



Martin Okrusch
Siegfried Matthes

Mineralogie

Eine Einführung
in die spezielle Mineralogie,
Petrologie und Lagerstättenkunde

9. Auflage

LEHRBUCH

Martin Okrusch
Siegfried Matthes

Mineralogie

Eine Einführung
in die spezielle Mineralogie,
Petrologie und Lagerstättenkunde

9. Auflage

Mineralogie



Martin Okrusch
Siegfried Matthes

Mineralogie

Eine Einführung in die spezielle Mineralogie,
Petrologie und Lagerstättenkunde

9. Auflage

 Springer Spektrum

Professor Dr. Martin Okrusch
Lehrstuhl für Geodynamik
und Geomaterialforschung
Institut für Geographie
und Geologie
Universität Würzburg
Am Hubland
97074 Würzburg

Professor Dr. Siegfried Matthes †

ISBN 978-3-642-34659-0

ISBN 978-3-642-34660-6 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-34660-6

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 1983, 1987, 1990, 1993, 1996, 2001, 2005, 2009, 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, Martina Mechler

Einbandentwurf: deblik, Berlin

Einbandabbildung: Dr. Olaf Medenbach, Bochum

Satz: Armin Stasch, Bayreuth

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

Für Irene



Vorwort zur 9. Auflage

Vor genau 30 Jahren, im Sommer 1983, übergab Siegfried Matthes sein Mineralogie-Lehrbuch erstmals der Öffentlichkeit. Dank einer gelungenen Konzeption erwarb sich das Werk rasch viele Freunde, so dass bis zum Jahr 2001 bereits sechs Auflagen erscheinen konnten. Die letzte von ihnen stammt noch fast ganz aus der Feder von Siegfried Matthes, der jedoch ihr Erscheinen nicht mehr erleben durfte, da er am 2. Mai 1999 im 86. Lebensjahr verstarb. Für mich war es Freude und Verpflichtung zugleich, dieses erfolgreiche Lehrbuch weiter zu betreuen und an den aktuellen Wissensstand anzupassen. Mit den 2005 und 2009 erschienenen Neuauflagen erhielt das Werk ein neues, ansprechenderes Erscheinungsbild; es wurde z. T. neu gegliedert, inhaltlich erweitert und reichhaltiger illustriert. Neu hinzu kamen u. a. eine Einführung in die Geochemie, eine umfassendere Darstellung der Kristallographie auf elementarer Grundlage, sowie Kapitel über unser Planetensystem und seine Entstehung.

Auch für die 9. Auflage habe ich mich wieder um die Aktualisierung des Inhalts bemüht, wobei mir besonders Übersichtsartikel in den Zeitschriften *Elements*, *Chemie der Erde* und *Mineralium Deposita* sowie kritische Hinweise von Fachkollegen eine große Hilfe waren. Das einleitende Kapitel *Einführung und Grundbegriffe* wurde als neuer Teil I in die drei Kapitel *Kristalle*, *Minerale* und *Gesteine* aufgeteilt; die neuen Kapitel 2 und 3 sind textlich erweitert und gewinnen durch neue Abbildungen an Informationsgehalt. Neu hinzu gekommen sind ein Abschnitt zum Thema Edelsteine; dem Würzburger Paläontologen Gerd Geyer verdanke ich eine wesentliche Verbesserung des Textes zur Biomineralisation. Im Kapitel Silikate kam ein neuer Abschnitt über den Cancrinit hinzu und Reiner Klemm (Erlangen) erweiterte das Kapitel über Flüssigkeits-Einschlüsse um einen aktuellen Text zur ortsauflösenden Analytik. Ein besonderes Anliegen war es mir, im petrologisch-lagerstättenkundlichen Teil die weltwirtschaftlich wichtigen Erzlagerstätten, insbesondere die sog. Giant Deposits, noch stärker zu berücksichtigen. Die Textaussagen im Kapitel über Sedimente und Sedimentgesteine wurden durch zusätzliche Abbildungen unterstützt und der Text über die Migmatite im Metamorphose-Kapitel modernisiert. Neu geschrieben wurden weite Passagen in den Kapiteln über den Mond, die Meteorite und unser Planetensystem.

Im Hinblick auf die thematische Breite dieses Lehrbuches war es schon für die 7. und 8. Auflage angesagt, kompetente Kollegen um kritische Durchsicht einzelner Kapitel, z. T. auch um Textbeiträge zu bitten. Für diese wertvolle Hilfe bin ich Eckard Amelingmeier (Würzburg), Hans Ulrich Bambnauer (Münster/Ostbevern), Gerd Geyer (Würzburg), Herbert Kroll (Münster), Joachim Lorenz (Karlstein am Main), Karl Mannheim (Würzburg), Uli Schüssler (Würzburg), Hans Adolf Seck (Köln), Ekkehart Tillmanns (Wien) und Thomas Will (Würzburg) zu großem Dank verpflichtet.

Für konstruktive Kritik, wichtige Hinweise und Anregungen sowie für die Überlassung von Bildmaterial für diese Auflage gilt mein herzlicher Dank Addi Bischoff (Münster), Joachim Bohm (Berlin), Thomas Cramer (Bogota), Jun Gao (Beijing), Reto Gieré (Freiburg im Breisgau), Heribert Graetsch (Bochum), Klaus Heide (Jena), Jorijntje Henderiks (Uppsala), Wolfgang und Gertrude Hermann (Würzburg), Reiner Klemm (Erlangen), Joachim Lorenz (Karlstein am Main), Neil McKernow (Albany, West-Australien), Uwe Ring (Stockholm), Ekkehart Tillmanns (Wien), Manfred Wildner

(Wien), Klaus Wittel (Frankfurt am Main) und Armin Zeh (Frankfurt am Main) sowie meinen Würzburger Kolleginnen und Kollegen Eckard Amelingmeier, Hartwig Frimmel, Gerd Geyer, Dorothee Kleinschrot, Nikola Koglin, Karl Mannheim, Ulrich Schüssler, Volker von Seckendorff und Tobias Sprafke. Die anregenden Diskussionen mit meinem Amtsnachfolger Hartwig Frimmel sind für mich immer wieder Grund zur Freude.

Besonderer Dank gebührt wiederum Klaus-Peter Kelber, der exzellente Farbfotos von Mineralen und Gesteinen für die neue Auflage beisteuerte. Winfried Weber danke ich sehr für seine sorgfältigen Zeichenarbeiten. Wie gewohnt, gestaltete sich die Zusammenarbeit mit dem Springer-Verlag sehr konstruktiv und vertrauensvoll. Hierfür herzlichen Dank an Merlett Behncke-Braunbeck, Martina Mechler, Dr. Chris Bendall und Dr. Wolfgang Witschel. Ich freue mich sehr, dass Armin Stasch (Bayreuth) wieder das Layout des Buches übernehmen konnte. Sein Einfühlungsvermögen und seine Kompetenz sind für mich immer eine Quelle der Beruhigung.

Ich hoffe, dass diese Einführung dazu beiträgt, die komplexen Prozesse, durch die sich Minerale, Gesteine und Erzlagerstätten in der Natur bilden, besser zu verstehen. In den letzten Jahren haben wir gelernt, dass die ersten Minerale schon in einer sehr fernen Vergangenheit im Universum kristallisierten, lange bevor unser Planetensystem entstand. Andererseits wird uns immer mehr bewusst, dass eine ausreichende Versorgung mit mineralischen Rohstoffen, ohne die unsere menschliche Zivilisation nicht existieren kann, keine Selbstverständlichkeit ist, sondern erhebliche Anstrengungen erfordert. Möge die 9. Auflage dieses Lehrbuches wieder neue Freunde unter Studierenden und Hochschullehrern der Geowissenschaften, aber auch unter interessierten Mineraliensammlern finden!

Auch diese Neuauflage des Mineralogie-Lehrbuches widme ich meiner Frau als Dank für ihre unverzichtbare Hilfe beim Korrekturlesen und ihr liebevolles Verständnis für die verstärkte zeitliche Belastung im letzten Jahr. Wie oft musste sie bei der Gartenarbeit auf meine Mitwirkung verzichten!

Martin Okrusch Würzburg, im Juni 2013



Vorwort zur 1. Auflage

Das vorliegende Buch ist eine Einführung in die Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde auf genetischer Grundlage. Es widmet sich dem *speziellen* Teil des Faches, wobei Grundkenntnisse aus dem allgemeinen Teil – der allgemeinen Mineralogie und der Kristallographie – vorausgesetzt werden. Darüber hinaus sind neben geologischen Kenntnissen Grundlagen der allgemeinen, anorganischen und physikalischen Chemie an vielen Stellen sehr nützlich.

Im einleitenden Teil werden wichtige Begriffe erläutert und definiert. Im Teil I folgte eine Auswahl der häufigsten Minerale in übersichtlicher Form und in Anlehnung an die Systematik von H. Strunz. Teil II ist der Petrologie und Lagerstättenkunde gewidmet. Er gliedert sich: *A* in die magmatische Abfolge mit Systematik und Genese der magmatischen Gesteine einschließlich der Mineral- und Lagerstättenbildung, die mit magmatischen Vorgängen im Zusammenhang steht, *B* in die sedimentäre Abfolge mit den Verwitterungsprodukten, Sedimenten und Sedimentgesteinen einschließlich der Mineral- und Lagerstättenbildung, *C* die Gesteinsmetamorphose einschließlich der Ultrametamorphose und der Metasomatose. Ein abschließender Teil III widmet sich dem Stoffbestand von Erde und Mond und in einem kurzen Abschnitt auch den Meteoriten. Den einschlägigen experimentellen Zustandsdiagrammen – Ein-, Zwei- und Drei-Komponentensystemen – wird der ihnen ihrer Bedeutung nach zukommende Raum gewährt. An allen möglichen Stellen finden sich Hinweise auf die technisch-wirtschaftliche Bedeutung der Minerale, Gesteine und Lagerstätten als Rohstoffe.

Das Buch ist aus Vorlesungen und Übungen hervorgegangen, die der Verfasser im Laufe der Zeit seit 1950 an den Universitäten Frankfurt (M) und Würzburg durchgeführt hat. So ist der Inhalt des Buches in erster Linie den Bedürfnissen des Unterrichts an Universitäten und Hochschulen angepasst. Getroffene Auswahl und Umfang des Stoffes dieses speziellen Teiles des Faches entsprechen nach Ansicht des Verfassers weitgehend dem Lehrauftrag für das Grundstudium in Mineralogie. Für Studierende der Geologie und andere Studierende, die Mineralogie als Neben- bzw. Beifach wählen, dürfte das Buch auch bei den Anforderungen im Hauptstudium (Aufbaustudium) hilfreich sein. In allen Fällen kann es in Verbindung und zur Ergänzung von Vorlesungen und Übungen genutzt werden. Für das Weiterstudium und als Quellennachweis ist am Schluss des Buches ein Verzeichnis wichtiger Lehrbücher und Monographien aufgenommen worden. Das Buch richtet sich auch an diejenigen, die dem Fach Interesse entgegenbringen, um sich Grundkenntnisse zu erwerben oder es beruflich als Informationsquelle zu nützen. Verlag und Verfasser möchten glauben, dass das vorliegende Buch innerhalb des deutschsprachigen Schrifttums eine derzeit spürbare Lücke schließen hilft.

Die Kristallbilder sind dem Atlas der Kristallformen von V. Goldschmidt, die Kristallstrukturen großenteils dem Strukturbericht entnommen und umgezeichnet worden. Die meisten Diagramme und Strichzeichnungen stammen aus dem zitierten Schrifttum, teilweise vereinfacht, andere ergänzt. Die Zahl der Autotypien wurde mit Rücksicht auf die Preisgestaltung des Buches niedrig gehalten.

Bei der Fertigung des Buches erfuhr ich aus dem hiesigen Institut mannigfaltige Hilfe. Herr Prof. Martin Okrusch übernahm die kritische Durchsicht des Manuskriptes. Seine Ratschläge wurden als substantielle Verbesserungen dankbar anerkannt. Darüber hinaus gewährte er mir freundliche Hilfe beim Lesen der Korrektur. Herr Klaus Mezger vom hiesigen Institut unterstützte mich bei der Fertigung des Registers. Herr Klaus-Peter Kelber hat sich mit der sorgfältigen Ausführung der Zeichnungen und allen Mineralfotos große Verdienste um das Buch erworben. Die Originalaufnahmen zu den Abbildungen 145 und 146 stellte Herr Prof. K. R. Mehnert, Berlin, freundlicherweise zum Abdruck zur Verfügung. Die Fotos der Abb. 92 und 93 stammen vom Verfasser. Meine Tochter Heike hatte die lästige Aufgabe der Reinschrift des Manuskriptes übernommen. Allen sei für die gewährte Hilfe herzlich gedankt!

Schließlich habe ich dem Verlag für die jederzeit vertrauensvolle Zusammenarbeit, die Ausstattung des Buches und dessen erschwinglichen Preis zu danken, Herrn Dr. Konrad F. Springer für sein stets förderndes Interesse und Herrn Dr. Dieter Hohm für Mühewaltung und Umsicht während dieser Zusammenarbeit.

Würzburg, im Sommer 1983

Siegfried Matthes



Inhaltsverzeichnis

Teil I

Einführung und Grundbegriffe	1
1 Kristalle	3
1.1 Kristallmorphologie	4
1.2 Kristallstruktur	8
1.2.1 Bravais-Gitter	8
1.2.2 Raumgruppen	10
1.2.3 Kristallstrukturbestimmung mit Röntgenstrahlen	10
1.3 Kristallchemie	12
1.3.1 Grundprinzipien	12
1.3.2 Arten der chemischen Bindung	12
1.3.3 Einige wichtige Begriffe der Kristallchemie	14
1.4 Kristallphysik	16
1.4.1 Härte und Kohäsion	16
1.4.2 Wärmeleitfähigkeit	16
1.4.3 Elektrische Eigenschaften	17
1.4.4 Magnetische Eigenschaften	18
1.5 Kristalloptik	19
1.5.1 Grundlagen	20
1.5.2 Grundzüge der Durchlicht-Mikroskopie	21
1.5.3 Grundzüge der Auflichtmikroskopie	27
Literatur	29
2 Minerale	31
2.1 Der Mineralbegriff	32
2.2 Mineralbestimmung und Mineralsystematik	33
2.3 Vorkommen und Ausbildung der Minerale	35
2.4 Gesteinsbildende und wirtschaftlich wichtige Minerale	36
2.4.1 Gesteinsbildende Minerale	36
2.4.2 Nutzbare Minerale	39
2.4.3 Edelsteine	39
2.5 Biomineralisation und medizinische Mineralogie	42
2.5.1 Mineralbildung im Organismus	43
2.5.2 Medizinische Mineralogie	48
2.6 Mineralogische Wissenschaften und ihre Anwendungsgebiete in Technik, Industrie und Bergbau	52
Literatur	53
3 Gesteine	55
3.1 Mineralinhalt	56
3.2 Beziehungen zwischen chemischer Zusammensetzung und Mineralinhalt: Heteromorphie von Gesteinen	56

3.3	Gefüge	56
3.3.1	Struktur	56
3.3.2	Textur	57
3.4	Geologischer Verband	60
3.5	Abgrenzung der gesteinsbildenden Prozesse	61
3.6	Mineral- und Erzlagerstätten	63
	Literatur	66

Teil II

Spezielle Mineralogie	67
------------------------------	----

4 Elemente	69	
4.1	Metalle	70
4.2	Metalloide (Halbmetalle)	75
4.3	Nichtmetalle	75
	Literatur	81
5 Sulfide, Arsenide und komplexe Sulfide (Sulfosalze)	83	
5.1	Metall-Sulfide mit M:S > 1:1 (meist 2:1)	84
5.2	Metall-Sulfide und -Arsenide mit M:S ≈ 1:1	85
5.3	Metall-Sulfide, -Sulfarsenide und -Arsenide mit M:S ≤ 1:2	90
5.4	Arsen-Sulfide	94
5.5	Komplexe Metall-Sulfide (Sulfosalze)	95
	Literatur	97
6 Halogenide	99	
	Literatur	102
7 Oxide und Hydroxide	103	
7.1	M ₂ O-Verbindungen	104
7.2	M ₃ O ₄ -Verbindungen	104
7.3	M ₂ O ₃ -Verbindungen	106
7.4	MO ₂ -Verbindungen	110
7.5	Hydroxide	113
	Literatur	115
8 Karbonate, Nitrate und Borate	117	
8.1	Calcit-Gruppe, $\bar{3}2/m$	118
8.2	Aragonit-Gruppe, 2/m2/m2/m	121
8.3	Dolomit-Gruppe	123
8.4	Azurit-Malachit-Gruppe	124
8.5	Nitrate	125
8.6	Borate	125
	Literatur	127
9 Sulfate, Chromate, Molybdate, Wolframate	129	
9.1	Sulfate	130
9.2	Chromate	134
9.3	Molybdate und Wolframate	135
	Literatur	136
10 Phosphate, Arsenate, Vanadate	137	
	Literatur	141

11 Silikate	143
11.1 Inselsilikate (Nesosilikate)	145
11.2 Gruppensilikate (Sorosilikate)	153
11.3 Ringsilikate (Cyclosilikate)	156
11.4 Ketten- und Doppelkettensilikate (Inosilikate)	160
11.4.1 Pyroxen-Familie	161
11.4.2 Pyroxenoide	165
11.4.3 Amphibol-Familie	166
11.5 Schichtsilikate (Phyllosilikate)	169
11.5.1 Pyrophyllit-Talk-Gruppe	171
11.5.2 Glimmer-Gruppe	172
11.5.3 Hydroglimmer-Gruppe	174
11.5.4 Sprödglimmer-Gruppe	174
11.5.5 Chlorit-Gruppe	174
11.5.6 Serpentin-Gruppe, $Mg_6[(OH)_8/Si_4O_{10}]$	175
11.5.7 Tonmineral-Gruppe	176
11.5.8 Apophyllit-Gruppe	178
11.6 Gerüstsilikate (Tektosilikate)	179
11.6.1 SiO_2 -Minerale	179
11.6.2 Feldspat-Familie	189
11.6.3 Feldspatoide (Foide, Feldspatvertreter)	198
11.6.4 Cancrinit-Gruppe	200
11.6.5 Skapolith-Gruppe	200
11.6.6 Zeolith-Familie	201
Literatur	204
12 Flüssigkeits-Einschlüsse in Mineralen	207
Literatur	212
Teil III	
Petrologie und Lagerstättenkunde	213
13 Magmatische Gesteine (Magmatite)	215
13.1 Einteilung und Klassifikation der magmatischen Gesteine	216
13.1.1 Zuordnung nach der geologischen Stellung und dem Gefüge	216
13.1.2 Klassifikation nach dem Mineralbestand	217
13.1.3 Chemismus und CIPW-Norm	220
13.2 Petrographie der Magmatite	223
13.2.1 Subalkaline Magmatite	224
13.2.2 Alkali-Magmatite	234
13.2.3 Karbonatite, Kimberlite und Lamproite	237
Literatur	239
14 Vulkanismus	241
14.1 Effusive Förderung: Lavaströme	243
14.2 Extrusive Förderung	246
14.3 Explosive Förderung	246
14.4 Gemischte Förderung: Stratovulkane	252
14.5 Vulkanische Dampf-tätigkeit	252
Literatur	255
15 Plutonismus	257
15.1 Die Tiefenfortsetzung von Vulkanen	258

15.2	Formen plutonischer und subvulkanischer Intrusivkörper	259
15.3	Innerer Aufbau und Platznahme von Plutonen	260
15.3.1	Interngefüge von Plutonen	260
15.3.2	Mechanismen der Platznahme	261
15.3.3	Layered Intrusions	262
	Literatur	263
16	Magma und Lava	265
16.1	Chemische Zusammensetzung und Struktur magmatischer Schmelzen ...	266
16.2	Vulkanische Gase	266
16.3	Magmatische Temperaturen	267
16.3.1	Direkte Messungen	267
16.3.2	Schmelzversuche an natürlichen Gesteinen	267
16.4	Viskosität von Magmen und Laven	268
16.5	Löslichkeit von leichtflüchtigen Komponenten im Magma	269
	Literatur	271
17	Bildung und Weiterentwicklung von Magmen	273
17.1	Magmatische Serien	274
17.2	Bildung von Stamm-Magmen	275
17.2.1	Basaltische Stamm-Magmen	275
17.2.2	Granitische Magmen	275
17.3	Magmenmischung	276
17.4	Magmatische Differentiation	276
17.4.1	Kristallisations-Differentiation	276
17.4.2	Entmischung im schmelzflüssigen Zustand (liquide Entmischung)	279
17.5	Assimilation	279
	Literatur	280
18	Experimentelle Modellsysteme	281
18.1	Die Gibbs'sche Phasenregel	282
18.2	Experimente in Zweistoff- und Dreistoffsystemen	283
18.2.1	Experimente zur Kristallisationsabfolge basaltischer Magmen	283
18.2.2	Experimente zur Bildung SiO ₂ -übersättigter und SiO ₂ -untersättigter Magmen	289
18.2.3	Experimente zum Verhalten von Mafiten in basaltischen Magmen ...	295
18.3	Das Reaktionsprinzip von Bowen	299
18.4	Das Basalt-Tetraeder von Yoder und Tilley (1962)	302
18.5	Gleichgewichts-Schmelzen und fraktioniertes Schmelzen	303
	Literatur	304
19	Die Herkunft des Basalts	305
19.1	Basalte und Plattentektonik	306
19.2	Bildung von Basalt-Magmen durch partielles Schmelzen von Mantelperidotit	307
19.2.1	Das Pyrolit-Modell	307
19.2.2	Partielles Schmelzen von H ₂ O-freiem Pyrolit	307
19.2.3	Partielles Schmelzen von H ₂ O-haltigem Pyrolit	308
	Literatur	310
20	Die Herkunft des Granits	311
20.1	Genetische Einteilung der Granite auf geochemischer Basis	312
20.2	Experimente zur Granitgenese	313
20.2.1	Einführung	313

20.2.2	Kristallisationsverlauf granitischer Magmen: Experimente im H ₂ O-gesättigten Modellsystem Qz–Ab–Or–H ₂ O	314
20.2.3	Experimentelle Anatexis: Experimente unter H ₂ O-gesättigten und H ₂ O-untersättigten Bedingungen im Modellsystem Qz–Ab–Or–H ₂ O	316
20.2.4	Das Modellsystem Qz–Ab–An–Or–H ₂ O	319
20.2.5	Das Modellsystem Qz–Ab–An–H ₂ O	320
20.2.6	Das natürliche Granitsystem	320
	Literatur	321
21	Orthomagmatische Erzlagerstätten	323
21.1	Einführung	324
21.2	Lagerstättenbildung durch fraktionierte Kristallisation	324
21.2.1	Chromit- und Chromit-PGE-Lagerstätten	326
21.2.2	Fe-Ti-Oxid-Lagerstätten	327
21.3	Lagerstättenbildung durch liquide Entmischung von Sulfid- und Oxidschmelzen	328
21.3.1	Nickelmagnetkies-Kupferkies-PGE-Lagerstätten in Noriten und Pyroxeniten	328
21.3.2	Nickelmagnetkies-Kupferkies-Lagerstätten in Komatiiten	331
21.3.3	Magnetit-Apatit-Lagerstätten	331
21.4	Erz- und Mineral-Lagerstätten in Karbonatit-Alkali-Magmatit-Komplexen	331
	Literatur	332
22	Pegmatite	335
22.1	Theoretische Überlegungen	336
22.2	Geologisches Auftreten und Petrographie von Pegmatiten	337
22.3	Pegmatite als Rohstoffträger	339
22.4	Geochemische Klassifikation der Granit-Pegmatite	340
	Literatur	340
23	Hydrothermale Erz- und Minerallagerstätten	343
23.1	Grundlagen	344
23.2	Hydrothermale Imprägnationslagerstätten	347
23.2.1	Zinnerz-Lagerstätten	347
23.2.2	Wolfram-Lagerstätten	348
23.2.3	Molybdän-Lagerstätten	348
23.2.4	Porphyrische Kupfererz-Lagerstätten (Porphyry Copper Ores)	349
23.2.5	Imprägnationen mit ged. Kupfer (Typus Oberer See)	350
23.3	Hydrothermale Verdrängungslagerstätten	351
23.3.1	Skarnerz-Lagerstätten	351
23.3.2	Mesothermale Kupfer-Arsen-Verdrängungs-Lagerstätten	352
23.3.3	Hydrothermale Blei-Silber-Zink-Verdrängungslagerstätten	352
23.3.4	Hydrothermale Gold-Pyrit-Verdrängungslagerstätten vom Carlin-Typ	352
23.3.5	Metasomatische Siderit-Lagerstätten	353
23.3.6	Metasomatische Magnesit-Lagerstätten	353
23.4	Hydrothermale Erz- und Mineralgänge	353
23.4.1	Orogene Gold-Quarz-Gänge	354
23.4.2	Epithermale Gold- und Gold-Silber-Lagerstätten (subvulkanisch)	355
23.4.3	Mesothermale Kupfererzgänge	356
23.4.4	Blei-Silber-Zink-Erzgänge	356
23.4.5	Zinn-Silber-Bismut-Erzgänge des bolivianischen Zinngürtels	357
23.4.6	Bismut-Kobalt-Nickel-Silber-Uran-Erzgänge	358
23.4.7	Telethermale Antimon-Quarz-Gänge	359
23.4.8	Hydrothermale Siderit- und Hämatit-Erzgänge	359