

---

# 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](http://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 Klemd (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 Klemd (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

<b>Einführung und Grundbegriffe</b> .....	1
<b>1 Kristalle</b> .....	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
<b>2 Minerale</b> .....	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
<b>3 Gesteine</b> .....	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

<b>Spezielle Mineralogie</b>	67
------------------------------	----

<b>4 Elemente</b>	69	
4.1	Metalle	70
4.2	Metalloide (Halbmetalle)	75
4.3	Nichtmetalle	75
	Literatur	81
<b>5 Sulfide, Arsenide und komplexe Sulfide (Sulfosalze)</b>	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
<b>6 Halogenide</b>	99	
	Literatur	102
<b>7 Oxide und Hydroxide</b>	103	
7.1	M <sub>2</sub> O-Verbindungen	104
7.2	M <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -Verbindungen	104
7.3	M <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Verbindungen	106
7.4	MO <sub>2</sub> -Verbindungen	110
7.5	Hydroxide	113
	Literatur	115
<b>8 Karbonate, Nitrate und Borate</b>	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
<b>9 Sulfate, Chromate, Molybdate, Wolframate</b>	129	
9.1	Sulfate	130
9.2	Chromate	134
9.3	Molybdate und Wolframate	135
	Literatur	136
<b>10 Phosphate, Arsenate, Vanadate</b>	137	
	Literatur	141

<b>11 Silikate</b> .....	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
<b>12 Flüssigkeits-Einschlüsse in Mineralen</b> .....	207
Literatur .....	212
<b>Teil III</b>	
<b>Petrologie und Lagerstättenkunde</b> .....	213
<b>13 Magmatische Gesteine (Magmatite)</b> .....	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
<b>14 Vulkanismus</b> .....	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 Dampfbarkeit .....	252
Literatur .....	255
<b>15 Plutonismus</b> .....	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
<b>16</b>	<b>Magma und Lava .....</b>	<b>265</b>
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
<b>17</b>	<b>Bildung und Weiterentwicklung von Magmen .....</b>	<b>273</b>
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
<b>18</b>	<b>Experimentelle Modellsysteme .....</b>	<b>281</b>
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 <sub>2</sub> -übersättigter und SiO <sub>2</sub> -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
<b>19</b>	<b>Die Herkunft des Basalts .....</b>	<b>305</b>
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 <sub>2</sub> O-freiem Pyrolit .....	307
19.2.3	Partielles Schmelzen von H <sub>2</sub> O-haltigem Pyrolit .....	308
	Literatur .....	310
<b>20</b>	<b>Die Herkunft des Granits .....</b>	<b>311</b>
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 <sub>2</sub> O-gesättigten Modellsystem Qz–Ab–Or–H <sub>2</sub> O	314
20.2.3	Experimentelle Anatexis: Experimente unter H <sub>2</sub> O-gesättigten und H <sub>2</sub> O-untersättigten Bedingungen im Modellsystem Qz–Ab–Or–H <sub>2</sub> O	316
20.2.4	Das Modellsystem Qz–Ab–An–Or–H <sub>2</sub> O	319
20.2.5	Das Modellsystem Qz–Ab–An–H <sub>2</sub> O	320
20.2.6	Das natürliche Granitsystem	320
	Literatur	321
<b>21</b>	<b>Orthomagmatische Erzlagerstätten</b>	<b>323</b>
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
<b>22</b>	<b>Pegmatite</b>	<b>335</b>
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
<b>23</b>	<b>Hydrothermale Erz- und Minerallagerstätten</b>	<b>343</b>
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

23.4.9	Nichtmetallische hydrothermale Ganglagerstätten	360
23.4.10	Quarzgänge und hydrothermale Verkieselungen	360
23.4.11	Alpine Klüfte	360
23.5	Vulkanogen-sedimentäre Erzlagerstätten	360
23.5.1	Erzbildung durch rezente Hydrothermal-Aktivität in der Tiefsee: Black Smoker	360
23.5.2	Vulkanogen-massive Sulfiderz-Lagerstätten (VMS-Lagerstätten)	363
23.5.3	Vulkanogen-sedimentäre Quecksilbererz-Lagerstätten	364
23.5.4	Vulkanogene Oxiderz-Lagerstätten	365
23.6	Schichtgebundene Hydrothermal-Lagerstätten	365
23.6.1	Sedimentär-exhalative Blei-Zink-Erzlagerstätten (Sedex-Lagerstätten)	365
23.6.2	Karbonat-gebundene Erz- und Mineral-Lagerstätten	366
23.7	Diskordanz-gebundene Uranerz-Lagerstätten	367
	Literatur	368
<b>24</b>	<b>Verwitterung und mineralbildende Vorgänge im Boden</b>	<b>371</b>
24.1	Mechanische Verwitterung	372
24.2	Chemische Verwitterung	372
24.2.1	Leicht lösliche Minerale	373
24.2.2	Verwitterung der Silikate	373
24.3	Subaerische Verwitterung und Klimazonen	375
24.4	Zur Abgrenzung des Begriffs Boden	375
24.5	Verwitterungsbildungen von Silikatgesteinen und ihre Lagerstätten	376
24.5.1	Residualtone und Kaolin	376
24.5.2	Bentonit	376
24.5.3	Bauxit	376
24.5.4	Fe-, Mn- und Co-reiche Laterite	377
24.5.5	Ni- und Co-reiche Laterite	378
24.5.6	Weitere Residual-Lagerstätten	378
24.6	Verwitterung sulfidischer Erzkörper	378
24.6.1	Oxidationszone	378
24.6.2	Zementationszone	380
24.6.3	Stabilitätsbeziehungen wichtiger Kupferminerale bei der Verwitterung	380
	Literatur	381
<b>25</b>	<b>Sedimente und Sedimentgesteine</b>	<b>383</b>
25.1	Grundlagen	384
25.1.1	Einteilung der Sedimente und Sedimentgesteine	384
25.1.2	Gefüge der Sedimente und Sedimentgesteine	384
25.2	Klastische Sedimente und Sedimentgesteine	385
25.2.1	Transport und Ablagerung des klastischen Materials	385
25.2.2	Chemische Veränderungen während des Transports	385
25.2.3	Korngrößenverteilung bei klastischen Sedimenten und ihre Darstellung	386
25.2.4	Diagenese der klastischen Sedimentgesteine	386
25.2.5	Einteilung der Psephite und Psammite	388
25.2.6	Schwerminerale in Psammiten	390
25.2.7	Fluviatile und marine Seifen	390
25.2.8	Metallkonzentrationen in ariden Schuttwannen (Lagerstätten vom Red-Bed-Typ)	394
25.2.9	Einteilung der Pelite	394
25.2.10	Diagenese von Peliten	396

25.2.11	Buntmetall-Lagerstätten in Schwarzschiefern	397
25.2.12	Übergang von der Diagenese zur niedriggradigen Metamorphose	398
25.3	Chemische und biochemische Karbonatsedimente und -sedimentgesteine	399
25.3.1	Einteilung der Karbonatgesteine	399
25.3.2	Löslichkeit und Ausscheidungsbedingungen des $\text{CaCO}_3$	399
25.3.3	Anorganische und biochemische Karbonat-Bildung im Meerwasser	401
25.3.4	Bildung festländischer (terrestrischer) Karbonatsedimente	403
25.3.5	Diagenese von Kalkstein	403
25.4	Eisen- und Mangan-reiche Sedimente und Sedimentgesteine	404
25.4.1	Ausfällung des Eisens und die Stabilitätsbedingungen der Fe-Minerale	404
25.4.2	Sedimentäre Eisenerze	406
25.4.3	Sedimentäre Manganerze	408
25.4.4	Metallkonzentrationen am Ozeanboden	408
25.5	Kieselige Sedimente und Sedimentgesteine	409
25.6	Sedimentäre Phosphatgesteine	410
25.7	Evaporite (Salzgesteine)	410
25.7.1	Kontinentale (terrestrische) Evaporite	410
25.7.2	Marine Evaporite	411
	Literatur	414
<b>26</b>	<b>Metamorphe Gesteine</b>	<b>417</b>
26.1	Grundlagen	418
26.1.1	Metamorphe Prozesse	418
26.1.2	Ausgangsmaterial metamorpher Gesteine	419
26.1.3	Abgrenzung der Gesteinsmetamorphose	420
26.1.4	Auslösende Faktoren der Gesteinsmetamorphose	421
26.2	Die Gesteinsmetamorphose als geologischer Prozess	423
26.2.1	Kontaktmetamorphose	424
26.2.2	Kataklastische Metamorphose und Mylonitisierung	428
26.2.3	Schockwellen- oder Impakt-Metamorphose	429
26.2.4	Hydrothermale Metamorphose	432
26.2.5	Regionalmetamorphose in Orogenzonen	432
26.2.6	Regionale Versenkungsmetamorphose	437
26.2.7	Regionale Ozeanboden-Metamorphose	437
26.3	Nomenklatur der regional- und kontaktmetamorphen Gesteine	438
26.3.1	Regionalmetamorphe Gesteine	438
26.3.2	Kontaktmetamorphe Gesteine	444
26.4	Das Gefüge der metamorphen Gesteine	445
26.4.1	Gefügerelikte	445
26.4.2	Das kristalloblastische Gefüge	446
26.4.3	Gefügeregelung bei metamorphen Gesteinen (Deformationsgefüge)	447
26.5	Bildung von Migmatiten durch partielle Anatexis	453
26.5.1	Der Migmatitbegriff	453
26.5.2	Experimentelle Grundlagen für die anatektische Bildung von Migmatiten	454
26.5.3	Stoffliche Bilanz bei der Entstehung von Migmatiten	455
26.5.4	Die globale geodynamische Bedeutung der partiellen Anatexis	455
26.6	Metasomatose	456
26.6.1	Kontaktmetasomatose	457
26.6.2	Autometasomatose	459
26.6.3	Spilite als Produkte einer Natrium-Metasomatose	460
	Literatur	460

<b>27</b>	<b>Phasengleichgewichte und Mineralreaktionen in metamorphen Gesteinen</b>	463
27.1	Gleichgewichtsbeziehungen in metamorphen Gesteinen	464
27.1.1	Feststellung des thermodynamischen Gleichgewichts	464
27.1.2	Die Gibbs'sche Phasenregel	464
27.1.3	Die freie Enthalpie: Stabile und metastabile Niveaus	466
27.2	Metamorphe Mineralreaktionen	468
27.2.1	Polymorphe Umwandlungen und Reaktionen ohne Freisetzung einer fluiden Phase	468
27.2.2	Entwässerungs-Reaktionen	471
27.2.3	Dekarbonatisierungs-Reaktionen	476
27.2.4	Reaktionen, an denen H <sub>2</sub> O und CO <sub>2</sub> beteiligt sind	477
27.2.5	Oxidations-Reduktions-Reaktionen	479
27.2.6	Petrogenetische Netze	481
27.3	Geothermometrie und Geobarometrie	482
27.4	Druck-Temperatur-Entwicklung metamorpher Komplexe	484
27.4.1	Druck-Temperatur-Pfade	484
27.4.2	Druck-Temperatur-Zeit-Pfade	486
	Literatur	487
<b>28</b>	<b>Metamorphe Mineralfazies</b>	489
28.1	Graphische Darstellung metamorpher Mineralparagenesen	490
28.1.1	ACF- und A'KF-Diagramme	490
28.1.2	AFM-Projektion	492
28.2	Das Faziesprinzip	495
28.2.1	Begründung des Faziesprinzips	495
28.2.2	Metamorphe Faziesserien	497
28.3	Übersicht über die metamorphen Fazies	498
28.3.1	Zeolith- und Prehnit-Pumpellyit-Fazies	498
28.3.2	Grünschieferfazies	498
28.3.3	Epidot-Amphibolit-Fazies	499
28.3.4	Amphibolitfazies	499
28.3.5	Granulitfazies	502
28.3.6	Hornfelsfazies	504
28.3.7	Sanidinitfazies	505
28.3.8	Blauschieferfazies	505
28.3.9	Eklogitfazies	507
	Literatur	510
<b>Teil IV</b>		
<b>Stoffbestand und Bau von Erde und Mond</b>		
<b>– unser Planetensystem</b>		
		513
<b>29</b>	<b>Aufbau des Erdinnern</b>	515
29.1	Seismischer Befund zum Aufbau des Erdinnern	516
29.1.1	Physikalische Grundlagen	516
29.1.2	Ausbreitung von Erdbebenwellen im Erdinnern	517
29.1.3	Geschwindigkeitsverteilung der Erdbebenwellen im Erdinnern	518
29.2	Erdkruste	518
29.2.1	Ozeanische Erdkruste	519
29.2.2	Kontinentale Erdkruste	520
29.2.3	Die Erdkruste in jungen Orogengürteln	522



---

29.3	Erdmantel .....	522
29.3.1	Der oberste, lithosphärische Erdmantel und die Natur der Moho .....	522
29.3.2	Die Asthenosphäre als Förderband der Lithosphärenplatten .....	527
29.3.3	Übergangszone .....	530
29.3.4	Unterer Erdmantel .....	532
29.4	Erdkern .....	533
29.4.1	Geophysikalischer Befund .....	533
29.4.2	Chemische Zusammensetzung des Erdkerns .....	534
	Literatur .....	535
<b>30</b>	<b>Aufbau und Stoffbestand des Mondes</b> .....	<b>537</b>
30.1	Die Kruste des Mondes .....	538
30.1.1	Hochlandregionen .....	538
30.1.2	Regionen der Maria .....	540
30.1.3	Minerale der Mondgesteine .....	540
30.1.4	Der Regolith .....	541
30.1.5	Reste von Wasser im Regolith .....	541
30.2	Innerer Aufbau des Mondes .....	542
30.2.1	Die Mondkruste .....	542
30.2.2	Der Mondmantel .....	542
30.2.3	Der Mondkern .....	543
30.3	Geologische Geschichte des Mondes .....	544
	Literatur .....	545
<b>31</b>	<b>Meteorite</b> .....	<b>547</b>
31.1	Fallphänomene .....	548
31.2	Häufigkeit von Meteoriten .....	550
31.3	Haupttypen der Meteorite .....	552
31.3.1	Undifferenzierte Steinmeteorite: Chondrite .....	553
31.3.2	Differenzierte Steinmeteorite: Achondrite .....	557
31.3.3	Stein-Eisen-Meteorite (differenziert) .....	559
31.3.4	Eisenmeteorite (differenziert) .....	561
31.4	Tektite .....	563
	Literatur .....	564
<b>32</b>	<b>Unser Planetensystem</b> .....	<b>567</b>
32.1	Die erdähnlichen Planeten .....	568
32.1.1	Merkur .....	568
32.1.2	Venus .....	570
32.1.3	Mars .....	573
32.2	Die Asteroiden .....	579
32.3	Die Riesenplaneten und ihre Satelliten .....	581
32.3.1	Astronomische Erforschung .....	581
32.3.2	Atmosphäre und innerer Bau der Riesenplaneten .....	582
32.3.3	Die Jupiter-Monde .....	584
32.3.4	Die Eismonde von Saturn, Uranus und Neptun .....	587
32.3.5	Die Ringsysteme der Riesenplaneten .....	590
32.4	Die Trans-Neptun-Objekte (TNO) im Kuiper-Gürtel .....	591
32.5	Der Zwergplanet Pluto und sein Mond Charon: ein Doppelplanet .....	591
	Literatur .....	592

---

<b>33 Einführung in die Geochemie</b> .....	595
33.1 Geochemische Gliederung der Elemente .....	596
33.2 Chemische Zusammensetzung der Gesamterde .....	598
33.3 Chemische Zusammensetzung der Erdkruste .....	600
33.3.1 Berechnungen des Krustenmittels: Clarke-Werte .....	600
33.3.2 Seltene Elemente und Konzentrations-Clarkes .....	602
33.4 Spurenelement-Geochemie magmatischer Prozesse .....	603
33.4.1 Grundlagen .....	603
33.4.2 Spurenelement-Fraktionierungen bei der Bildung und Differentiation von Magmen .....	605
33.4.3 Spurenelemente als Indikatoren für die geotektonische Position von magmatischen Prozessen .....	609
33.5 Isotopen-Geochemie .....	610
33.5.1 Einführung .....	610
33.5.2 Stabile Isotope .....	611
33.5.3 Einsatz radiogener Isotope in der Geochronologie .....	615
33.6 Entstehung der chemischen Elemente .....	624
Literatur .....	626
<b>34 Die Entstehung unseres Sonnensystems</b> .....	629
34.1 Frühe Theorien und erste Belege .....	630
34.2 Sternentstehung .....	630
34.3 Zusammensetzung des Solarnebels .....	631
34.4 Entstehung der Planeten .....	633
Literatur .....	638
<b>A Anhang</b> .....	639
A.1 Übersicht wichtiger Ionenradien und der Ionenkoordination gegenüber $O^{2-}$ .....	639
A.2 Berechnung von Mineralformeln .....	639
A.3 Lernschema der subalkalinen Magmatite und der Alkali-Magmatite .....	642
Literatur .....	643
Abdruckgenehmigungen .....	644
<b>I Index</b> .....	645
Sachindex .....	645
Geographischer Index .....	713