnen werden kann (siehe ► Abschn. 1.15, ► Abschn. 1.16). Außerdem von Bedeutung sind die Größe einer Lagerstätte (solche mit großer Tonnage lohnen sich auch, wenn sie einen geringen Erzgrad haben) sowie die Kosten des Abbaus (z. B. durch günstigen Tagebau oder teure tiefe Schächte). »*Cut-off-grade*« ist der Mindestgehalt, bei dem sich ein Abbau einer bestimmten Lagerstätte gerade noch lohnt, alles darunter (das »Armerz«) ist streng genommen kein Erz, auch wenn Metalle daraus gewonnen werden können. Das unbrauchbare Nebengestein wird »taubes Gestein« genannt.

Der **Erzgrad**, also der Gehalt des wirtschaftlich interessanten Metalls, wird in Gewichtsprozent, bei sehr kleinen Gehalten meist als Gramm pro Tonne angegeben. Dabei gilt: $1 \text{ g} / \text{t} = 1 \text{ ppm} = 0,0001 \text{ \%}$.

Nur wenige Metalle und Halbmetalle kommen in der Natur in elementarer Form, also gediegen, vor: Platin, Gold, Silber, Kupfer, Quecksilber, Antimon, Arsen und sehr selten ein paar andere. Die Edelmetalle Gold und Platin kommen sogar bevorzugt gediegen vor, während die anderen meist in Form von Verbindungen auftreten. Die Metalle müssen also aus anderen Mineralen gewonnen werden. Die wichtigsten Erzminerale sind Sulfide (für Kupfer, Zink, Blei, Silber, Nickel, Molybdän) und

Oxide beziehungsweise Hydroxide (für Eisen, Mangan, Aluminium, Chrom, Titan, Zinn, Uran, Niob, Tantal). Silikatminerale sind bis auf wenige Ausnahmen (Beryll, Spodumen, Zirkon, Eudialyt, Garnierit und so weiter) nicht als Erz geeignet, weil bei den meisten aggressive Chemikalien eingesetzt werden müssen, um sie aufzulösen – und für die meisten Metalle stehen leichter zu verarbeitende Minerale zur Verfügung. Im Gegensatz dazu lassen sich Karbonate (Malachit, Azurit, Siderit, Cerussit, Smithsonit, Magnesit) gut verarbeiten. Sie kommen jedoch meist nur in begrenzter Menge vor und haben im Vergleich zu entsprechenden Oxiden oder Sulfiden einen geringeren Metallgehalt. Da das beim Verhütten aus dem Erz freigesetzte Kohlendioxid (CO_2) die Reduktion behindert, werden die Karbonate in der Regel zunächst durch Erhitzen in Oxide umgewandelt (Kalzinierung).

Erze aus anderen Mineralgruppen wie Arsenide, Arsenate, Wolframate oder Vanadate kommen in der Regel nur untergeordnet in geringer Menge vor, können aber lokal von wirtschaftlicher Bedeutung sein. Ein Sonderfall sind die Seltenerdelemente (SEE), die vorwiegend aus den Mineralen Monazit (SEE-Phosphat) und Bastnäsit (SEE-Fluorokarbonat) gewonnen werden. Lithium und Zink lassen sich sogar aus entsprechendem Salzwasser gewinnen, das man als »flüssiges Erz« ansehen muss (siehe ► Abschn. 5.7.2 und ► Kasten 4.29).

Üblicherweise enthält Erz nicht nur interessante Erzminerale, sondern auch unbrauchbare Minerale wie Quarz, Feldspat, Kalzit, Baryt und Fluorit, die nach Möglichkeit vor der Verhüttung abgetrennt werden. Von den Bergleuten werden sie als »Gangart« bezeichnet. Heutzutage sind manche Gangarten selbst gefragte Rohstoffe (► Abschn. 7.14).

Oft können aus einem Erz mehrere Metalle gewinnbringend gewonnen werden. Das wirtschaftlich bedeutendste Metall ist dabei selten das mit dem höchsten Gehalt. Bei vielen Sulfidlagerstätten zum Beispiel ist Eisen das häufigste Metall (etwa in Pyrit, Pyrrhotin, Arsenopyrit und Chalkopyrit enthalten), es landet jedoch im Abfall.

Eine ganze Reihe von Metallen wird nur als Nebenprodukt gewonnen. Das betrifft vor allem seltene beziehungsweise in geringer Menge verbrauchte Metalle, auch wenn es sich um wichtige Hightech-Anwendungen handelt. Bei diesen fallen Angebot und Nachfrage oft weit auseinander, was stark schwankende und zuweilen extrem hohe Preise bewirkt.

Ein Erzvorkommen wird Lagerstätte (engl. *mineral deposit*) genannt. Ob eine Lagerstätte abbauwürdig ist, hängt neben den erzielbaren Rohstoffpreisen natürlich auch von den Kosten des Abbaus, von den Erschließungskosten (Infrastruktur) und von der Größe der Lagerstätte ab. ► Kasten 1.2 stellt einige wichtige Begriffe vor.

Kasten 1.2 Stratiform, syngenetisch, epigenetisch, schichtgebunden ...

Syngenetisch ist eine Lagerstätte, deren Erze gleichzeitig mit dem Gestein entstanden, das sie umgibt. Zum Beispiel Seifenlagerstätten (► Abschn. 5.9), BIF (► Abschn. 5.2), LMI (► Abschn. 3.3). Auch SEDEX (► Abschn. 4.17) und VMS (► Abschn. 4.16) sind weitgehend syngenetisch, es kommt bei diesen aber auch zur Verdrängung von älterem Gestein.

Diagenetisch ist eine Lagerstätte, die entstand, während ein lockeres Sediment zu einem festen Gestein verfestigt wurde. Sie ist sozusagen beinahe syngenetisch. Zum Beispiel Kupferschiefer (► Abschn. 5.1) und bestimmte Zonen in SEDEX.

Epigenetisch ist eine Lagerstätte, bei der Erze innerhalb von älterem Nebengestein entstanden sind. Dies trifft auf die meisten hydrothermalen Lagerstätten zu (Adern, Gänge, Verdrängungen, Imprägnation, Metasomatose; siehe ► Kap. 4).

Stratiform ist eine schichtförmige Lagerstätte, die parallel zu den Gesteinsschichten (also konkordant) liegt. Sie kann dabei syngenetisch oder epigenetisch sein. Zum Beispiel Kohleflöze (► Abschn. 6.1), massive Erze in SEDEX-Lagerstätten (► Abschn. 4.17).

Schichtgebunden (stratabound) ist eine Lagerstätte, die sich nur in einer bestimmten Gesteinsschicht befindet. Dabei kann sie stratiform sein (z. B. SEDEX, ► Abschn. 4.17), unregelmäßig geformt (z. B. viele sandsteingebundene Lagerstätten, ► Abschn. 4.13) oder auch diskordant die betreffende Schicht durchschneiden (z. B. Chimneys, ► Abschn. 4.8). Sie kann syngenetisch, diagenetisch oder epigenetisch sein.

Diskordant ist eine Lagerstätte, wenn sie Gesteinsschichten durchschneidet, insbesondere Gänge und Adern, Explosionsbrekzien.

1.2 Ausgewählte Erzminerale

1.2.1 Sulfide

Chalkopyrit (Kupferkies)

CuFeS_2 (► Abb. 1.1)

Kristallsystem	tetragonal
Farbe	gold- bis messinggelb mit Grünstich
Glanz	Metallglanz
Strichfarbe	schwarz, grünlich schwarz

Der Kupfergehalt beträgt 35 %. Das wichtigste Kupfererz bildet meist massive Aggregate. Es kommt in vielen Typen von Sulfid-

lagerstätten vor. Hydrothermal häufig zusammen mit Bornit und Pyrit (► Kasten 1.3), in magmatischen Sulfidlagerstätten mit Pentlandit und Pyrrhotin (FeS).

Bornit (Buntkupferkies)

Cu_5FeS_4 (► Abb. 1.2)

Kristallsystem	orthorhombisch
Farbe	bronze- bis kupferfarben, läuft bunt an
Glanz	Metallglanz
Strichfarbe	grauschwarz

Der Kupfergehalt beträgt 63 %. Häufiges Kupfererz, bildet massive Aggregate. Kommt oft zusammen mit Chalkopyrit als primäres Erz vor.



Abb. 1.1 Chalkopyrit auf Quarz. Grube Silberwiese, Oberlahr (Westerwald). © Monika Günther / Archiv Mineralogische Sammlungen der TU Berlin.



Abb. 1.2 Bornit mit typischen Anlauffarben. Mexiko. © Géry Parent/Wikimedia.

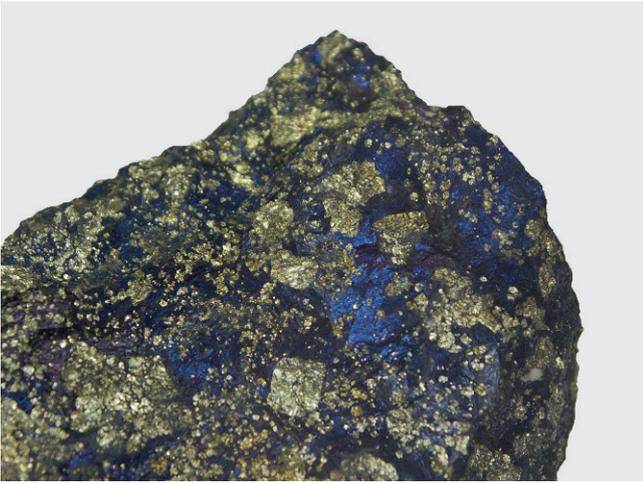


Abb. 1.3 Covellin und Pyrit. Von Cuka Dulkan bei Bor (Serbien).
© F. Neukirchen / Mineralogische Sammlungen der TU Berlin.

Covellin (Kupferindig)

CuS (■ Abb. 1.3)

Kristallsystem	hexagonal
Farbe	dunkelblau
Glanz	halbmetallisch
Strichfarbe	bläulich schwarz

Kommt oft in kleinen Mengen als sekundäres Mineral vor, hat einen Kupfergehalt von 66 %.

Chalkosin (Kupferglanz)

Cu_2S (■ Abb. 1.4)

Kristallsystem	monoklin
Farbe	bleigrau, stahlgrau, matt und dunkel anlaufend
Glanz	Metallglanz auf frischem Bruch, matt anlaufend
Strichfarbe	grauschwarz

Wichtiges Kupfererz, mit einem Kupfergehalt von 80 %. Kommt vor allem in der Zementationszone von Kupferlagerstätten vor.

Tennantit-Tetraedrit (Fahlerz)

Tennantit $\text{Cu}_{12}[\text{S}]\text{As}_4\text{S}_{12}$

Tetraedrit $\text{Cu}_{12}[\text{S}]\text{Sb}_4\text{S}_{12}$ (■ Abb. 1.5)

Kristallsystem	kubisch
Farbe	stahlgrau, grünlich bis bläulich
Glanz	fahler Metallglanz
Strichfarbe	grauschwarz, rötlich grau

Es gibt eine komplette Mischungsreihe zwischen dem Antimon- und dem Arsenendglied. Können hohe Gehalte an Fe, Zn, Ag und Hg haben. Silbergehalt oft im Prozentbereich, in Freibergit bis zu 18 %. Wichtiges Kupfer- und Silbererz.

Enargit

Cu_3AsS_4

Kristallsystem	orthorhombisch
Farbe	grau, grauschwarz
Glanz	blendartiger Metallglanz
Strichfarbe	schwarz

In hydrothermalen Gängen, insbesondere im Andenraum.



Abb. 1.4 Chalkosin. Mammoth Mine, Revier Mount Isa-Cloncurry, Queensland (Australien). © Rob Lavinsky / iRocks.com.



Abb. 1.5 Fahlerz. Grube Wenzel, Oberwolfach (Schwarzwald).
© F. Neukirchen, Sammlung Markl / Tübingen.

Pentlandit

$(\text{Ni}, \text{Fe})_9\text{S}_8$

Kristallsystem	kubisch
Farbe	bronzegelb
Glanz	Metallglanz
Strichfarbe	schwarz

Wichtigstes Nickelerz. Häufig als Entmischungslamellen in Pyrrhotin (FeS) oder in Aggregaten mit Pyrrhotin. Oft zusammen mit Chalkopyrit.

Galenit (Bleiglanz)

PbS (■ Abb. 1.6)

Kristallsystem	kubisch
Farbe	bleigrau
Glanz	Metallglanz
Strichfarbe	grauschwarz

Wichtigstes Bleierz. Hat meist einen Silbergehalt von 0,01–0,3 %, manchmal auch mehr, was ihn aufgrund seiner Häufigkeit zu einem wichtigen Silbererz macht. Häufig in hydrothermalen Sulfidlagerstätten zusammen mit Sphalerit. Oft gut ausgebildete Kristalle: Würfel, Kombinationen aus Würfel-, Oktaeder-, Rhombendodekaederflächen.

Sphalerit (Zinkblende)

ZnS (■ Abb. 1.7)

Kristallsystem	kubisch
Farbe	gelb (»Honigblende«), braun, rot, ölgrün, schwarz
Glanz	Diamantglanz
Strichfarbe	gelblich bis dunkelbraun

Das Zinksulfid ist durchsichtig bis kantendurchscheinend. Es kommt häufig in hydrothermalen Lagerstätten zusammen mit Galenit vor. Kristalle insbesondere Tetraeder und Rhombendodekaeder. Oft hoher Eisengehalt und dann dunkel gefärbt und opak. Eisenfreier Sphalerit ist gelb und durchsichtig (»Honigblende«). Schalenblende ist ein braunes, schalenförmiges Aggregat aus Sphalerit und Wurtzit (ebenfalls ZnS). Sphalerit enthält meist auch Mangan, Kadmium und in Spuren Indium, Gallium, Tellur und Germanium.

1.2.2 Oxide und Hydroxide**Chromit**FeCr₂O₄ (■ Abb. 1.8)

Kristallsystem	kubisch
Farbe	schwarz, bräunlich schwarz
Glanz	Metallglanz bis halbmattlicher Glanz
Strichfarbe	dunkelbraun

Ein Mineral der Spinellgruppe. Wichtigstes Chromerz, siehe ► Kasten 3.8.

MagnetitFe₃O₄ (■ Abb. 1.9)

Kristallsystem	kubisch
Farbe	schwarz, grau
Glanz	Metallglanz
Strichfarbe	schwarz

Sehr häufiges Mineral, in vielen Gesteinen enthalten. Wichtiges Eisenerz, zuweilen aufgrund des hohen Titangehalts wichtiges Titanerz. Mineral der Spinellgruppe mit zwei- und dreiwertigem Eisen: Fe²⁺(Fe³⁺)₂O₄. Magnetisch.



Abb. 1.6 Galenit auf Siderit und Quarz. Von Neudorf bei Harzgerode (Harz). © Rob Lavinsky / irocks.com.



Abb. 1.7 Sphalerit (»Honigblende«) von Santander (Spanien). © F. Neukirchen / Mineralogische Sammlungen der TU Berlin.



Abb. 1.8 Chromit (»Kokardenerz«) aus einer podiformen Chromlagerstätte (Fundort unbekannt). © Andrew Silver, USGS.



Abb. 1.9 Schöne Magnetitkristalle in Oktaederform sind weniger in Eisenlagerstätten als in metamorphen Gesteinen zu finden. Diese Kristalle stammen aus einem Serpentinit bei Zermatt, Schweiz. © F. Neukirchen.



Abb. 1.10 Hämatit. Fibbia, Gotthard, Schweiz. © Rob Lavinsky / iRocks.com.

Hämatit

Fe_2O_3 (■ Abb. 1.10)

Kristallsystem	trigonal
Farbe	rötlich, grau bis schwarz
Glanz	Metallglanz
Strichfarbe	kirschrot

Kristalle oft schuppig bis tafelig (»Eisenglimmer«). Häufig sind nieriige Aggregate mit stark glänzender Oberfläche (Roter Glaskopf, ► Kasten 4.21). Wichtiges Eisenerz.

Ilmenit

FeTiO_3 (■ Abb. 1.11)

Kristallsystem	trigonal
Farbe	schwarz, braunschwarz, stahlgrau
Glanz	auf frischem Bruch Metallglanz, sonst matt
Strichfarbe	schwarz, fein zerrieben dunkelbraun

Wichtiges Titanerz.



Abb. 1.11 Ilmenit von Løvjomås, Froland bei Arendal (Norwegen). © F. Neukirchen / Mineralogische Sammlungen der TU Berlin.

Pyrolusit

$\beta\text{-MnO}_2$ (■ Abb. 1.12)

Kristallsystem	tetragonal
Farbe	dunkelgrau
Glanz	Metallglanz
Strichfarbe	schwarz

Wichtigstes Manganerz. Auch als Schwarzer Glaskopf (► Kasten 4.21).

Kassiterit (Zinnstein)

SnO_2 (■ Abb. 1.13)

Kristallsystem	tetragonal
Farbe	schwarz, schwarzbraun, gelbbraun
Glanz	blendartiger Diamantglanz, Fettglanz
Strichfarbe	gelb bis fast farblos

Wichtigstes Zinnerz. Kristalle tafelig, nadelig (Nadelzinn), Bipyramiden. Braune schalige Aggregate (Holzzinn). In Zinngraniten und hydrothermalen Lagerstätten, auf Seifen. Im Erzgebirge wurden die Kristalle als Graupen bezeichnet.



Abb. 1.12 Pyrolusit. Gremmlsbach bei Triberg (Schwarzwald). © F. Neukirchen, Sammlung Markl / Tübingen.



Abb. 1.13 Kassiterit (Zwilling, sogenannte »Visiergraupe«). Cínovec (Zinnwald), Erzgebirge (Tschechien). © Monika Günther / Archiv Mineralogische Sammlungen der TU Berlin.



Abb. 1.14 Goethit (Brauner Glaskopf). Grube Rossbach, Siegerland. © Bernd Kleeberg / Archiv Mineralogische Sammlungen der TU Berlin.

Uraninit (Pechblende)

UO_2 bis U_3O_8

Kristallsystem	kubisch, Kristallgitter oft durch Strahlung zerstört
Farbe	schwarz
Glanz	Fettglanz bis Metallglanz
Strichfarbe	bräunlich schwarz

Stark radioaktiv. Der Urangehalt sinkt mit zunehmendem Alter durch radioaktiven Zerfall.

Goethit (Nadeleisenerz, Brauner Glaskopf)

$\alpha\text{-FeOOH}$ (■ Abb. 1.14)

Kristallsystem	orthorhombisch
Farbe	schwarzbraun bis hellgelb
Glanz	Metallglanz, Seidenglanz, erdig
Strichfarbe	braun, gelbbraun

Entsteht häufig bei der Verwitterung von Sulfidlagerstätten. Auch als Brauner Glaskopf. Erdige gelbe Massen, die aus unterschiedlichen Eisenhydroxiden bestehen, werden als Limonit bezeichnet.

Gibbsit

$\gamma\text{-Al(OH)}_3$

Kristallsystem	monoklin
Farbe	farblos, weiß, grau
Glanz	Glasglanz, Perlmuttglanz
Strichfarbe	weiß

Zusammen mit anderen Mineralien ein Bestandteil von Bauxit (Aluminiumerz). Auch in Laterit enthalten.

Diaspor

$\alpha\text{-AlOOH}$

Kristallsystem	orthorhombisch
Farbe	farblos, weiß, grau, grünlich, rötlich
Glanz	Glasglanz, Perlmuttglanz
Strichfarbe	weiß

Zusammen mit anderen Mineralien ein Bestandteil von Bauxit (Aluminiumerz). Auch in Laterit enthalten.



Abb. 1.15 Malachit. Grube Gottesehre, Urberg (Schwarzwald). © F. Neukirchen, Sammlung Markl / Tübingen.

1.2.3 Karbonate

Malachit

$\text{Cu}_2[(\text{OH})_2\text{CO}_3]$ (■ Abb. 1.15)

Kristallsystem	monoklin
Farbe	grün
Glanz	Glas- oder Seidenglanz
Strichfarbe	hellgrün

Sehr häufig in der Oxidationszone (► Kasten 4.16) von Kupferlagerstätten.

Azurit

$\text{Cu}_3[(\text{OH})|\text{CO}_3]_2$ (■ Abb. 1.16)

Kristallsystem	monoklin
Farbe	azurblau
Glanz	Glasglanz
Strichfarbe	hellblau

In der Oxidationszone von Kupferlagerstätten.

Siderit (Eisenspat)

FeCO_3 (■ Abb. 1.17)

Kristallsystem	trigonal
Farbe	gelb, braun
Glanz	Glas- oder Perlmutterglanz
Strichfarbe	gelblich weiß

1.3 Ressourcen, Reserven und Verbrauch

Dass Erze, fossile Energieträger und andere Rohstoffe nur in begrenzter Menge vorhanden sind, ist allgemein bekannt. Es ist aber nahezu unmöglich, die Reichweite eines bestimmten Rohstoffs anzugeben. Immer wieder werden neue Lagerstätten entdeckt, während bei bekannten Lagerstätten die Abschätzung der vorhandenen Erzmenge regelmäßig nach oben oder unten korrigiert werden muss. Steigende Preise oder neue Technologien können zudem Vorkommen profitabel machen, die zuvor als nicht lohnend galten. Langfristig werden Lagerstätten in abgelegenen Gebieten und Vorkommen mit geringem Erzgrad immer wichtiger werden.

Gesicherte Vorkommen, die zur gegebenen Marktlage und Technik profitabel gefördert werden können, werden als Reserven bezeichnet. Der Begriff Ressourcen umfasst hingegen Vorkommen, die nur vermutet werden, und solche, deren Abbau sich derzeit nicht lohnt. Es ist fast die Regel, dass die weltweiten Reserven eines bestimmten Rohstoffs dem Bedarf von nur wenigen Jahrzehnten entsprechen. Das ist noch kein Grund zur Sorge, da sich Ressourcen durch steigende Preise, bessere Technik und fortgesetzte Exploration in Reserven verwandeln. Versorgungsengpässe können trotzdem auftreten, beispielsweise wenn es zu plötzlichen Ausfällen in politisch instabilen Regionen kommt.

Ein weiterer unbekannter Faktor ist der Verbrauch. Besonders massiv steigt der Rohstoffverbrauch in aufstrebenden Ländern wie Brasilien, Indien und allen voran China. Wenn die Infrastruktur eines Landes schnell ausgebaut wird, bedeutet das einen hohen Verbrauch an Stahl, Kupfer und so weiter. Hinzu kommt der Ausbau von Industriezweigen, die Metall verbrauchen und die nicht nur den eigenen Markt beliefern, sondern in alle Welt exportieren. Für viele Metalle ist China schon seit Jahren der größte Verbraucher, mit noch immer schnellen Zuwachsraten. Der Metallverbrauch kann zu einem gewissen Grad in die Zukunft extrapoliert werden, es kommt aber immer wieder zu unvorhersehbaren Abweichungen. Wirtschaftskrisen wie in den Jahren nach der Finanzkrise 2007 führen zu einem Einbrechen der Nachfrage, sinkenden Preisen und daraufhin



Abb. 1.16 Azurit auf Dolomit. Tsumeb (Namibia). © Bernd Kleeberg / Archiv Mineralogische Sammlungen der TU Berlin.



Abb. 1.17 Siderit. Grube Hoffnung und Segen Gottes, Stollberg (Harz). © Monika Günther / Archiv Mineralogische Sammlungen der TU Berlin.

zu Schließungen von Minen. Ebenso schlagartig können sich technologische Entwicklungen auswirken, insbesondere, wenn weitverbreitete Hightech-Bauteile durch solche mit anderer Zusammensetzung ersetzt werden.

Die geförderte Metallmenge (■ Abb. 1.19) passt sich so weit wie möglich an den Bedarf an. Ein Problem ist, dass die Produktion nur sehr träge auf eine veränderte Marktlage reagiert. Eine Grube kann zwar relativ schnell stillgelegt werden, wenn sie nicht mehr profitabel ist, aber bei gestiegenen Preisen eine neue Mine zu erschließen, dauert meist ein Jahrzehnt oder mehr. Ganz ähnlich lässt sich die Kapazität bestehender Anlagen nur mit großen Investitionen und baulichen Veränderungen erweitern. Bei niedrigen Preisen wird kaum in die Suche nach neuen Lagerstätten investiert. Steigt der Preis plötzlich, ist das Gegenteil der Fall und möglicherweise gehen nach einem Jahrzehnt so viele neue Minen gleichzeitig in Betrieb, dass der Preis wieder abstürzt und ein Teil wieder geschlossen werden muss. Immerhin sind dann die Reserven vorläufig größer geworden.

Entgegen so mancher pessimistischer Prognose ist noch kein Rohstoff ausgegangen. Die häufig zitierte Studie *Die Grenzen des*

Kasten 1.3 Pyrit

Das goldfarbene metallisch glänzende Eisensulfid Pyrit (FeS_2 , **■** Abb. 1.18) ist das mit Abstand häufigste und am weitesten verbreitete Sulfidmineral. In Museen sind oft perfekte Würfel oder Pentagondodekaeder zu sehen, manchmal auch pyritisierte Fossilien oder Tonsteine mit sonnenförmigen Aggregaten. Umgangssprachlich wird Pyrit als Katzensgold bezeichnet, die Bergleute nannten ihn Schwefelkies.

Dieses Mineral kann bei sehr variablen Bedingungen in einer Vielzahl von Milieus entstehen. Bei der Verfestigung (Diagenese) von Sedimenten, insbesondere in Tonstein, bildet er sich durch die Wirkung von sulfatreduzierenden Bakterien. Unter diesen Bedingungen tritt er oft zusammen mit Markasit auf, der dieselbe Zusammensetzung in einem anderen Kristallgitter hat (orthorhombisch).

Pyrit kommt auch in fast allen hydrothermalen Lagerstättentypen vor und ist nicht selten das dominierende Mineral (z. B. bei manchen SEDEX-Lagerstätten, ► Abschn. 4.17, und in bestimmten Zonen von VMS-Lagerstätten, ► Abschn. 4.16). Schließlich gibt es auch magmatisch gebildeten Pyrit, insbesondere in mafischen Intrusionen, wo er untergeordnet zusammen mit dem schwefelärmeren Pyrrhotin (FeS) vorkommen kann.

Tatsächlich kann Pyrit immer entstehen, wenn ausreichend Fe^{2+} und S^{2-} vorhanden sind – unabhängig von der Temperatur. Entsprechend sind reduzierte Bedingungen die wichtigste Voraussetzung. Außerdem muss ein hydrothermales Fluid zumindest leicht, besser stark sauer sein.

Allerdings kann ein Fluid gleichzeitig an mehreren Metallen übersättigt sein, zum Beispiel neben Eisen auch an Kupfer oder Arsen, sodass Chalkopyrit (CuFeS_2) oder Arsenopyrit (FeAsS) oder andere Minerale gebildet werden. Je nachdem, wie die Verhältnisse der ausgefallenen Metalle sind, kommen diese zusammen mit Pyrit oder mit anderen Sulfiden vor. Die Folge ist, dass Pyrit in hydrothermalen Systemen oft sehr

früh und sehr spät gebildet wird, unterbrochen von der Kristallisation anderer Sulfide.

Manchmal enthält Pyrit mikroskopisch kleine Goldkörner, das »Katzensgold« ist in diesem Fall tatsächlich ein Golderz. Als Eisenerz ist Pyrit aus heutiger Sicht ungeeignet. Er kann nur verhüttet werden, wenn er in einem ersten Schritt durch Rösten in Eisenoxid verwandelt wird, was große Mengen an umweltschädlichem SO_2 freisetzt. Da ist es einfacher, gleich Oxide (Magnetit, Hämatit) zu verwenden. Trotzdem wird Pyrit abgebaut und geröstet, allerdings in erster Linie, um Schwefelsäure zu produzieren. Dies hat jedoch keine große Bedeutung mehr, da Schwefelsäure auch bei der Verhüttung anderer Sulfide als Nebenprodukt hergestellt werden kann, insbesondere bei der Kupferproduktion.

Historisch spielte Pyrit zumindest in manchen Regionen eine Rolle in der frühen Eisenproduktion. Noch wichtiger war Pyrit in der Frühgeschichte durch eine andere Eigenschaft: Schlägt man einen anderen Stein (z. B. einen Feuerstein) dagegen, gibt es Funken, mit denen ein Feuer entfacht werden kann. Pyrit ist auch schuld am sauren Regen: Stein- und Braunkohle enthält etwas Pyrit und andere Schwefelverbindungen, die beim Verbrennen oxidiert werden. Das freigesetzte SO_2 löst sich in kondensierten Wassertröpfchen zu Schwefelsäure. Ganz ähnlich läuft die Verwitterung von Pyrit und anderen Sulfiden ab. Daher sammelt sich in aufgegebenen Bergwerken oft ein extrem saures Grubenwasser an, in dem nur spezielle Mikroorganismen überleben können. Darunter sind einige, wie *Acidithiobacillus ferrooxidans*, deren Stoffwechsel auf der Oxidation von Sulfiden beruht, was die Verwitterung beschleunigt. Auf den ersten Blick ist vielleicht verwirrend, dass der Schwefel in Pyrit scheinbar die Oxidationsstufe -1 hat und nicht, wie es eigentlich sein sollte, -2 . Das liegt daran, dass jeweils zwei S^{2-} eine kovalente Verbindung eingehen. Im Kristallgitter wechselt sich also Fe^{2+} mit hantelförmigen $(\text{S-S})^{2-}$ ab.



Abb. 1.18 Pyrit (FeS_2). © F. Neukirchen.

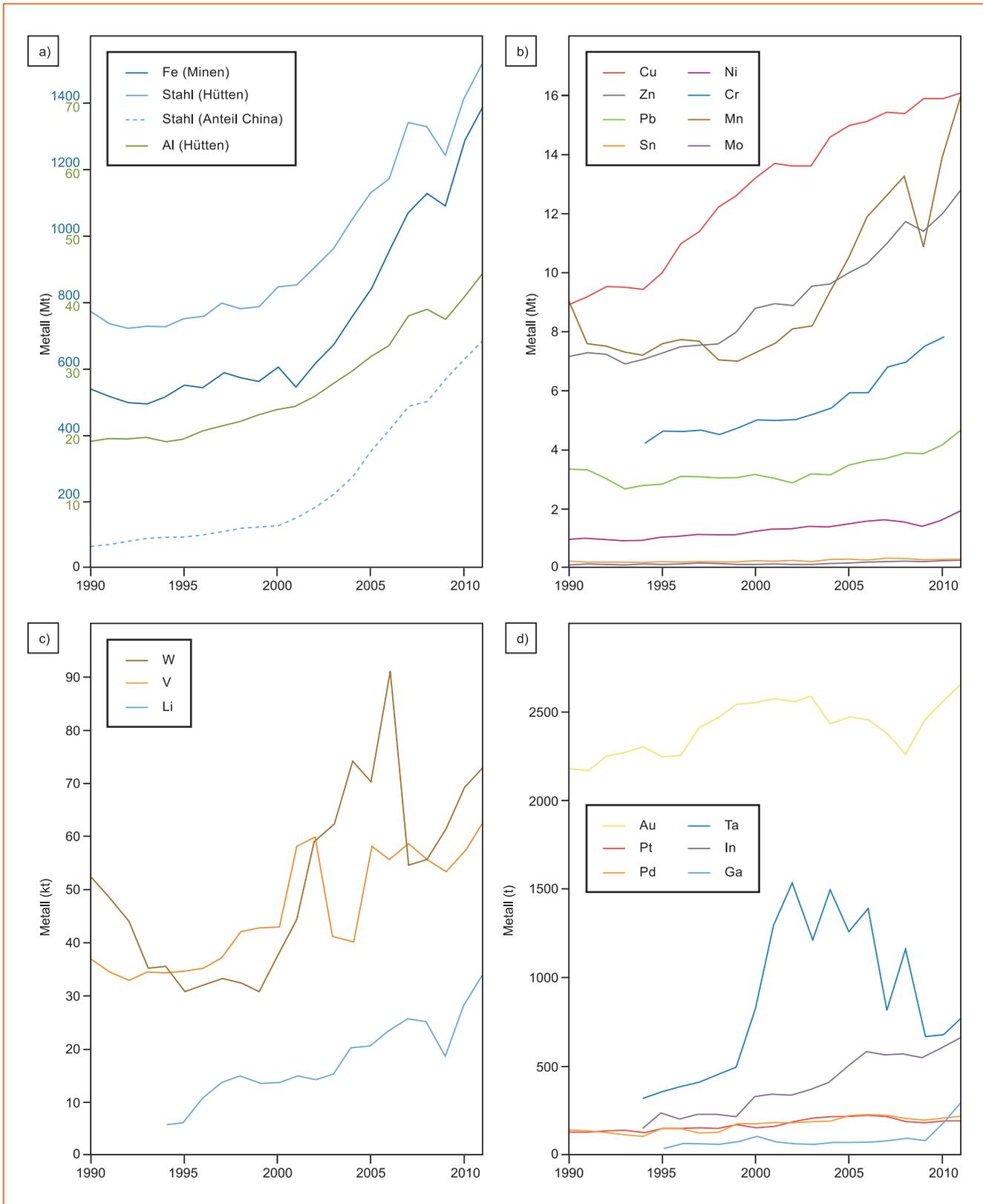


Abb. 1.19 Entwicklung der weltweiten Metallproduktion in den letzten zwei Jahrzehnten (man beachte unterschiedliche Maßstäbe).

a) Eisen im gefördertem Erz, weltweite Stahlproduktion, Stahlproduktion in China und primäres Aluminium aus der Verhüttung. Bei beiden Metallen ist Recycling von Bedeutung. b) und c) Metallgehalt im weltweit gefördertem Erz für Kupfer, Zink, Blei, Zinn, Nickel, Chrom, Mangan, Molybdän, Wolfram, Vanadium und Lithium. Nur ein Teil davon wird zu reinem Metall verhüttet, Teile gehen als Erz in die Stahlerzeugung oder direkt an die chemische Industrie. d) Produktion ausgewählter Edel- und »Hightech-Metalle«. Gold, Platin, Palladium und Tantal: Minenproduktion. Indium und Gallium: Nebenprodukte (Raffination). Daten: USGS Minerals Yearbooks.

Wachstums beispielsweise, die 1972 vom Club of Rome vorgestellt wurde, ging davon aus, dass viele Rohstoffe bei dem angenommenen exponentiellen Wachstum nach wenigen Jahrzehnten erschöpft seien, was bekanntlich nicht eingetreten ist. Relativ wahrscheinlich ist allerdings, dass bestimmte Rohstoffe in Zukunft deutlich teurer werden, wenn leicht zu erreichende Vorkommen erschöpft sind und daher der Aufwand der Produktion erheblich größer wird. Zum Teil kann dies durch Verbesserungen in der Technologie von Abbau, Aufbereitung und Verhüttung ausgeglichen werden.

Generell ist davon auszugehen, dass ein Rohstoff nicht nach konstanter oder steigender Produktion plötzlich komplett erschöpft ist, sondern dass ab einem bestimmten Zeitpunkt die Jahresproduktion nicht mehr gesteigert werden kann und danach langsam zu sinken beginnt. Erdöl ist ein Rohstoff, der schon heute als knapp anzusehen ist und das Erreichen des »Peak Oil« (► Abschn. 6.6) ist bereits absehbar – wobei manche glauben, er sei bereits überschritten, während andere uns noch einige Jahrzehnte geben. Selbst die eher optimistische BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) ging in ihrer Energiestudie 2009 davon aus, dass nach 2035 keine Steigerung der Ölproduktion (unkonventionelles Öl eingeschlossen) mehr möglich sein wird. In der Folgestudie von 2012 ist diese Aussage nicht mehr zu finden – aufgrund neuer Ölfunde, und weil bereits deutlich mehr unkonventionelles Öl gefördert wurde, als man angenommen hatte. Trotzdem ist davon auszugehen, dass nahezu alle günstig zu fördernden Ölvorkommen schon seit Langem bekannt sind und Neufunde nur mit hohen Kosten gewonnen werden können. Das billige Öl wird uns wirklich bald ausgehen. Andere fossile Energieträger wie Gas und Kohle stehen in deutlich größerer Menge zur Verfügung. Phosphat ist ein weiterer knapper Rohstoff, bei dem bald der Peak erreicht sein könnte (► Abschn. 5.8).

Problematisch sind auch Elemente, die keine eigenen Lagerstätten bilden und nur als Nebenprodukte beim Bergbau auf andere Metalle gewonnen werden. Dazu zählen wichtige Hightech-Metalle wie Germanium, Indium und Gallium. Germanium und Indium werden fast nur aus Zinkerz gewonnen, Gallium fast ausschließlich aus Aluminiumerz. Ihre Produktion hängt daher von der Förderrate des jeweiligen Hauptmetalls ab, ansonsten können höhere Kapazitäten lediglich durch eine Verbesserung der Aufbereitung und Raffination erreicht werden. Sie zählen zu den Rohstoffen, die derzeit als kritisch gelten (► Kasten 1.4).

Wenn für die Produktion von Metallen immer geringere Erzgrade ausgebeutet werden, bedeutet das, dass zur Erzeugung der-

selben Metallmenge größere Tagebaue notwendig sind und zugleich größere Mengen an Material auf Halden und in Schlammteichen gelagert werden müssen. Die Auswirkungen auf die Umwelt werden somit zunehmen.

1.4 Rohstoffmarkt

An Börsen wie dem New York Mercantile Exchange (NYMEX), dem London Metal Exchange (LME) und dem Londoner ICE Futures wird eine Auswahl an Rohstoffen gehandelt: Erdöl, die wichtigsten Industriemetalle wie Aluminium, Kupfer, Nickel, Zink und Zinn sowie Edelmetalle wie Gold, Silber, Platin und Palladium. Neben dem Spot-Markt hat das Termingeschäft mit Futures eine große Bedeutung, das zur Absicherung vor unerwünschten Preisentwicklungen dienen soll.

Rohöl kann von unterschiedlicher Qualität und Zusammensetzung sein, daher sind an den Börsen verschiedene Ölsorten im Handel. Am wichtigsten sind die Sorten Brent (aus der Nordsee) und WTI (West Texas Intermediate), an deren Preis sich auch der Preis anderer Rohölsorten orientiert. Während der Ölpreis weltweit nahezu gleich ist (von Transportkosten und Subventionen abgesehen), gibt es bei Erdgas regionale Märkte mit großen Unterschieden. In manchen Ländern ist der Gaspreis an den Ölpreis gekoppelt (Ölpreisbindung).

Die wichtigsten Handelsplätze für Edelmetalle sind nicht die Börsen, sondern der London Bullion Market und der London Platinum and Palladium Market, wo diese als Barren »über den Ladentisch« zwischen Produzenten, Banken, Händlern und Verbrauchern aus aller Welt gehandelt werden. Dabei wird ein- oder zweimal täglich ein Fixpreis vereinbart, zu dem möglichst viele Transaktionen abgewickelt werden.

Ein großer Teil des Rohstoffhandels findet abseits der Börsen durch direkte Verträge zwischen Hersteller und Verbraucher sowie über Zwischenhändler statt, wobei sich der Preis an den Börsen orientiert. Die fünf größten Rohstoffhändler, alle mit Sitz in der Schweiz, haben zusammen einen Umsatz, der ähnlich hoch ist wie das Sozialprodukt der Schweiz. Insbesondere der größte, Glencore, steht immer wieder wegen Menschenrechtsverletzungen und Korruption in Kritik.

Die übrigen Metalle werden nicht frei gehandelt, sie kommen nur über langfristige Lieferverträge direkt vom Hersteller oder über Zwischenhändler in Umlauf. Einige davon werden nicht in

Kasten 1.4 Kritische Rohstoffe

Einer Reihe von Rohstoffen kommt wirtschaftsstrategisch eine wichtige Rolle zu, weil sie für Hightech-Anwendungen unabdingbar sind, auch wenn die verbrauchte Menge im Vergleich zu den Massenmetallen sehr gering ist. Bei manchen kommt hinzu, dass sie nur in wenigen Ländern produziert werden, was im Fall von politisch instabilen Regionen zu unvorhersehbaren Ausfällen und Versorgungsengpässen führen kann. Welche Rohstoffe als kritisch gelten, hängt also nicht nur von den vor-

handenen Ressourcen, sondern auch von politischen Entwicklungen und technologischen Neuerungen ab. Auf einer 2010 von der Europäischen Union veröffentlichten Liste werden 14 kritische Rohstoffe aufgezählt: Antimon, Beryllium, Fluorit, Gallium, Germanium, Grafit, Indium, Kobalt, Magnesium, Niob, die Platingruppenelemente, die Seltenerdelemente, Tantal und Wolfram.

speziellen Minen abgebaut, sondern fallen als Nebenprodukte beim Abbau eines bestimmten Metalls an. Damit ist die Angebotsseite an die Produktionsbedingungen eines anderen Rohstoffs gekoppelt, auf Änderungen in der Nachfrage kann höchstens durch eine Optimierung in der jeweiligen Aufbereitung und Verhüttung reagiert werden, mit entsprechenden Auswirkungen auf den Preis. Andere Metalle wie Tantal und die Seltenerdmetalle werden in so geringen Mengen produziert und verbraucht, dass wenige Minen einen guten Teil der Weltproduktion ausmachen. Es kommt daher leicht zu Engpässen oder Überkapazitäten, was sich in Form stark schwankender Preise bemerkbar macht.

Der USGS (United States Geological Survey) kommt in seiner Analyse (Papp et al. 2008) zu dem Schluss, dass die Rohstoffpreise durch eine Vielzahl von Faktoren gesteuert werden: durch Kriege und Rezessionen, durch den Zusammenbruch der Sowjetunion und den wirtschaftlichen Aufstieg Chinas, durch Steuerpolitik, Wechselkurse, technologische Entwicklungen und Streiks, Minenschließungen und neu eröffnete Anlagen. Betrachtet man die langfristigen Trends verschiedener Rohstoffpreise, dann fällt zunächst auf, dass sie enormen Schwankungen unterliegen. Hin und wieder kam es zu Spitzen mit einem schnellen Anstieg, gefolgt von einem raschen Absturz, wobei der Spitzenpreis nicht selten ein Vielfaches des Ausgangspreises betrug. In der Mitte des 20. Jahrhunderts waren die Fluktuationen deutlich geringer als zu Beginn und Ende des Jahrhunderts. Weiterhin fällt auf, dass die Preise der meisten Rohstoffe langfristig gestiegen sind. Am extremsten war der Anstieg in den Jahren vor 2008 – er beförderte fast alle Metalle auf ihr historisches Preismaximum, bevor die Rezession in Folge der Finanzkrise zu einem starken Rückgang führte. Seither haben sich die meisten Preise wieder auf einem relativ hohen Niveau eingependelt.

Etwas anders sehen die Zahlen aus, wenn man die Inflation aus den Preisen herausrechnet. Die Kurven pendeln dann noch immer stark, aber meist auf einem nahezu gleichbleibenden Niveau. Aluminium war inflationsbereinigt zu Beginn des 20. Jahrhunderts sogar um ein Vielfaches teurer als heute, bei anderen Metallen blieb der extreme Anstieg vor 2008 innerhalb der historischen Schwankungen. Bei der Interpretation dieser Zahlen muss man natürlich vorsichtig sein, weil steigende Rohstoffpreise direkt an den Verbraucher weitergegeben werden und sich somit als Inflation auswirken, die dann wieder herausgerechnet wird. Es ist also kaum möglich, aus den Preisen (ob nominal oder inflationsbereinigt) abzulesen, ob ein Rohstoff knapper wird und wie sich der größere Aufwand der Förderung in den Produktionskosten niederschlägt beziehungsweise wie sich die Höhe der notwendigen Investitionen im Rohstoffsektor im Vergleich zur Gesamtwirtschaft entwickelt.

Gold ist übrigens dabei als ganz normaler Rohstoff anzusehen, allerdings mit dem Unterschied, dass Spekulationen sich stärker auf die Preisschwankungen auswirken, was vor allem an dem Mythos liegt, es handle sich um eine sichere Anlage.

Während stark schwankende Preise bei allen Rohstoffen Möglichkeit zur Spekulation bieten, ist sowohl die Minenindustrie als auch die Metall verarbeitende Industrie an einer möglichst planbaren Preisentwicklung interessiert. Selbst wenn ein

Monopolist im Spiel ist, strebt dieser in der Regel an, dass sich Angebot und Nachfrage nach Möglichkeit decken. Lagerbestände können Abweichungen von Produktion und Verbrauch zumindest zeitweise ausgleichen. Führt wachsende Nachfrage zu einem steigenden Preis, können immer mehr Vorkommen ausgebeutet werden, die sich zuvor nicht gelohnt haben – wobei es wie gesagt einige Zeit dauert, bis neue Anlagen in Produktion gehen, was zu Engpässen führen kann.

Gerade Monopolisten können ihre Stellung nicht unbedingt zu ihren Gunsten ausnutzen. Sie haben eine enorme Produktionskapazität, was die Kosten der Produktion senkt, aber möglicherweise für ein Überangebot auf dem Markt sorgt und damit den Preis drückt. Das bootet zwar die Konkurrenz aus, sorgt aber auch nicht für hohe Gewinne. Im Fall von Tantal war die Mine Wodgina (Australien), die zuvor 50 % der Weltproduktion lieferte, 2009 nicht mehr rentabel, weil der Preis des Metalls während der wirtschaftlichen Rezession mangels Nachfrage abgestürzt war. Das Wegfallen ihrer enormen Kapazität führte natürlich wieder zu einem steigenden Preis. Zum chinesischen Monopol auf Seltenerdelemente siehe ► Kasten 1.5.

Ein wichtiger Punkt ist, dass die Produktionskosten bei den verschiedenen ausgebeuteten Vorkommen sehr unterschiedlich sind. Bei manchen winken hohe Profite, bei vielen anderen können gerade noch die laufenden Kosten erwirtschaftet werden. Das liegt zum einen natürlich an den geologischen Verhältnissen wie Erzgrad, Größe der Lagerstätte und Tiefe des Abbaus, aber auch an Transportkosten, Löhnen, Umweltauflagen, Wechselkursen und so weiter. In diesem Sinn hängt der Preis nicht nur mit Angebot und Nachfrage zusammen, sondern auch mit den durchschnittlichen Produktionskosten aller aktiven Minen, die zusammen eine weltweite Kapazität ermöglichen, mit der sich die Nachfrage decken lässt.

1.5 Wo suchen und wie?

Hin und wieder finden Geologen zufällig eine neue Lagerstätte, während sie eigentlich etwas anderes suchen. Das spektakulärste Beispiel ist die 1975 in Australien entdeckte riesige Kupfer-Uran-Lagerstätte Olympic Dam (► Kasten 4.20) in einer bis dahin nicht als Bergbaurevier bekannten Gegend. Das sind jedoch Ausnahmen und im Allgemeinen wird die Prospektion mit großem Aufwand betrieben, um erschöpfte Minen zu ersetzen und den steigenden Bedarf zu decken. Doch wo sollte man am besten suchen, in einer Gegend, in der bereits viele Lagerstätten bekannt sind, oder lieber dort, wo noch niemand gesucht hat?

Prospektion: Suche nach unbekanntem Lagerstätten.
Exploration: Prospektion und genauere Untersuchung potenzieller Lagerstätten.

Die zweite Möglichkeit, die »grassroots exploration«, hat eine sehr geringe Erfolgsquote, wie beim Lotto gibt es hin und wieder einen Volltreffer. Hier müssen wir uns Geologen und Glücksritter vorstellen, die systematisch ein großes Gebiet durch-

Kasten 1.5 Seltene Erden – der Weg zu Chinas Monopol

Mit rund 95 % der Weltförderung hat China quasi ein Monopol bei den Seltenen Erden erreicht (Braune 2008, Margonelli 2009). Abgebaut wird dort nicht nur die riesige Seltenerd-Lagerstätte Bayan Obo (► Kasten 3.16) sondern auch andere SEE-Karbonatite (► Abschn. 3.10) und Ionenabsorptionstone (► Abschn. 5.11.4). Das Monopol ist durchaus als problematisch anzusehen, denn diese Elemente sind für diverse Produkte aus der Unterhaltungs- und Telekommunikationstechnologie ebenso essenziell wie für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen und die sogenannte »Energiewende« (► Abschn. 2.5). Nun sind ja die Seltenen Erden nicht so selten, wie es ihr Name suggerieren mag. Wie kommt es also, dass die Welt hinsichtlich dieser Rohstoffgruppe von einem chinesischen Monopol abhängig wurde? Auch wenn die Minerale der Seltenen Erden nicht so selten sind, gibt es doch ein kleines Problem mit ihnen. Was nämlich durchaus selten ist, sind wirtschaftlich abbaubare Vorkommen. Die Minerale der Seltenen Erden enthalten sehr häufig Uran und Thorium und diese radioaktiven Inhaltsstoffe verursachen Probleme. Sie müssen abgetrennt und anschließend in Abraumhalden und Tailings gelagert werden. Und da kann es zu großen Problemen kommen, wie das Beispiel Bukit Merah in Malaysia zeigt. Hier hat vor 20 Jahren eine Raffinerie für Seltene Erden die Böden und das Wasser kontaminiert. Die Folgen sind eine deutlich erhöhte Krebsrate in der betroffenen Region und bis heute dauernde Aufräumarbeiten (Consumer Association of Penang 2013, Bradsher 2011). Die Erze der großen amerikanischen Mine Mountain Pass (► Abschn. 3.10) sind mäßig radioaktiv. Hierdurch wurde das Vorkommen auch 1949 entdeckt, als zwei Geologen mit einem geliehenen Geigerzähler nach Uranerz suchten (Anonymus 2013). Bis 1989 war diese Mine der Hauptproduzent für Seltene Erden (Margonelli 2009). Allerdings hatte schon Deng Xiaoping 1992 die Wichtigkeit dieser Elemente erkannt und die Position Chinas bei den Seltenen Erden mit der des Nahen Ostens in Sachen Erdöl verglichen (Anonymus o. D.). In den

1990er-Jahren begann China die Welt mit billigen SEE-Metallen zu versorgen, wodurch die Preise zum Teil deutlich von 11 700 \$ pro Tonne 1992 auf 7430 pro Tonne 1996 fielen. Dies führte dazu, dass die USA und auch andere Länder zunehmend auf die Importe aus China setzten und ihre eigenen Reserven vernachlässigten. Für Minen wie Mountain Pass, die zu den Preisen der chinesischen Anbieter nicht produzieren konnten, war dieser Preiskampf ohne politische Unterstützung ruinös. Hinzu kamen die steigenden Kosten für Umweltauflagen, die in den USA deutlich strenger waren als in China. Nach einer Serie von Unfällen im Jahr 1998, bei der größere Mengen radioaktiven Abwassers in den Ivanpah Dry Lake gelangten, wurde die Mine 2002 geschlossen. Ab 2005 stiegen die Preise für Seltene Erden an, als China dazu überging, die Exporte zu beschränken. Im Folgejahr und verstärkt ab 2010 wurden die chinesischen Exporte erneut limitiert (Jacoby & Jiang 2010). Andere Nationen sahen sich hierdurch von der Zufuhr wichtiger Rohstoffe abgeschnitten und klagten bei der Welthandelsorganisation dagegen. Um die Abhängigkeiten und die daraus entstehenden wirtschaftlichen Zwänge zu reduzieren, setzte eine hektische Betriebsamkeit in Sachen Seltene Erden ein. Die Mountain Pass Mine wurde 2008 von einem neu gegründeten Konsortium unter dem alten Namen Molycorp aufgekauft und begann 2013 erneut mit der Produktion. Auch in anderen Ländern, besonders in denen mit einer entsprechenden Industrie, wurden verschiedene SEE-Projekte ins Leben gerufen. Als Beispiele genannt seien hier nur Deutschland (DRAG 2013, Nestler 2013) mit dem Vorkommen in Storkwitz (► Kasten 1.8), Australien, wo das bereits seit 1988 bekannte Vorkommen am Mount Weld (► Abschn. 5.11.4) zu den vermutlich reichsten SEE-Vorkommen der Welt gezählt wird (Utter 2010) und wo der Abbau bereits beginnt, und Japan, das in seinen Hoheitsgewässern nach den begehrten Rohstoffen fahndet (Germis & Nestler 2013).

streifen. Manche suchen etwas Bestimmtes, etwa Goldkörner in einem Fluss, andere haben die Augen für alles Auffällige offen, das auf Rohstoffe aller Art hinweisen könnte. Größere Unternehmen treten dabei in der Regel erst dann auf den Plan, wenn bereits Erze gefunden wurden und es um die Beurteilung der vorhandenen Erzmenge und der Wirtschaftlichkeit geht. Ob es sich dann tatsächlich lohnt, das Vorkommen abzubauen, ist dann noch immer nicht gesagt.

Die erste Möglichkeit ist also vielversprechender. Da die jeweiligen erzbildenden Prozesse meist in einer größeren Region gewirkt haben, sind in der Nähe einer Lagerstätte oft weitere zu finden. Daher wird in bekannten Bergbaurevieren intensiv gesucht, wobei mit geophysikalischen Methoden auch Vorkommen entdeckt werden können, die nicht an der Oberfläche sichtbar sind. Praktischerweise ist in den Regionen oft schon eine entsprechende Infrastruktur vorhanden, was sowohl die Exploration als auch den späteren Abbau günstiger macht.

Ebenfalls sehr vielversprechend ist die weltweite Suche nach Gebieten, die eine ähnliche Geologie aufweisen wie die entsprechenden bekannten Bergbaurevire. Es ist gut möglich, dass dort Lagerstätten vom selben Typ gefunden werden können.

Während man früher einfach an der Erdoberfläche nach »Erzausbissen« oder Alterationszonen suchen konnte, sind solche leicht aufzuspürenden Lagerstätten kaum noch vorhanden. Daher müssen wir Methoden anwenden, die Hinweise auf in der Tiefe versteckte Vorkommen geben (»blinde Lagerstätte«).

Eine wichtige Grundlage für die erfolgreiche Prospektion bildet ein umfassendes Wissen über den gesuchten Lagerstättentyp einschließlich eines genetischen Modells. Davon ausgehend wird ein Explorationsmodell entwickelt, das tektonische Strukturen, die passenden Gesteine und entsprechende geophysikalische und geochemische Parameter umfasst. Welche der in den folgenden Abschnitten vorgestellten Methoden dann sinnvollerweise bei der Suche angewandt werden, hängt vom Typ der ge-

Kasten 1.6 Erzmikroskopie

Die Untersuchung von Erzen mit einem Mikroskop wird immer seltener durchgeführt, sie kann jedoch sehr hilfreich sein, um beispielsweise das Gefüge zu interpretieren und die zeitliche Abfolge von Mineralvergesellschaftungen zu bestimmen. Dieses Wissen ist nicht nur wichtig, um die Genese der Lagerstätte zu verstehen, sondern auch, um eine geeignete Metho-

de für die Aufbereitung zu finden. Da fast alle Erze opak sind, kann man natürlich kein Durchlichtmikroskop verwenden, sondern nur ein Auflichtmikroskop. Leider sehen sich die meisten Erzminerale dabei sehr ähnlich und man muss auf minimale Farbunterschiede in leichten Pastelltönen achten.

Kasten 1.7 Bergrecht

Wem gehört eine Lagerstätte? Diesbezüglich gibt es in verschiedenen Ländern unterschiedliche Traditionen und Gesetzgebungen. Das deutsche Bergrecht geht auf die Tradition der Bergfreiheit zurück, nach der alle unterirdischen Rohstoffe herrenlos sind, also weder dem Staat noch dem Grundeigentümer gehören. Der Staat regelt jedoch, wer diese Schätze heben darf, und kassiert entsprechende Steuern oder in früheren Zeiten den Bergzehnt.

Nach einer im Mittelalter verbreiteten Form des Bergrechts, dem Bergregal, waren alle Rohstoffe Eigentum des Kaisers, Königs oder Landesherren. Dieser konnte die Abbaurechte verleihen und erhielt dafür den Bergzehnt. Auch heute gibt

es Länder, deren Rohstoffe in Staatsbesitz sind, was insbesondere bei Erdöl verbreitet ist.

In den Ländern des Commonwealth und in den USA sind alle unter einem Grundstück liegenden Rohstoffe Eigentum des Grundstückseigentümers, wobei im Commonwealth Gold und Silber ausgenommen sind und als Staatsbesitz gelten. In den USA hat der Staat einen Vorbehalt auf strategisch wichtige Rohstoffe. Bei Lagerstätten auf öffentlichem Land kann für ein Claim eine jährliche Pacht entrichtet werden.

In Frankreich und einigen weiteren Ländern gehören die oberflächennahen Rohstoffe dem Grundstückseigentümer, die tieferen dem Staat.

suchten Lagerstätte ab, aber auch von den lokalen Gegebenheiten.

Bei der Erkundung fallen riesige Datenmengen an. Daraus die wichtigsten Informationen zu suchen, ist so aufwendig, dass viele Geowissenschaftler vor allem mit »Data-Mining« beschäftigt sind, mit dem Versuch, durch statistische Methoden und ausgefeilte Algorithmen möglichst viele Informationen aus den Daten zu gewinnen. Für eine räumliche Zuordnung und Interpretation der Daten werden Geoinformationssysteme (GIS) verwendet, außerdem kommt in vielen Bereichen entsprechende Spezialsoftware zum Einsatz.

In großen Gebieten können zunächst durch Fernerkundung (engl. *remote sensing*) passende Orte (*prospects*) gesucht werden, an denen die entsprechenden Parameter zutreffen und an denen sich eine genauere Untersuchung lohnt. Mit geophysikalischen Methoden, einer genaueren Kartierung, anhand von Gesteinsproben (► Kasten 1.6) und ersten Bohrungen wird dann untersucht, ob es sich potenziell um ein wirtschaftlich interessantes Vorkommen handelt (*pre-feasibility study*). Ist das der Fall, folgen detailliertere Untersuchungen (*evaluation*) mit dem Ziel, die räumliche Größe und den Erzgehalt als Planungsgrundlage für den Abbau möglichst genau zu bestimmen. Auch die gebirgsmechanischen Eigenschaften des Gesteins müssen bekannt sein. Wichtig ist auch die Entscheidung, ob nur besonders reichhaltige und entsprechend lukrative Zonen abgebaut werden sollen oder auch Zonen mit geringem Erzgrad, deren Ausbeutung eigentlich nicht profitabel ist. Oft muss außerdem in Experimenten ermittelt werden, wie man das Erz am besten aufbereiten kann. All diese Ergebnisse fließen in die Wirtschaftlichkeitsstudie (*feas-*

bility study) ein – zusammen mit anderen Faktoren wie dem Marktpreis des betreffenden Rohstoffs, dem Ausbau der Infrastruktur und den Umweltauflagen. Abgebaut wird natürlich nur, wenn die Studie zu dem Ergebnis kommt, dass dies profitabel ist. Von der Entdeckung einer Lagerstätte bis zum Beginn der Produktion vergeht typischerweise mehr als ein Jahrzehnt. Zur Frage, wem die Lagerstätte gehört, siehe ► Kasten 1.7.

1.6 Fernerkundung

Mit Satelliten und Flugzeugen werden Bilder und geophysikalische Daten gesammelt, mit denen riesige Gebiete auf potenzielle Lagerstätten abgesucht werden können. Das funktioniert am besten in ariden und semiariden Gebieten, während in Gebieten mit dichter Vegetation die Möglichkeiten eingeschränkt sind. Mit entsprechenden Geräten ausgestattete Flugzeuge oder Hubschrauber ermöglichen eine detaillierte Untersuchung, die speziell auf die jeweiligen Erfordernisse abgestimmt, aber auch mit entsprechenden Kosten verbunden ist. Entsprechend haben Satelliten den Vorteil, dass bereits auf eine große Menge vorhandener Daten zurückgegriffen werden kann.

Bereits durch eine einfache Interpretation von Luft- und Satellitenbildern können tektonische Strukturen kartiert werden. Da Verwerfungen und vor allem deren Kreuzungen als Aufstiegsweg für Magmen oder hydrothermale Lösungen dienen können, sind Lagerstätten meist entlang von tektonischen Strukturen aufgereiht.

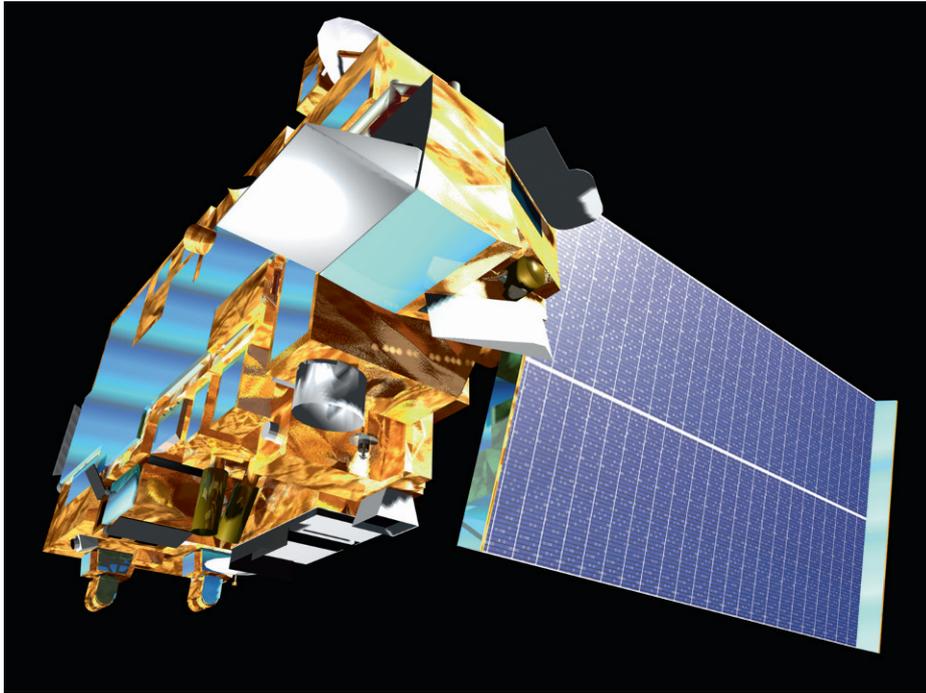


Abb. 1.20 Der Ende 1999 von der NASA gestartete Satellit Terra trägt das japanische Instrument ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), dessen Daten häufig für die Exploration verwendet werden. © NASA.

Deutlich mehr bietet die multispektrale Fernerkundung (Van der Meer et al. 2012, Brandmeier 2010, Rowan & Mars 2003, Yamaguchi & Naito 2003, Sabins 1999). Dabei geht es um die von der Erdoberfläche abgegebene Strahlung, eine Mischung aus reflektiertem Licht und solchem, das ein wenig in die Materie eingedrungen ist und Teile seines Spektrums durch Absorption verloren hat. Entsprechende Daten haben zunächst die Landsat-Satelliten (vor allem mit dem Landsat Thematic Mapper) geliefert, seit dem Start des Satelliten Terra Ende 1999 wird vor allem auf die Daten des in Japan gebauten Instruments ASTER zurückgegriffen (Abb. 1.20). Im Prinzip geht es um etwas Ähnliches wie bei einem Foto: Bei einem digitalen Foto besteht jedes Pixel aus drei Kanälen, Rot, Grün und Blau (RGB), deren Helligkeitswerte die Farbe festlegen. Die drei Kanäle entsprechen drei Wellenlängen, die zwar nur kleine Ausschnitte aus dem Lichtspektrum darstellen, aber ausreichend sind, um von unserem Auge als Farbe wahrgenommen zu werden. Bei der multispektralen Erkundung wird stattdessen die elektromagnetische Strahlung in einer ganzen Reihe von Kanälen mit bestimmter Wellenlänge registriert, und zwar nicht nur im Bereich von sichtbarem Licht, sondern auch für Infrarot. ASTER hat drei Kanäle im Bereich von sichtbarem Licht und nahem Infrarot (»VNIR«), sechs Kanäle im kurzwelligen Infrarot (»SWIR«) und fünf Kanäle im langwelligen Infrarot (»TIR«), wobei die Wellenlängen der Kanäle für unsere Zwecke günstig gewählt sind. Es gibt auch Geräte, die stattdessen den interessanten Bereich des Spektrums mit einer großen Zahl von Kanälen mehr oder weniger kontinuierlich abdecken (»hyperspektral«). Bisher werden diese vor allem von Flugzeugen aus eingesetzt, weil bei Satelliten die große Datenmenge und das Rauschen noch zum Problem werden, sie dürften aber in Zukunft wichtiger werden.

Das Licht wird von verschiedenen Mineralen unterschiedlich absorbiert. Dabei wirken sich insbesondere Übergangsmetalle wie Eisen und Hydroxylgruppen (OH^-) aus. Daher können wir auf Falschfarbenbildern (Abb. 1.21), die aus geeigneten Kanälen zusammengesetzt wurden, einen Eindruck bekommen, welche Minerale beziehungsweise Gesteine an der Erdoberfläche liegen. Die einfachste Möglichkeit wäre, den RGB-Kanälen eines Monitors je einen Kanal des Sensors zuzuordnen, bessere Ergebnisse bekommt man jedoch, wenn geeignete Kanäle vorher dividiert werden (*ratio images*). In Kombination mit einer entsprechenden Feldarbeit vor Ort lassen sich damit schnell detaillierte geologische Karten erstellen.

Mit mathematischen Verfahren wie der Hauptkomponentenanalyse (engl. PCA) oder der Berechnung sogenannter Mineral-Indizes (MI) können aus den Daten sogar Karten erstellt werden, die Gebiete mit einem hohen Gehalt bestimmter Minerale hervorheben. Mit den ASTER-Daten können zum Beispiel Pixel für Pixel, allerdings mit einer gewissen Unsicherheit, Tonminerale (z. B. Kaolinit und Illit), Glimmer, Chlorit, verschiedene Eisenoxide, Karbonate (z. B. Kalzit, Dolomit) und Sulfate (z. B. Alunit, Baryt) unterschieden werden. Im Einzelfall sollte man das Ergebnis aber vor Ort überprüfen.

Mit noch komplexeren Algorithmen und einer entsprechenden Kalibrierung kann das gemessene Spektrum für jedes Pixel mit einer ganzen Datenbank von Spektren unterschiedlicher Minerale verglichen werden, was zum Teil sogar eine quantitative Abschätzung des Mineralgehalts ermöglicht. Das funktioniert umso besser, je mehr Kanäle gemessen worden sind.

In Gebieten mit dichter Vegetation ist diese Methode leider stark eingeschränkt. Es ist aber möglich, die Schädigung der

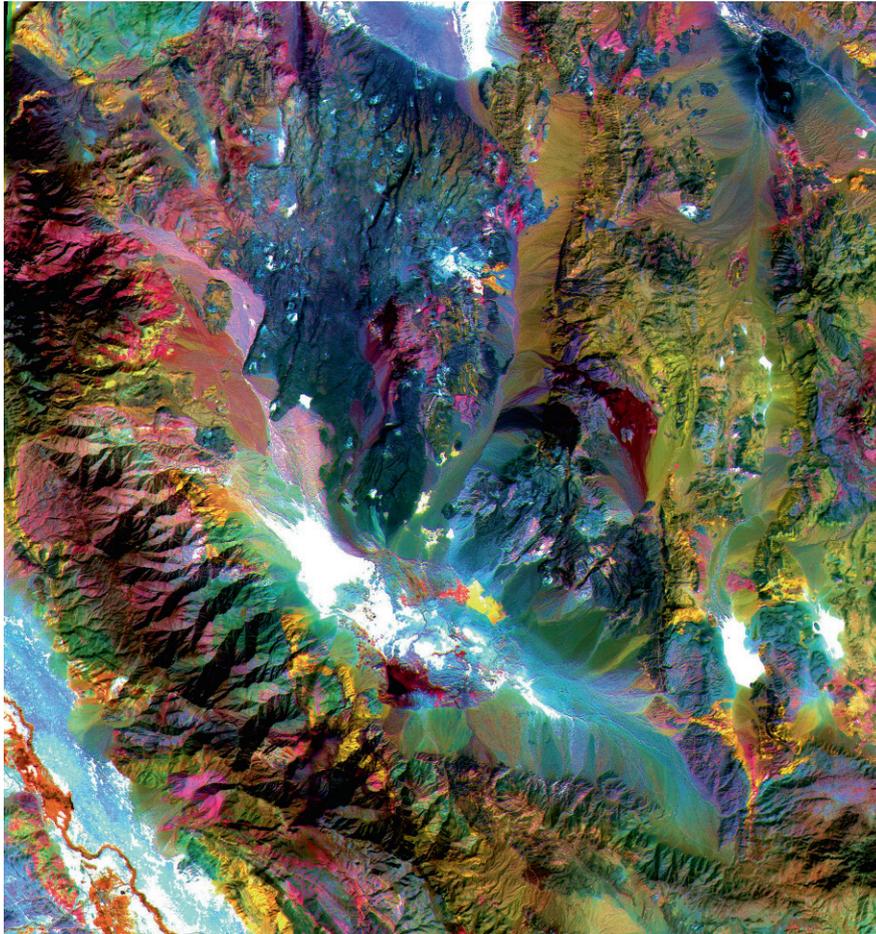


Abb. 1.21 Falschfarbenaufnahme vom Rand des Saline Valleys (Kalifornien) durch ASTER. Die Kanäle 4, 6, 8 aus dem kurzwelligen Infrarot sind als RGB gezeigt. Die Farben sind abhängig von Gehalten an Tonmineralen, Karbonaten und Sulfaten. © NASA, GSFC, MITI, ERSDAC, JAROS und das US/Japanische ASTER-Team.

Vegetation durch Schwermetalle zu kartieren, was wiederum Hinweise auf Lagerstätten geben kann.

Besonders hilfreich ist die multispektrale Fernerkundung bei der Kartierung von hydrothermalen Alterationszonen (► Kasten 4.14) in trockenen Gebieten, weil die verschiedenen Typen von Alteration unterschieden werden können. Zwar befindet sich nicht unter jeder Alterationszone auch eine Lagerstätte, aber anhand einer guten Kartierung lässt sich entscheiden, wo man genauer nachsehen sollte. Ein häufig zitiertes Beispiel ist die Kupferlagerstätte Collahuasi in Chile. Schon seit Längerem hatte man dort Kupfer aus hydrothermalen Gängen abgebaut. Bei einer Analyse der Alterationszone, damals noch mit Landsat-Daten, stellte man fest, dass es auf einem großen Gebiet systematisch angeordnete Anomalien gibt. Geophysikalische Methoden haben dann bestätigt, dass in größerer Tiefe eine riesige Kupferporphyr-Lagerstätte (► Abschn. 4.4) versteckt war, die heute zu den wichtigsten Kupferminen der Welt zählt.

Es gibt auch einige Beispiele für sehr spezielle Anwendungen. Etwa können natürliche Gas- und Ölaustritte gefunden und interpretiert werden. Für den Salar de Uyuni (► Abschn. 5.7.2) konnten die Boratgehalte kartiert werden.

Neben diesen passiven Systemen, bei denen natürliche elektromagnetische Wellen genutzt werden, gibt es auch aktive Sys-

teme, die im folgenden Abschnitt besprochen werden. Einige geophysikalische Methoden können von einem Flugzeug oder Helikopter aus durchgeführt werden und sind damit Teil der Fernerkundung.

1.7 Geophysikalische Exploration

Bei der Suche nach Lagerstätten kann man sich auch eine Reihe physikalischer Parameter zunutze machen, beispielsweise das Magnetfeld, das Schwerefeld, die elektrische Leitfähigkeit und Gammastrahlung. Allerdings hängt es vom Typ der Lagerstätte und von diversen lokalen Gegebenheiten ab, welche Methoden zum Erfolg führen können. Geophysikalische Methoden geben nicht nur Informationen über die Gesteine an der Oberfläche, sondern reichen bis in eine gewisse Tiefe. Gesucht werden vor allem Anomalien, starke Abweichungen von »normalen« Werten, wobei je nach vorhandenen Gesteinen die »normalen« Werte sehr unterschiedlich sein können. Üblicherweise werden mehrere Parameter gleichzeitig gemessen und gemeinsam ausgewertet. Einige können von einem Flugzeug beziehungsweise Helikopter aus gemessen werden (*airborne geophysics*) und sind damit Teil