

---

Martin Okrusch  
Siegfried Matthes

# Mineralogie

Eine Einführung in die spezielle Mineralogie,  
Petrologie und Lagerstättenkunde

8., vollständig überarbeitete, erweiterte und aktualisierte Auflage

Mit 438 Abbildungen, davon 133 in Farbe

 Springer



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung und Grundbegriffe</b>	<b>1</b>
1.1	Minerale	2
1.2	Kristalle	4
1.2.1	Kristallmorphologie	5
1.2.2	Kristallstruktur	9
1.2.3	Kristallchemie	13
1.2.4	Kristallphysik	16
1.3	Mineralarten und Mineralvarietäten	29
1.4	Vorkommen der Minerale, speziell als Bestandteile der Erdkruste	29
1.5	Gesteine	30
1.5.1	Mineralinhalt	31
1.5.2	Beziehungen zwischen chemischer Zusammensetzung und Mineralinhalt: Heteromorphie von Gesteinen	31
1.5.3	Gefüge	31
1.5.4	Geologischer Verband	32
1.6	Mineral- und Erzlagerstätten	34
1.7	Abgrenzung der gesteinsbildenden Vorgänge	34
1.8	Mineralogische Wissenschaften und ihre Anwendungsgebiete in Technik, Industrie und Bergbau	35
1.9	Biomineralisation und medizinische Mineralogie (unter Mitwirkung von Joachim A. Lorenz)	36
1.9.1	Mineralbildung im Organismus	37
1.9.2	Medizinische Mineralogie	38
1.10	Bestimmung von Mineralen mit einfachen Hilfsmitteln	42
	Weiterführende Literatur	42
<b>Teil I</b>		
	<b>Spezielle Mineralogie – Eine Auswahl wichtiger Minerale</b>	<b>45</b>
<b>2</b>	<b>Elemente</b>	<b>47</b>
2.1	Metalle	48
2.2	Metalloide (Halbmetalle)	53
2.3	Nichtmetalle	53
	Weiterführende Literatur	59
	Zitierte Literatur	60
<b>3</b>	<b>Sulfide, Arsenide und komplexe Sulfide (Sulfosalze)</b>	<b>61</b>
3.1	Metall-Sulfide mit M:S > 1:1 (meist 2:1)	62
3.2	Metall-Sulfide und -Arsenide mit M:S ≈ 1:1	63
3.3	Metall-Sulfide, -Sulfarsenide und -Arsenide mit M:S ≤ 1:2	68
3.4	Arsen-Sulfide	72
3.5	Komplexe Metall-Sulfide (Sulfosalze)	73
	Weiterführende Literatur	75

<b>4 Halogenide</b> .....	77
Weiterführende Literatur .....	80
<b>5 Oxide und Hydroxide</b> .....	81
5.1 M <sub>2</sub> O-Verbindungen .....	82
5.2 M <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -Verbindungen .....	82
5.3 M <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Verbindungen .....	84
5.4 MO <sub>2</sub> -Verbindungen .....	88
5.5 Hydroxide .....	91
Weiterführende Literatur .....	93
Zitierte Literatur .....	93
<b>6 Karbonate, Nitrate und Borate</b> .....	95
6.1 Calcit-Gruppe, $\bar{3}2/m$ .....	96
6.2 Aragonit-Gruppe, $2/m2/m2/m$ .....	99
6.3 Dolomit-Gruppe .....	101
6.4 Azurit-Malachit-Gruppe .....	102
6.5 Nitrate .....	103
6.6 Borate .....	103
Weiterführende Literatur .....	105
Zitierte Literatur .....	105
<b>7 Sulfate, Chromate, Molybdate, Wolframate</b> .....	107
7.1 Sulfate .....	108
7.2 Chromate .....	112
7.3 Molybdate und Wolframate .....	113
Weiterführende Literatur .....	114
Zitierte Literatur .....	114
<b>8 Phosphate, Arsenate, Vanadate</b> .....	115
Weiterführende Literatur .....	118
<b>9 Silikate</b> .....	119
9.1 Inselsilikate (Nesosilikate) .....	121
9.2 Gruppensilikate (Sorosilikate) .....	129
9.3 Ringsilikate (Cyclosilikate) .....	132
9.4 Ketten- und Doppelkettensilikate (Inosilikate) .....	136
9.4.1 Pyroxen-Familie .....	137
9.4.2 Pyroxenoide .....	141
9.4.3 Amphibol-Familie .....	142
9.5 Schichtsilikate (Phyllosilikate) .....	145
9.5.1 Pyrophyllit-Talk-Gruppe .....	147
9.5.2 Glimmer-Gruppe .....	148
9.5.3 Hydroglimmer-Gruppe .....	150
9.5.4 Sprödglimmer-Gruppe .....	150
9.5.5 Chlorit-Gruppe .....	150
9.5.6 Serpentin-Gruppe .....	151
9.5.7 Tonmineral-Gruppe .....	152
9.5.8 Apophyllit-Gruppe .....	154
9.6 Gerüstsilikate (Tektosilikate) .....	155
9.6.1 SiO <sub>2</sub> -Minerale .....	155
9.6.2 Feldspat-Familie .....	164
9.6.3 Feldspatoide (Foide, Feldspatvertreter) .....	173
9.6.4 Skapolith-Gruppe .....	175

9.6.5 Zeolith-Familie .....	175
Weiterführende Literatur .....	179
Zitierte Literatur .....	179
<b>10 Flüssigkeitseinschlüsse in Mineralen</b> .....	181
Weiterführende Literatur .....	185
Zitierte Literatur .....	185
<b>Teil II</b>	
<b>Petrologie und Lagerstättenkunde</b> .....	187
<b>11 Magmatische Gesteine (Magmatite)</b> .....	189
11.1 Einteilung und Klassifikation der magmatischen Gesteine .....	190
11.1.1 Zuordnung nach der geologischen Stellung und dem Gefüge .....	190
11.1.2 Klassifikation nach dem Mineralbestand .....	191
11.1.3 Chemismus und CIPW-Norm .....	194
11.2 Petrographie der Magmatite .....	197
11.2.1 Subalkaline Magmatite .....	198
11.2.2 Alkali-Magmatite .....	207
11.2.3 Karbonatite, Kimberlite und Lamproite .....	211
Weiterführende Literatur .....	213
Zitierte Literatur .....	213
<b>12 Vulkanismus</b> .....	215
12.1 Effusive Förderung: Lavaströme .....	217
12.2 Extrusive Förderung .....	219
12.3 Explosive Förderung .....	220
12.4 Gemischte Förderung: Stratovulkane .....	226
12.5 Vulkanische Dampfätigkeit .....	226
Weiterführende Literatur .....	228
Zitierte Literatur .....	229
<b>13 Plutonismus</b> .....	231
13.1 Die Tiefenfortsetzung von Vulkanen .....	232
13.2 Formen plutonischer und subvulkanischer Intrusivkörper .....	233
13.3 Innerer Aufbau und Platznahme von Plutonen .....	234
13.3.1 Interngefüge von Plutonen .....	234
13.3.2 Mechanismen der Platznahme .....	235
13.3.3 Layered Intrusions .....	236
Weiterführende Literatur .....	237
Zitierte Literatur .....	237
<b>14 Magma und Lava</b> .....	239
14.1 Chemische Zusammensetzung und Struktur magmatischer Schmelzen .....	240
14.2 Vulkanische Gase .....	240
14.3 Magmatische Temperaturen .....	241
14.3.1 Direkte Messungen .....	241
14.3.2 Schmelzversuche an natürlichen Gesteinen .....	241
14.4 Viskosität von Magmen und Laven .....	242
14.5 Löslichkeit von leichtflüchtigen Komponenten im Magma .....	243
Weiterführende Literatur .....	245
Zitierte Literatur .....	245

<b>15</b>	<b>Bildung und Weiterentwicklung von Magmen</b>	247
15.1	Magmatische Serien	248
15.2	Bildung von Stamm-Magmen	249
15.2.1	Basaltische Stamm-Magmen	249
15.2.2	Granitische Magmen	249
15.3	Magmenmischung	250
15.4	Magmatische Differentiation	250
15.4.1	Kristallisations-Differentiation	250
15.4.2	Entmischung im schmelzflüssigen Zustand (liquide Entmischung)	253
15.5	Assimilation	253
	Weiterführende Literatur	254
	Zitierte Literatur	254
<b>16</b>	<b>Experimentelle Modellsysteme</b>	255
16.1	Die Gibbs'sche Phasenregel	256
16.2	Experimente in Zweistoff- und Dreistoffsystemen	257
16.2.1	Experimente zur Kristallisationsabfolge basaltischer Magmen	257
16.2.2	Experimente zur Bildung SiO <sub>2</sub> -übersättigter und SiO <sub>2</sub> -untersättigter Magmen	263
16.2.3	Experimente zum Verhalten von Mafiten in basaltischen Magmen	269
16.3	Das Reaktionsprinzip von Bowen	273
16.4	Das Basalt-Tetraeder von Yoder und Tilley (1962)	276
16.5	Gleichgewichtsschmelzen und fraktioniertes Schmelzen	277
	Weiterführende Literatur	278
	Zitierte Literatur	278
<b>17</b>	<b>Die Herkunft des Basalts</b>	279
17.1	Basalte und Plattentektonik	280
17.2	Bildung von Basalt-Magmen durch partielles Schmelzen von Mantelperidotit	281
17.2.1	Das Pyrolit-Modell	281
17.2.2	Partielles Schmelzen von H <sub>2</sub> O-freiem Pyrolit	281
17.2.3	Partielles Schmelzen von H <sub>2</sub> O-haltigem Pyrolit	282
	Weiterführende Literatur	284
	Zitierte Literatur	284
<b>18</b>	<b>Die Herkunft des Granits</b>	285
18.1	Genetische Einteilung der Granite auf geochemischer Basis	286
18.2	Experimente zur Granitgenese	287
18.2.1	Einführung	287
18.2.2	Kristallisationsverlauf granitischer Magmen: Experimente im H <sub>2</sub> O-gesättigten Modellsystem Qz-Ab-Or-H <sub>2</sub> O	287
18.2.3	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	290
18.2.4	Das Modellsystem Qz-Ab-An-Or-H <sub>2</sub> O	293
18.2.5	Das Modellsystem Qz-Ab-An-H <sub>2</sub> O	293
18.2.6	Das natürliche Granitsystem	294
	Weiterführende Literatur	295
	Zitierte Literatur	295

<b>19</b>	<b>Orthomagmatische Erzlagerstätten</b>	297
19.1	Einführung	298
19.2	Lagerstättenbildung durch fraktionierte Kristallisation	298
19.2.1	Chromit- und Chromit-PGE-Lagerstätten	300
19.2.2	Fe-Ti-Oxid-Lagerstätten	301
19.3	Lagerstättenbildung durch liquide Entmischung von Sulfid- und Oxid-Schmelzen	302
19.3.1	Nickelmagnetkies-Kupferkies-PGE-Lagerstätten in Noriten und Pyroxeniten	302
19.3.2	Nickelmagnetkies-Kupferkies-Lagerstätten in Komatiiten	305
19.3.3	Magnetit-Apatit-Lagerstätten	305
19.4	Erz- und Mineral-Lagerstätten in Karbonatit-Alkalimagmatit-Komplexen	305
	Weiterführende Literatur	306
	Zitierte Literatur	306
<b>20</b>	<b>Pegmatite</b>	307
20.1	Theoretische Überlegungen	308
20.2	Geologisches Auftreten und Petrographie von Pegmatiten	309
20.3	Pegmatite als Rohstoffträger	311
20.4	Genetische Klassifikation der Pegmatite	312
	Weiterführende Literatur	312
	Zitierte Literatur	312
<b>21</b>	<b>Hydrothermale Erz- und Minerallagerstätten</b>	313
21.1	Grundlagen	314
21.2	Hydrothermale Imprägnationslagerstätten	316
21.2.1	Zinnerz-Lagerstätten	316
21.2.2	Wolfram-Lagerstätten	318
21.2.3	Molybdän-Lagerstätten	318
21.2.4	Porphyry Copper Ores	318
21.2.5	Imprägnationen mit ged. Kupfer (Typus Oberer See)	320
21.3	Hydrothermale Verdrängungslagerstätten	320
21.3.1	Skarnerz-Lagerstätten	320
21.3.2	Mesothermale Kupfer-Arsen-Verdrängungs-Lagerstätten	321
21.3.3	Hydrothermale Blei-Silber-Zink-Verdrängungslagerstätten	322
21.3.4	Hydrothermale Gold-Pyrit-Verdrängungslagerstätten vom Carlin-Typ	322
21.3.5	Metasomatische Siderit-Lagerstätten	322
21.3.6	Metasomatische Magnesit-Lagerstätten	322
21.4	Hydrothermale Erz- und Mineralgänge	323
21.4.1	Oroge Gold-Quarz-Gänge	324
21.4.2	Epithermale Gold- und Gold-Silber-Lagerstätten (subvulkanisch)	325
21.4.3	Mesothermale Kupfererzgänge	325
21.4.4	Blei-Silber-Zink-Erzgänge	326
21.4.5	Zinn-Silber-Wismut-Erzgänge des bolivianischen Zinngürtels	326
21.4.6	Wismut-Kobalt-Nickel-Silber-Uran-Erzgänge	327
21.4.7	Telethermale Antimon-Quarz-Gänge	328
21.4.8	Hydrothermale Siderit- und Hämatit-Erzgänge	328
21.4.9	Nichtmetallische hydrothermale Ganglagerstätten	329
21.4.10	Quarzgänge und hydrothermale Verkieselungen	329
21.4.11	Alpine Klüfte	329

21.5	Vulkanogen-sedimentäre Erzlagerstätten	329
21.5.1	Rezente hydrothermale Erzbildung in der Tiefsee: Black Smoker	329
21.5.2	Vulkanogene massive Sulfiderz-Lagerstätten (VMS-Lagerstätten)	332
21.5.3	Vulkanogen-sedimentäre Quecksilbererz-Lagerstätten	333
21.5.4	Vulkanogene Oxiderz-Lagerstätten	333
21.6	Sedimentgesteins-gebundene hydrothermale Lagerstätten	334
21.6.1	Sedimentär-exhalative Blei-Zink-Erzlagerstätten (Sedex-Lagerstätten)	334
21.6.2	Karbonat-gebundene Erz- und Mineral-Lagerstätten	335
	Weiterführende Literatur	335
	Zitierte Literatur	336
<b>22</b>	<b>Verwitterung und mineralbildende Vorgänge im Boden</b>	<b>339</b>
22.1	Mechanische Verwitterung	340
22.2	Chemische Verwitterung	340
22.2.1	Leicht lösliche Minerale	341
22.2.2	Verwitterung der Silikate	341
22.3	Subaerische Verwitterung und Klimazonen	343
22.4	Zur Abgrenzung des Begriffs Boden	343
22.5	Verwitterungsbildungen von Silikatgesteinen und ihre Lagerstätten	344
22.5.1	Residualtone und Kaolin	344
22.5.2	Bentonit	344
22.5.3	Bauxit	344
22.5.4	Fe- und Mn-reiche Laterite	345
22.5.5	Ni-reiche Laterite	345
22.5.6	Weitere Residual-Lagerstätten	346
22.6	Verwitterung sulfidischer Erzkörper	346
22.6.1	Oxidationszone	346
22.6.2	Zementationszone	347
22.6.3	Stabilitätsbeziehungen wichtiger Kupferminerale bei der Verwitterung	348
	Weiterführende Literatur	349
	Zitierte Literatur	349
<b>23</b>	<b>Sedimente und Sedimentgesteine</b>	<b>351</b>
23.1	Grundlagen	352
23.1.1	Einteilung der Sedimente und Sedimentgesteine	352
23.1.2	Gefüge der Sedimente und Sedimentgesteine	352
23.2	Klastische Sedimente und Sedimentgesteine	353
23.2.1	Transport und Ablagerung des klastischen Materials	353
23.2.2	Chemische Veränderungen während des Transports	353
23.2.3	Korngrößenverteilung bei klastischen Sedimenten und ihre Darstellung	354
23.2.4	Diagenese der klastischen Sedimentgesteine	354
23.2.5	Einteilung der Psephite und Psammite	356
23.2.6	Schwerminerale in Psammiten	357
23.2.7	Fluviatile und marine Seifen	357
23.2.8	Metallkonzentrationen in ariden Schuttwannen (Lagerstätten vom Red-Bed-Typ)	361
23.2.9	Einteilung der Pelite	361
23.2.10	Diagenese von Peliten	362
23.2.11	Buntmetall-Lagerstätten in Schwarzschiefern	363
23.2.12	Übergang von der Diagenese zur niedriggradigen Metamorphose	364

23.3	Chemische und biochemische Karbonatsedimente und -sedimentgesteine .....	364
23.3.1	Einteilung der Karbonatgesteine .....	364
23.3.2	Löslichkeit und Ausscheidungsbedingungen des $\text{CaCO}_3$ .....	365
23.3.3	Anorganische und biochemische Karbonat-Bildung im Meerwasser .....	366
23.3.4	Bildung festländischer (terrestrischer) Karbonatsedimente .....	367
23.3.5	Diagenese von Kalkstein .....	368
23.4	Eisen- und Mangan-reiche Sedimente .....	368
23.4.1	Ausfällung des Eisens und die Stabilitätsbedingungen der Fe-Minerale .....	368
23.4.2	Sedimentäre Eisenerze .....	369
23.4.3	Sedimentäre Manganerze .....	371
23.4.4	Metallkonzentrationen am Ozeanboden .....	371
23.5	Kieselige Sedimente und Sedimentgesteine .....	372
23.6	Sedimentäre Phosphatgesteine .....	373
23.7	Evaporite (Salzgesteine) .....	373
23.7.1	Kontinentale (terrestrische) Evaporite .....	373
23.7.2	Marine Evaporite .....	375
	Weiterführende Literatur .....	377
	Zitierte Literatur .....	378
<b>24</b>	<b>Metamorphe Gesteine .....</b>	<b>379</b>
24.1	Grundlagen .....	380
24.1.1	Metamorphe Prozesse .....	380
24.1.2	Ausgangsmaterial metamorpher Gesteine .....	381
24.1.3	Abgrenzung der Gesteinsmetamorphose .....	382
24.1.4	Auslösende Faktoren der Gesteinsmetamorphose .....	383
24.2	Die Gesteinsmetamorphose als geologischer Prozess .....	385
24.2.1	Kontaktmetamorphose .....	386
24.2.2	Kataklastische Metamorphose und Mylonitisierung .....	390
24.2.3	Schockwellen- oder Impakt-Metamorphose .....	391
24.2.4	Hydrothermale Metamorphose .....	394
24.2.5	Regionalmetamorphose in Orogenzonen .....	394
24.2.6	Regionale Versenkungsmetamorphose .....	399
24.2.7	Regionale Ozeanbodenmetamorphose .....	399
24.3	Nomenklatur der regional- und kontaktmetamorphen Gesteine .....	400
24.3.1	Regionalmetamorphe Gesteine .....	400
24.3.2	Kontaktmetamorphe Gesteine .....	406
24.4	Das Gefüge der metamorphen Gesteine .....	407
24.4.1	Gefügerelikte .....	407
24.4.2	Das kristalloblastische Gefüge .....	408
24.4.3	Gefügeregelung bei metamorphen Gesteinen .....	409
24.5	Bildung von Migmatiten durch partielle Anatexis .....	415
24.5.1	Der Migmatitbegriff .....	415
24.5.2	Experimentelle Grundlagen für die anatektische Bildung von Migmatiten .....	416
24.5.3	Stoffliche Bilanz bei der Entstehung von Migmatiten .....	417
24.6	Metasomatose .....	417
24.6.1	Kontaktmetasomatose .....	418
24.6.2	Autometasomatose .....	420
24.6.3	Spilite als Produkte einer Natrium-Metasomatose .....	421
	Weiterführende Literatur .....	421
	Zitierte Literatur .....	422



<b>25</b>	<b>Phasengleichgewichte und Mineralreaktionen in metamorphen Gesteinen</b>	425
25.1	Gleichgewichtsbeziehungen in metamorphen Gesteinen	426
25.1.1	Feststellung des thermodynamischen Gleichgewichts	426
25.1.2	Die Gibbs'sche Phasenregel	426
25.1.3	Die freie Enthalpie: Stabile und metastabile Niveaus	428
25.2	Metamorphe Mineralreaktionen	430
25.2.1	Polymorphe Umwandlungen und Reaktionen ohne Freisetzung einer fluiden Phase	430
25.2.2	Entwässerungsreaktionen	433
25.2.3	Dekarbonatisierungsreaktionen	438
25.2.4	Reaktionen, an denen H <sub>2</sub> O und CO <sub>2</sub> beteiligt sind	439
25.2.5	Oxidations-Reduktions-Reaktionen	441
25.2.6	Petrogenetische Netze	443
25.3	Geothermometrie und Geobarometrie	444
25.4	Druck-Temperatur-Entwicklung metamorpher Komplexe	446
25.4.1	Druck-Temperatur-Pfade	446
25.4.2	Druck-Temperatur-Zeit-Pfade	448
	Weiterführende Literatur	449
	Zitierte Literatur	449
<b>26</b>	<b>Metamorphe Mineralfazies</b>	451
26.1	Graphische Darstellung metamorpher Mineralparagenesen	452
26.1.1	ACF- und A'KF-Diagramme	452
26.1.2	AFM-Projektion	454
26.2	Das Faziesprinzip	457
26.2.1	Begründung des Faziesprinzips	457
26.2.2	Metamorphe Faziesserien	459
26.3	Übersicht über die metamorphen Fazies	460
26.3.1	Zeolith- und Prehnit-Pumpellyit-Fazies	460
26.3.2	Grünschieferfazies	460
26.3.3	Epidot-Amphibolit-Fazies	461
26.3.4	Amphibolitfazies	461
26.3.5	Granulitfazies	464
26.3.6	Hornfelsfazies	466
26.3.7	Sanidinitfazies	467
26.3.8	Blauschieferfazies	467
26.3.9	Eklogitfazies	469
	Weiterführende Literatur	472
	Zitierte Literatur	473
<b>Teil III</b>		
	<b>Stoffbestand und Bau von Erde und Mond – unser Planetensystem</b>	475
<b>27</b>	<b>Aufbau des Erdinnern</b>	477
27.1	Seismischer Befund zum Aufbau des Erdinnern	478
27.1.1	Physikalische Grundlagen	478
27.1.2	Ausbreitung von Erdbebenwellen im Erdinnern	479
27.1.3	Geschwindigkeitsverteilung der Erdbebenwellen im Erdinnern	480
27.2	Erdkruste	480
27.2.1	Ozeanische Erdkruste	481
27.2.2	Kontinentale Erdkruste	482
27.2.3	Die Erdkruste in jungen Orogengürteln	484
27.3	Erdmantel	484
27.3.1	Der oberste, lithosphärische Erdmantel und die Natur der Moho	484

27.3.2	Die Asthenosphäre als Förderband der Lithosphärenplatten	489
27.3.3	Übergangszone	490
27.3.4	Unterer Erdmantel	492
27.4	Erdkern	493
27.4.1	Geophysikalischer Befund	493
27.4.2	Chemische Zusammensetzung des Erdkerns	494
	Weiterführende Literatur	495
	Zitierte Literatur	495
<b>28</b>	<b>Aufbau und Stoffbestand des Mondes</b>	497
28.1	Die Kruste des Mondes	498
28.1.1	Hochlandregionen	498
28.1.2	Regionen der Maria	499
28.1.3	Minerale der Mondgesteine	500
28.1.4	Reste von Wasser im Regolith?	500
28.2	Innerer Aufbau des Mondes	501
28.3	Geologische Geschichte des Mondes	502
	Weiterführende Literatur	503
	Zitierte Literatur	503
<b>29</b>	<b>Meteorite</b>	505
29.1	Fallphänomene	506
29.2	Häufigkeit von Meteoriten	508
29.3	Haupttypen der Meteorite	508
29.3.1	Undifferenzierte Steinmeteorite: Chondrite	508
29.3.2	Differenzierte Steinmeteorite: Achondrite	513
29.3.3	Stein-Eisen-Meteorite (differenziert)	516
29.3.4	Eisenmeteorite (differenziert)	517
29.4	Tektite	519
	Weiterführende Literatur	520
	Zitierte Literatur	520
<b>30</b>	<b>Unser Planetensystem</b>	523
30.1	Die erdähnlichen Planeten	524
30.1.1	Merkur	524
30.1.2	Venus	526
30.1.3	Mars	529
30.2	Die Asteroiden	535
30.3	Die Riesenplaneten und ihre Satelliten	537
30.3.1	Astronomische Erforschung	537
30.3.2	Atmosphäre und innerer Bau der Riesenplaneten	538
30.3.3	Die Jupiter-Monde	539
30.3.4	Die Eismonde von Saturn, Uranus und Neptun	542
30.3.5	Die Ringsysteme der Riesenplaneten	545
30.4	Der Zwergplanet Pluto und sein Mond Charon: ein Doppelplanet	546
	Weiterführende Literatur	547
	Zitierte Literatur	548
<b>31</b>	<b>Einführung in die Geochemie</b>	549
31.1	Geochemische Gliederung der Elemente	550
31.2	Chemische Zusammensetzung der Gesamterde	552
31.3	Chemische Zusammensetzung der Erdkruste	554
31.3.1	Berechnungen des Krustenmittels: Clarke-Werte	554
31.3.2	Seltene Elemente und Konzentrations-Clarques	556
31.4	Spurenelement-Geochemie magmatischer Prozesse	557

31.4.1	Grundlagen	557
31.4.2	Spurenelement-Fraktionierungen bei der Bildung und Differentiation von Magmen	559
31.4.3	Spurenelemente als Indikatoren für die geotektonische Position von magmatischen Prozessen	563
31.5	Isotopen-Geochemie	564
31.5.1	Einführung	564
31.5.2	Stabile Isotope	565
31.5.3	Einsatz radiogener Isotope in der Geochronologie	569
31.6	Entstehung der chemischen Elemente	577
	Weiterführende Literatur	578
	Zitierte Literatur	579
<b>32</b>	<b>Die Entstehung unseres Sonnensystems</b>	<b>581</b>
32.1	Frühe Theorien und erste Belege	582
32.2	Sternentstehung	582
32.3	Zusammensetzung des Solarnebels	583
32.4	Entstehung der Planeten	585
	Weiterführende Literatur	589
	Zitierte Literatur	590
	<b>Anhang</b>	<b>591</b>
A.1	Übersicht wichtiger Ionenradien und der Ionenkoordination gegenüber $O^{2-}$	591
A.2	Berechnung von Mineralformeln	591
A.3	Lernschema der subalkalinen Magmatite und der Alkali-Magmatite	594
	Literatur	595
	Abdruckgenehmigungen	596
	<b>Index</b>	<b>597</b>