

Martin Okrusch
Siegfried Matthes

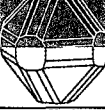
Mineralogie

Eine Einführung in die spezielle Mineralogie,
Petrologie und Lagerstättenkunde

7., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage

Mit 328 Abbildungen, davon 33 in Farbe

 Springer



Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Grundbegriffe	1
1.1	Minerale	2
1.2	Kristalle	4
1.3	Mineralarten und Mineralvarietäten	10
1.4	Vorkommen der Minerale, speziell als Bestandteile der Erdkruste	11
1.5	Gesteine	12
1.5.1	Mineralinhalt	12
1.5.2	Beziehungen zwischen chemischer Zusammensetzung und Mineralinhalt: Heteromorphie von Gesteinen	12
1.5.3	Gefüge	13
1.5.4	Geologischer Verband	14
1.6	Mineral- und Erzlagerstätten	14
1.7	Abgrenzung der gesteinsbildenden Vorgänge	14
1.8	Mineralogische Wissenschaften und ihre Anwendungsgebiete in Technik, Industrie und Bergbau	15
1.9	Bestimmung von Mineralen mit einfachen Hilfsmitteln	16
	Weiterführende Literatur	16
	Nachschlagewerke	16
	Zitierte Literatur	16
Teil I		
	Spezielle Mineralogie – Eine Auswahl wichtiger Minerale	17
2	Elemente	19
2.1	Metalle	20
2.2	Metalloide (Halbmetalle)	24
2.3	Nichtmetalle	24
	Weiterführende Literatur	29
	Zitierte Literatur	29
3	Sulfide, Arsenide und komplexe Sulfide (Sulfosalze)	31
3.1	Metall-Sulfide mit $M:S > 1:1$ (meist 2:1)	32
3.2	Metall-Sulfide und -Arsenide mit $M:S \approx 1:1$	33
3.3	Metall-Sulfide, -Sulfarsenide und -Arsenide mit $M:S \leq 1:2$	37
3.4	Arsen-Sulfide	41
3.5	Komplexe Metall-Sulfide (Sulfosalze)	42
	Weiterführende Literatur	43
4	Halogenide	41
	Weiterführende Literatur	48

5	Oxide und Hydroxide	49
5.1	M ₂ O-Verbindungen	50
5.2	M ₃ O ₄ -Verbindungen	50
5.3	M ₂ O ₃ -Verbindungen	52
5.4	MO ₂ -Verbindungen	55
5.5	Hydroxide	58
	Weiterführende Literatur	59
	Zitierte Literatur	59
6	Karbonate	61
6.1	Calcit-Gruppe, $\bar{3}2/m$	62
6.2	Aragonit-Gruppe, 2/m2/m2/m	65
6.3	Dolomit-Gruppe	66
6.4	Azurit-Malachit-Gruppe	67
	Weiterführende Literatur	68
	Zitierte Literatur	68
7	Sulfate, Chromate, Molybdate, Wolframate	69
7.1	Sulfate	70
7.2	Chromate	72
7.3	Molybdate und Wolframate	72
	Weiterführende Literatur	73
	Zitierte Literatur	73
8	Phosphate, Arsenate, Vanadate	75
	Weiterführende Literatur	78
	Zitierte Literatur	78
9	Silikate	79
9.1	Inselsilikate (Nesosilikate)	81
9.2	Gruppensilikate (Sorosilikate)	87
9.3	Ringsilikate (Cyclosilikate)	89
9.4	Ketten- und Doppelkettensilikate (Inosilikate)	92
	9.4.1 Pyroxen-Familie	93
	9.4.2 Pyroxenoide	96
	9.4.3 Amphibol-Familie	97
9.5	Schichtsilikate (Phyllosilikate)	99
	9.5.1 Pyrophyllit-Talk-Gruppe	101
	9.5.2 Glimmer-Gruppe	102
	9.5.3 Hydroglimmer-Gruppe	104
	9.5.4 Sprödglimmer-Gruppe	104
	9.5.5 Chlorit-Gruppe	104
	9.5.6 Serpentin-Gruppe	105
	9.5.7 Tonmineral-Gruppe	106
9.6	Gerüstsilikate (Tektosilikate)	108
	9.6.1 SiO ₂ -Minerale	109
	9.6.2 Feldspat-Familie	116
	9.6.3 Feldspatoide (Foide, Feldspatvertreter)	123
	9.6.4 Skapolith-Gruppe	125
	9.6.5 Zeolith-Familie	125
	Weiterführende Literatur	128
10	Flüssigkeitseinschlüsse in Mineralen	131
	Weiterführende Literatur	134
	Zitierte Literatur	134

Teil II	
Petrologie und Lagerstättenkunde	135
11 Magmatische Gesteine (Magmatite)	137
11.1 Einteilung und Klassifikation der magmatischen Gesteine	138
11.1.1 Zuordnung nach der geologischen Stellung und dem Gefüge	138
11.1.2 Klassifikation nach dem Mineralbestand	139
11.1.3 Chemismus und CIPW-Norm	142
11.2 Petrographie der Magmatite	145
11.2.1 Subalkaline Magmatite	145
11.2.2 Alkali-Magmatite	154
11.2.3 Karbonatite, Kimberlite und Lamproite	157
Weiterführende Literatur	159
Zitierte Literatur	160
12 Vulkanismus	161
12.1 Effusive Förderung: Lavaströme	163
12.2 Extrusive Förderung	165
12.3 Explosive Förderung	166
12.4 Gemischte Vulkanförderung: Stratovulkane	170
12.5 Vulkanische Dampf-tätigkeit	170
Weiterführende Literatur	172
Zitierte Literatur	172
13 Plutonismus	173
13.1 Die Tiefenfortsetzung von Vulkanen	174
13.2 Formen plutonischer und subvulkanischer Intrusivkörper	174
13.3 Innerer Aufbau und Platznahme von Plutonen	176
13.3.1 Interngefüge von Plutonen	176
13.3.2 Mechanismen der Platznahme	176
13.3.3 Layered Intrusions	177
Weiterführende Literatur	178
Zitierte Literatur	178
14 Magma und Lava	179
14.1 Chemische Zusammensetzung und Struktur magmatischer Schmelzen	180
14.2 Vulkanische Gase	180
14.3 Magmatische Temperaturen	181
14.3.1 Direkte Messungen	181
14.3.2 Schmelzversuche an natürlichen Gesteinen	181
14.4 Viskosität von Magmen und Laven	182
14.5 Löslichkeit von leichtflüchtigen Komponenten im Magma	183
Weiterführende Literatur	184
Zitierte Literatur	184
15 Bildung und Weiterentwicklung von Magmen	187
15.1 Magmatische Serien	188
15.2 Bildung von Stamm-Magmen	189
15.2.1 Basaltische Stamm-Magmen	189
15.2.2 Granitische Magmen	189
15.3 Magmenmischung	190
15.4 Magmatische Differentiation	190
15.4.1 Kristallisationsdifferentiation	190
15.4.2 Entmischung im schmelzflüssigen Zustand (liquide Entmischung)	192

15.5	Assimilation	193
	Weiterführende Literatur	193
	Zitierte Literatur	193
16	Experimentelle Modellsysteme	195
16.1	Die Gibbs'sche Phasenregel	196
16.2	Experimente in Zweistoff- und Dreistoffsystemen	197
16.2.1	Experimente zur Kristallisationsabfolge basaltischer Magmen	197
16.2.2	Experimente zur Bildung SiO ₂ -übersättigter und SiO ₂ -untersättigter Magmen	203
16.2.3	Experimente zum Verhalten von Mafiten in basaltischen Magmen	209
16.3	Das Reaktionsprinzip von Bowen	213
16.4	Das Basalt-Tetraeder von Yoder und Tilley (1962)	215
16.5	Gleichgewichtsschmelzen und fraktioniertes Schmelzen	216
	Weiterführende Literatur	218
	Zitierte Literatur	218
17	Die Herkunft des Basalts	219
17.1	Basalte und Plattentektonik	220
17.2	Bildung von Basalt-Magmen durch partielles Schmelzen von Mantelperidotit	221
17.2.1	Das Pyrolit-Modell	221
17.2.2	Partielles Schmelzen von H ₂ O-freiem Pyrolit	221
17.2.3	Partielles Schmelzen von H ₂ O-haltigem Pyrolit	222
	Weiterführende Literatur	224
	Zitierte Literatur	224
18	Die Herkunft des Granits	225
18.1	Genetische Einteilung der Granite auf geochemischer Basis	226
18.2	Experimente zur Granitgenese	227
18.2.1	Einführung	227
18.2.2	Kristallisationsverlauf granitischer Magmen: Experimente im H ₂ O-gesättigten Modellsystem Qz-Ab-Or-H ₂ O	227
18.2.3	Experimentelle Anatexis: Experimente unter H ₂ O-gesättigten und H ₂ O-untersättigten Bedingungen im Modellsystem Qz-Ab-Or-H ₂ O	230
18.2.4	Das Modellsystem Qz-Ab-An-Or-H ₂ O	233
18.2.5	Das Modellsystem Qz-Ab-An-H ₂ O	234
18.2.6	Das natürliche Granitsystem	234
	Weiterführende Literatur	235
	Zitierte Literatur	235
19	Orthomagmatische Erzlagerstätten	237
19.1	Einführung	238
19.2	Lagerstättenbildung durch fraktionierte Kristallisation	238
19.2.1	Chromit- und Chromit-PGE-Lagerstätten	240
19.2.2	Fe-Ti-Oxid-Lagerstätten	241
19.3	Lagerstättenbildung durch liquide Entmischung von Sulfid- und Oxid-Schmelzen	242
19.3.1	Nickelmagnetkies-Kupferkies-PGE-Lagerstätten in Noriten und Pyroxeniten	242
19.3.2	Nickelmagnetkies-Kupferkies-Lagerstätten in Komatiiten	243
19.3.3	Magnetit-Apatit-Lagerstätten	244
19.4	Erz- und Mineral-Lagerstätten in Karbonatit-Alkalimagmatit-Komplexen	244
	Weiterführende Literatur	244
	Zitierte Literatur	245

20	Pegmatite	247
20.1	Theoretische Überlegungen	248
20.2	Geologisches Auftreten und Petrographie von Pegmatiten	249
20.3	Pegmatite als Rohstoffträger	250
	Weiterführende Literatur	251
	Zitierte Literatur	252
21	Hydrothermale Erz- und Minerallagerstätten	253
21.1	Grundlagen	254
21.2	Hydrothermale Imprägnationslagerstätten	255
	21.2.1 Zinnerz-Lagerstätten	255
	21.2.2 Wolfram-Lagerstätten	257
	21.2.3 Molybdän-Lagerstätten	257
	21.2.4 Porphyry Copper Ores	257
	21.2.5 Imprägnationen mit ged. Kupfer (Typus Oberer See)	259
21.3	Hydrothermale Verdrängungslagerstätten	259
	21.3.1 Skarnierz-Lagerstätten	259
	21.3.2 Mesothermale Kupfer-Arsen-Verdrängungs-Lagerstätten	260
	21.3.3 Hydrothermale Blei-Silber-Zink-Verdrängungslagerstätten	260
	21.3.4 Metasomatische Siderit-Lagerstätten	261
	21.3.5 Metasomatische Magnesit-Lagerstätten	261
21.4	Hydrothermale Erz- und Mineralgänge	261
	21.4.1 Orogene Gold-Quarz-Gänge	262
	21.4.2 Epithermale Gold- und Gold-Silber-Lagerstätten (subvulkanisch)	263
	21.4.3 Mesothermale Kupfererzgänge	263
	21.4.4 Blei-Silber-Zink-Erzgänge	264
	21.4.5 Zinn-Silber-Wismut-Erzgänge des bolivianischen Zinngürtels	265
	21.4.6 Wismut-Kobalt-Nickel-Silber-Uran-Erzgänge	265
	21.4.7 Telethermale Antimon-Quarz-Gänge	266
	21.4.8 Hydrothermale Siderit- und Hämatit-Erzgänge	266
	21.4.9 Nichtmetallische hydrothermale Ganglagerstätten	267
	21.4.10 Quarzgänge und hydrothermale VerkieSELungen	267
	21.4.11 Alpine Klüfte	267
21.5	Vulkanogen-sedimentäre Erzlagerstätten	267
	21.5.1 Rezente hydrothermale Erzbildung in der Tiefsee: Black Smoker	267
	21.5.2 Vulkanogene massive Sulfiderz-Lagerstätten (VMS-Lagerstätten)	270
	21.5.3 Sedimentär-exhalative Blei-Zink-Erzlagerstätten (Sedex-Lagerstätten)	271
	21.5.4 Vulkanogen-sedimentäre Quecksilbererz-Lagerstätten	271
	21.5.5 Vulkanogene Oxiderz-Lagerstätten	272
	Weiterführende Literatur	272
	Zitierte Literatur	272
22	Verwitterung und mineralbildende Vorgänge im Boden	275
22.1	Mechanische Verwitterung	276
22.2	Chemische Verwitterung	276
	22.2.1 Leicht lösliche Minerale	277
	22.2.2 Verwitterung der Silikate	277
22.3	Subaerische Verwitterung und Klimazonen	279
22.4	Zur Abgrenzung des Begriffs Boden	279
22.5	Verwitterungsbildungen von Silikatgesteinen und ihre Lagerstätten	279
	22.5.1 Residualtone und Kaolin	279
	22.5.2 Bentonit	280
	22.5.3 Bauxit	280
	22.5.4 Fe- und Mn-reiche Laterite	280
	22.5.5 Ni-reiche Laterite	281

22.5.6	Weitere Residual-Lagerstätten	281
22.6	Verwitterung sulfidischer Erzkörper	281
22.6.1	Oxidationszone	282
22.6.2	Zementationszone	283
22.6.3	Stabilitätsbeziehungen wichtiger Kupferminerale bei der Verwitterung	283
	Weiterführende Literatur	284
	Zitierte Literatur	284
23	Sedimente und Sedimentgesteine	285
23.1	Grundlagen	286
23.1.1	Einteilung der Sedimente und Sedimentgesteine	286
23.1.2	Gefüge der Sedimente und Sedimentgesteine	286
23.2	Klastische Sedimente und Sedimentgesteine	287
23.2.1	Transport und Ablagerung des klastischen Materials	287
23.2.2	Chemische Veränderungen während des Transports	287
23.2.3	Korngrößenverteilung bei klastischen Sedimenten und ihre Darstellung	288
23.2.4	Diagenese der klastischen Sedimentgesteine	288
23.2.5	Einteilung der Psephite und Psammite	290
23.2.6	Schwerminerale in Psammiten	291
23.2.7	Fluviatile und marine Seifen	291
23.2.8	Metallkonzentrationen in ariden Schuttwannen (Lagerstätten vom Red-Bed-Typ)	293
23.2.9	Einteilung der Pelite	294
23.2.10	Diagenese von Peliten	295
23.2.11	Erzlagerstätten in Schwarzschiefern	296
23.2.12	Übergang von der Diagenese zur niedriggradigen Metamorphose	296
23.3	Chemische und biochemische Karbonatsedimente und -sedimentgesteine	296
23.3.1	Einteilung der Karbonatgesteine	297
23.3.2	Löslichkeit und Ausscheidungsbedingungen des CaCO_3	298
23.3.3	Anorganische und biochemische Karbonat-Bildung im Meerwasser	298
23.3.4	Bildung festländischer (terrestrischer) Karbonatsedimente	300
23.3.5	Diagenese von Kalkstein	300
23.3.6	Karbonat-gebundene Erz- und Minerallagerstätten	300
23.4	Eisen- und Mangan-reiche Sedimente und Sedimentgesteine	301
23.4.1	Ausfällung des Eisens und die Stabilitätsbedingungen der Fe-Minerale	301
23.4.2	Sedimentäre Eisenerze	302
23.4.3	Sedimentäre Manganerze	303
23.4.4	Metallkonzentrationen am Ozeanboden	304
23.5	Kieselige Sedimente und Sedimentgesteine	304
23.6	Sedimentäre Phosphatgesteine	305
23.7	Evaporite (Salzgesteine)	305
23.7.1	Kontinentale (terrestrische) Evaporite	305
23.7.2	Marine Evaporite	307
	Weiterführende Literatur	309
	Zitierte Literatur	310
24	Metamorphe Gesteine	311
24.1	Grundlagen	312
24.1.1	Metamorphe Prozesse	312
24.1.2	Ausgangsmaterial metamorpher Gesteine	313
24.1.3	Abgrenzung der Gesteinsmetamorphose	314

24.1.4	Auslösende Faktoren der Gesteinsmetamorphose	315
24.2	Die Gesteinsmetamorphose als geologischer Prozess	317
24.2.1	Kontaktmetamorphose	318
24.2.2	Kataklastische Metamorphose und Mylonitisierung	322
24.2.3	Schockwellen- oder Impakt-Metamorphose	323
24.2.4	Hydrothermale Metamorphose	326
24.2.5	Regionalmetamorphose in Orogenzonen	326
24.2.6	Regionale Versenkungsmetamorphose	331
24.2.7	Regionale Ozeanbodenmetamorphose	331
24.3	Nomenklatur der regional- und kontaktmetamorphen Gesteine	332
24.3.1	Regionalmetamorphe Gesteine	332
24.3.2	Kontaktmetamorphe Gesteine	337
24.4	Das Gefüge der metamorphen Gesteine	338
24.4.1	Gefügerelikte	339
24.4.2	Das kristalloblastische Gefüge	339
24.4.3	Gefügeregelung bei metamorphen Gesteinen	341
24.5	Bildung von Migmatiten durch partielle Anatexis	345
24.5.1	Der Migmatitbegriff	347
24.5.2	Experimentelle Grundlagen für die anatektische Bildung von Migmatiten	347
24.5.3	Stoffliche Bilanz bei der Entstehung von Migmatiten	348
24.6	Metasomatose	349
24.6.1	Kontaktmetasomatose	350
24.6.2	Autometasomatose	352
24.6.3	Spilite als Produkte einer Natrium-Metasomatose	352
	Weiterführende Literatur	353
	Zitierte Literatur	353
25	Phasengleichgewichte und Mineralreaktionen in metamorphen Gesteinen	355
25.1	Gleichgewichtsbeziehungen in metamorphen Gesteinen	356
25.1.1	Feststellung des thermodynamischen Gleichgewichts	356
25.1.2	Die Gibbs'sche Phasenregel	356
25.1.3	Die freie Enthalpie: Stabile und metastabile Niveaus	358
25.2	Metamorphe Mineralreaktionen	360
25.2.1	Polymorphe Umwandlungen und Reaktionen ohne Freisetzung einer fluiden Phase	360
25.2.2	Entwässerungsreaktionen	363
25.2.3	Dekarbonatisierungsreaktionen	368
25.2.4	Reaktionen, an denen H_2O und CO_2 beteiligt sind	369
25.2.5	Oxidations-Reduktions-Reaktionen	371
25.2.6	Petrogenetische Netze	373
25.3	Geothermometrie und Geobarometrie	374
25.4	Druck-Temperatur-Entwicklung metamorpher Komplexe	376
25.4.1	Druck-Temperatur-Pfade	376
25.4.2	Druck-Temperatur-Zeit-Pfade	378
	Weiterführende Literatur	379
	Zitierte Literatur	379
26	Metamorphe Mineralfazies	381
26.1	Graphische Darstellung metamorpher Mineralparagenesen	382
26.1.1	ACF- und $A'KF$ -Diagramme	382
26.1.2	AFM-Projektion	384
26.2	Das Faziesprinzip	387
26.2.1	Begründung des Faziesprinzips	387
26.2.2	Metamorphe Faziesserien	389

26.3	Übersicht über die metamorphen Fazies	390
26.3.1	Zeolith- und Prehnit-Pumpellyit-Fazies	390
26.3.2	Grünschieferfazies	390
26.3.3	Epidot-Amphibolit-Fazies	391
26.3.4	Amphibolitfazies	391
26.3.5	Granulitfazies	394
26.3.6	Hornfelsfazies	396
26.3.7	Sanidinitfazies	397
26.3.8	Blauschieferfazies	397
26.3.9	Eklogitfazies	399
	Weiterführende Literatur	402
	Zitierte Literatur	402

Teil III

Stoffbestand und Bau der Erde und des Mondes

27	Aufbau des Erdinnern	407
27.1	Seismischer Befund zum Aufbau des Erdinnern	408
27.1.1	Physikalische Grundlagen	408
27.1.2	Ausbreitung von Erdbebenwellen im Erdinnern	409
27.1.3	Geschwindigkeitsverteilung der Erdbebenwellen im Erdinnern	410
27.2	Erdkruste	410
27.2.1	Ozeanische Erdkruste	411
27.2.2	Kontinentale Erdkruste	412
27.2.3	Die Erdkruste in jungen Orogengürteln	414
27.3	Erdmantel	414
27.3.1	Der oberste, lithosphärische Erdmantel und die Natur der Moho	414
27.3.2	Die Asthenosphäre als Förderband der Lithosphärenplatten	419
27.3.3	Übergangszone	420
27.3.4	Unterer Erdmantel	422
27.4	Erdkern	422
27.4.1	Geophysikalischer Befund	422
27.4.2	Chemische Zusammensetzung des Erdkerns	423
	Weiterführende Literatur	424
	Zitierte Literatur	424
28	Aufbau und Stoffbestand des Mondes	427
28.1	Die Kruste des Mondes	428
28.1.1	Hochlandregionen	428
28.1.2	Regionen der Maria	428
28.1.3	Minerale der Mondgesteine	429
28.2	Innerer Aufbau des Mondes	429
28.3	Geologische Geschichte des Mondes	431
	Weiterführende Literatur	431
	Zitierte Literatur	432
29	Meteorite	433
29.1	Fallphänomene	434
29.2	Häufigkeit von Meteoriten	435
29.3	Haupttypen der Meteorite	437
29.3.1	Undifferenzierte Steinmeteorite: Chondrite	438
29.3.2	Differenzierte Steinmeteorite: Achondrite	440
29.3.3	Stein-Eisen-Meteorite (differenziert)	442
29.3.4	Eisenmeteorite (differenziert)	444

Weiterführende Literatur	446
Zitierte Literatur	446
30 Einführung in die Geochemie	447
30.1 Geochemische Gliederung der Elemente	448
30.2 Chemische Zusammensetzung der Gesamterde	450
30.3 Chemische Zusammensetzung der Erdkruste	452
30.3.1 Berechnungen des Krustenmittels: Clarke-Werte	452
30.3.2 Seltene Elemente und Konzentrations-Clarkes	454
30.4 Spurenelement-Geochemie magmatischer Prozesse	455
30.4.1 Grundlagen	455
30.4.2 Spurenelement-Fraktionierungen bei der Bildung und Differentiation von Magmen	457
30.4.3 Spurenelemente als Indikatoren für die geotektonische Position von magmatischen Prozessen	461
30.5 Isotopen-Geochemie	462
30.5.1 Einführung	462
30.5.2 Stabile Isotope	463
30.5.3 Einsatz radiogener Isotope in der Geochronologie	467
Weiterführende Literatur	475
Zitierte Literatur	475
Anhang	477
A.1 Übersicht wichtiger Ionenradien und der Ionenkoordination gegenüber O^{2-}	477
A.2 Berechnung von Mineralformeln	477
A.3 Lernschema der subalkalinen Magmatite und der Alkali-Magmatite	479
Literatur	481
Abdruckgenehmigungen	482
Index	483