

Inhalt

Vorwort zur 6. Auflage — V

Dietrich Gudat

1	Anorganische Molekülchemie — 1
1.1	Methodische Grundlagen — 2
1.1.1	Arbeitstechniken — 2
1.1.2	Charakterisierungsmethoden — 5
1.1.3	Grundlagen quantenchemischer Methoden — 9
1.1.3.1	Wellenfunktionen und Dichtefunktionale — 9
1.1.3.2	Interpretation von Wellenfunktionen und Elektronendichteverteilungen — 12
1.2	Grundlegende Aspekte von Struktur und Reaktivität — 15
1.2.1	Elementare Trends – Die Sonderstellung der Elemente der 2. Periode — 15
1.2.2	Geometrische Struktur von Molekülen — 19
1.2.3	Intermolekulare Wechselwirkungen und Reaktivität — 20
1.2.4	Mehrzentrenbindungen — 24
1.2.4.1	Energetische und strukturelle Aspekte von Dreizentrenbindungen — 25
1.2.4.2	Hyperkoordinierte Verbindungen mit 4e-3z-Bindungen — 28
1.2.4.3	Elektronenmangelverbindungen und 2e-3z-Bindungen — 32
1.2.5	Reaktionsmechanismen — 34
1.2.6	Kinetische Stabilisierung — 36
1.2.7	Moleküle mit geometrisch beschränkter Struktur — 41
1.3	Molekülgerüste: Ketten, Ringe, Polycyclen, Käfige — 45
1.3.1	Molekulare Silikate und Silikatanaloga — 46
1.3.1.1	Silsesquioxane — 47
1.3.1.2	Molekulare Modelle für Silikatoberflächen — 50
1.3.1.3	Heterosubstituierte Silsesquioxane — 52
1.3.2	Element-Modifikationen: Sauerstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwefel — 54
1.3.2.1	Stickstoff — 54
1.3.2.2	Sauerstoff — 57
1.3.2.3	Phosphor — 59
1.3.2.4	Schwefel — 64
1.3.3	Aktivierung von Element-Element-Bindungen und Gerüstumwandlungen — 67
1.3.3.1	Nukleophile Aktivierung und polyatomare Anionen — 67
1.3.3.2	Elektrophile Aktivierung und polyatomare Kationen — 71
1.3.3.3	Aktivierung durch Ambiphile — 76
1.3.4	Gerüststrukturen aus Gruppe-14-Elementen: Oligo- und Polysilane — 78
1.4	Subvalente Verbindungen — 85
1.4.1	Carbenanaloga — 85

1.4.1.1	Elektronische Zustände von Carbenanaloga —	87
1.4.1.2	Stabilität und nukleophiler bzw. elektrophiler Charakter von Carben- und Nitrenanaloga —	90
1.4.1.3	Synthese von Carbenanaloga —	96
1.4.1.4	Chemische Reaktivität von Carbenanaloga —	99
1.4.2	Borylene und deren Homologe —	104
1.4.3	Radikale —	108
1.4.3.1	Persistente und stabile neutrale Monoradikale mit Hauptgruppenelementen —	108
1.4.3.2	Dreielektronenbindungen —	111
1.4.3.3	Diradikale und Diradikaloide —	113
1.5	Mehrfachbindungssysteme —	117
1.5.1	Klassische und nichtklassische isolierte Doppelbindungen —	117
1.5.2	Dreifachbindungen —	121
1.5.3	Konjugierte und aromatische π -Systeme —	125
1.6	Elektronenreiche Verbindungen —	129
1.6.1	Edelgasverbindungen —	130
1.6.2	Ylide —	136
1.7	Clusterverbindungen mit Elektronenmangel —	144
1.7.1	Deltaedrische Polyborane —	144
1.7.1.1	Bindungsverhältnisse —	144
1.7.2	Heteroborane —	150
1.8	Moderne Aspekte von Säure-Base- und Wasserstoffchemie —	153
1.8.1	Supersäuren —	153
1.8.1.1	Protonendonorstärken und Aciditätsskalen —	153
1.8.1.2	Chemie ausgewählter Supersäuren —	157
1.8.1.3	Anwendungen von Supersäuren —	159
1.8.1.4	Kationische Lewis-Säuren und schwach koordinierende Anionen —	161
1.8.2	Lewis-Säure/Base-Komplexe —	164
1.8.2.1	Donor-Akzeptor-Komplexe und dative Bindungen —	164
1.8.2.2	Synthese von Donor-Akzeptor-Komplexen —	167
1.8.2.3	Reaktionen funktionalisierter Lewispaare unter Erhalt der dativen Bindung —	169
1.8.2.4	Amin-Boran-Addukte: Neues Interesse an alten Molekülen —	171
1.8.3	Frustrierte Lewispaare und die metallfreie Aktivierung von H_2 und CO_2 —	175

Hans-Jürgen Meyer

2	Festkörperchemie —	183
2.1	Festkörperreaktionen —	184
2.1.1	Reaktionsbehälter —	186
2.1.2	Fest-fest-Reaktionen —	187

2.1.3	Reaktionen in Schmelzen —	189
2.1.3.1	Ionische Flüssigkeiten —	191
2.1.4	Chemische Transportreaktionen —	191
2.1.5	Reaktionen bei „tiefen“ Temperaturen —	195
2.1.6	Modifizierung von Feststoffen —	196
2.1.6.1	Interkalation —	197
2.1.6.2	Ionenaustausch —	198
2.1.7	Reaktionen bei hohen Drücken —	199
2.1.7.1	Reaktive Gase —	199
2.1.7.2	Solvothermalsynthesen —	200
2.1.7.3	Fest-fest-Reaktionen bei hohen Drücken —	202
2.2	Kristallstrukturen —	204
2.2.1	Dichteste Packungen von Atomen —	204
2.2.2	Lückenbesetzungen in dichtest gepackten Strukturen —	207
2.2.3	Beschreibung wichtiger Strukturtypen —	207
2.2.3.1	Natriumchlorid-Struktur —	207
2.2.3.2	Caesiumchlorid-Struktur —	207
2.2.3.3	Nioboxid-Struktur —	208
2.2.3.4	Nickelarsenid-Struktur —	209
2.2.3.5	Wolframcarbid-Struktur —	209
2.2.3.6	Kubische Zinksulfid-Struktur (Zinkblende) —	209
2.2.3.7	Hexagonale Zinksulfid-Struktur (Wurtzit) —	209
2.2.3.8	Calciumfluorid-Struktur (Fluorit) —	210
2.2.3.9	Titandioxid-Struktur (Rutil) —	210
2.2.3.10	β -Cristobalit-Struktur —	211
2.2.3.11	Cuprit-Struktur —	211
2.2.3.12	Cadmiumiodid-Struktur —	212
2.2.3.13	Cadmiumchlorid-Struktur —	213
2.2.3.14	Beschreibung von Schichtstrukturen —	213
2.2.4	Vorhersagen von Kristallstrukturen —	214
2.2.5	Kristallstrukturanalyse und kristallographische Datenbanken —	215
2.3	Nanochemie —	216
2.3.1	Der Schmelzpunkt von Nanoteilchen —	218
2.3.2	Die elektrische Leitfähigkeit von Nanoteilchen —	219
2.3.3	Der Magnetismus von Nanoteilchen —	219
2.3.4	Die optischen Eigenschaften von Nanoteilchen —	220
2.3.5	Oberflächenchemie und Katalyse —	221
2.3.6	Synthesen von Nanoteilchen —	222
2.3.7	Gesundheitliche Risiken von Nanoteilchen —	223
2.4	Kristalldefekte —	223
2.4.1	Rotationen —	224
2.4.2	Versetzungen —	224

2.4.3	Punktdefekte nach Schottky und Frenkel —	224
2.4.4	Farbzentren —	225
2.4.5	Platztausch von Atomen (Ordnungs-Unordnungs-Vorgänge) —	226
2.4.6	Fehlordnung über Leerstellen —	228
2.4.7	Phasenwechselmaterialien als Speichermedien —	229
2.4.8	Nicht stöchiometrische Phasen —	231
2.4.9	Feste Lösungen, Dotierung und transparente Leiter —	231
2.4.10	Scherstrukturen —	233
2.5	Elektrochemische Zellen —	235
2.5.1	Messung von Sauerstoff-Partialdrücken —	235
2.5.2	Brennstoffzellen —	236
2.5.3	Batterien —	237
2.5.4	Wiederaufladbare Lithiumbatterien —	238
2.5.4.1	Elektrolyte für Lithiumbatterien —	239
2.5.4.2	Anodenmaterialien für Lithiumbatterien —	240
2.5.4.3	Kathodenmaterialien für Lithiumbatterien —	241
2.5.4.4	Wichtige Lithiumakkumulatoren —	241
2.5.5	Die Nickel-Metallhydrid-Batterie —	242
2.6	Solarzellen —	243
2.6.1	Solarzellen der ersten Generation (Si-Solarzellen) —	243
2.6.2	Solarzellen der zweiten Generation (Dünnschichttechnologie) —	244
2.6.3	Solarzellen der dritten Generation (Heteroübergang-Solarzellen) —	244
2.6.4	Farbstoffsensibilisierte Solarzellen —	245
2.6.5	Perowskit-Solarzellen —	246
2.7	Elektronische Strukturen fester Stoffe —	247
2.7.1	Die lineare Anordnung von Wasserstoffatomen —	249
2.7.2	Die Peierls-Verzerrung einer linearen Anordnung von H-Atomen —	252
2.7.3	Bandstrukturen in drei Dimensionen – Brillouin-Zonen —	253
2.7.4	Beispiele für Bandstrukturen —	255
2.7.4.1	Die Bandstruktur der $[\text{Pt}(\text{CN})_4]$ -Säulen in der Struktur von $\text{K}_2[\text{Pt}(\text{CN})_4] \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ —	255
2.7.4.2	Die Bandstruktur von ReO_3 – ein dreidimensionales d^1 -Metall —	258
2.7.4.3	Die Bandstruktur von MoS_2 – ein d^2 -Halbleiter —	259
2.7.4.4	Die Bandstruktur von LaI_2 – ein d^1 -Metall —	261
2.7.5	Metall-Metall-Bindungen —	263
2.7.6	Peierls-Verzerrung und Ladungsdichtewelle —	264
2.8	Magnetische Eigenschaften von Feststoffen —	265
2.8.1	Diamagnetismus —	267
2.8.2	Paramagnetismus —	267
2.8.3	Kooperative Eigenschaften —	272
2.8.4	Ferromagnetische Ordnung —	273
2.8.5	Magnetische Kopplungsmechanismen —	274

2.8.6	Antiferromagnetische Ordnung —	275
2.8.7	Paramagnetismus der Leitungselektronen (Pauli-Paramagnetismus) —	275
2.9	Der metallische Zustand —	276
2.9.1	Metalle —	276
2.9.2	Intermetallische Systeme —	278
2.9.3	Legierungen —	279
2.9.4	Intermetallische Verbindungen mit Formgedächtnis —	280
2.9.5	Hume-Rothery-Phasen —	281
2.9.6	Laves-Phasen —	283
2.9.7	Zintl-Phasen —	284
2.9.7.1	Die Synthese von Zintl-Phasen —	285
2.9.7.2	Beispiele für Zintl-Phasen —	286
2.9.7.3	Salzartige Zintl-Phasen mit isolierten Anionen —	286
2.9.7.4	Zintl-Phasen mit polyatomaren Anionen —	287
2.9.7.5	Zintl-Ionen, die Käfigstrukturen bilden —	289
2.9.7.6	Zintl-Phasen-Hydride —	291
2.9.7.7	Eigenschaften von Zintl-Phasen —	291
2.9.8	Heusler-Phasen und Skutterudite —	292
2.9.9	Thermoelektrizität —	293
2.10	Verbindungen der Metalle —	295
2.10.1	Metallhydride —	295
2.10.1.1	Salzartige Metallhydride —	295
2.10.1.2	Kovalente Metallhydride —	296
2.10.1.3	Metallartige Metallhydride —	296
2.10.1.4	Ternäre Metallhydride —	299
2.10.1.5	Metallhydridspeicher —	302
2.10.2	Metallboride —	304
2.10.2.1	Synthese von Metallboriden —	304
2.10.2.2	Strukturen der Metallboride —	305
2.10.2.3	Bor-Bor-Bindungen in Metallboriden —	309
2.10.2.4	Eigenschaften von Metallboriden —	309
2.10.3	Metallcarbide und Graphen —	310
2.10.3.1	Synthese von Metallcarbiden —	312
2.10.3.2	Salzartige Metallcarbide —	313
2.10.3.3	Metallcarbide der Übergangsmetalle —	315
2.10.3.4	Metallcarbide der Seltenerdmetalle und einiger 5f-Elemente —	316
2.10.3.5	Ternäre Metallcarbide —	317
2.10.3.6	Eigenschaften von Metallcarbiden —	319
2.10.4	Metallnitride —	320
2.10.4.1	Synthese von Metallnitriden —	321
2.10.4.2	Salzartige und metallische Metallnitride der Alkali- und Erdalkalimetalle —	322

2.10.4.3	Kovalente Metallnitride und Elektrolumineszenz —	324
2.10.4.4	Metallnitride der Übergangsmetalle —	325
2.10.4.5	Ternäre Metallnitride und Nitridometallate —	325
2.10.4.6	Eigenschaften von Metallnitriden —	326
2.10.4.7	Metallnitride der Seltenerdmetalle und 5f-Elemente —	327
2.10.4.8	Nitridische Verbindungen —	328
2.10.5	Metalloxide —	329
2.10.5.1	Sauerstoffverbindungen der Alkalimetalle —	330
2.10.5.2	Oxide der Erdalkalimetalle und des Aluminiums —	332
2.10.5.3	Binäre Metalloxide der Übergangsmetalle —	332
2.10.5.4	Ternäre Metalloxide und Oxometallate —	344
2.10.5.5	Metallreiche Oxometallate – Metallcluster —	345
2.10.5.6	Perowskite —	348
2.10.5.7	Wolframoxide und Oxidbronzen —	350
2.10.5.8	Spinelle —	351
2.10.5.9	Magnetoplumbit —	355
2.10.5.10	Granate —	356
2.10.5.11	Synthesen von Metalloxiden über wässrige Lösungen, Sol-Gel-Synthese von YAG —	357
2.10.5.12	Leuchtstoffe —	359
2.10.5.13	Supraleitfähigkeit —	362
2.10.5.14	Oxide der Seltenerdmetalle —	370
2.10.6	Metallsulfide —	372
2.10.6.1	Schwefelreiche Metallsulfide —	373
2.10.6.2	Trisulfide —	373
2.10.6.3	Disulfide —	373
2.10.6.4	Monosulfide —	378
2.10.6.5	Metallreiche Metallsulfide —	379
2.10.6.6	Ternäre Metallsulfide der Übergangsmetalle —	382
2.10.6.7	Sulfide der Seltenerdmetalle —	383
2.10.7	Metallfluoride —	384
2.10.7.1	Heptafluoride —	386
2.10.7.2	Hexafluoride —	386
2.10.7.3	Pentafluoride —	387
2.10.7.4	Tetrafluoride —	388
2.10.7.5	Trifluoride —	390
2.10.7.6	Metalldifluoride und -subfluoride —	391
2.10.7.7	Fluoridometallate —	392
2.10.8	Metallchloride, -bromide und -iodide —	393
2.10.8.1	Hexahalogenide und Pentahalogenide —	394
2.10.8.2	Tetrahalogenide —	395
2.10.8.3	Trihalogenide —	396

- 2.10.8.4 Dihalogenide und Monohalogenide — **397**
- 2.10.8.5 Metallhalogenide mit Metallclustern — **399**
- 2.10.9 Halogenide der Seltenerdmetalle — **410**
- 2.10.9.1 Trihalogenide — **410**
- 2.10.9.2 Dihalogenide — **412**
- 2.10.9.3 Monohalogenide — **416**
- 2.11 Keramische Materialien — **418**
- 2.11.1 Herstellung von Hochleistungskeramiken — **418**
- 2.11.2 Cermets und Komposite — **418**
- 2.11.3 Einteilung keramischer Materialien — **419**
- 2.11.3.1 Silikatkeramik — **420**
- 2.11.3.2 Zeolithe und poröse Feststoffe — **420**
- 2.11.3.3 Oxidkeramik — **422**
- 2.11.3.4 Boridkeramik — **423**
- 2.11.3.5 Carbidkeramik — **423**
- 2.11.3.6 Nitridkeramik — **425**
- 2.11.3.7 Silicidkeramik — **427**
- 2.11.3.8 Glaskeramik — **427**

Christoph Janiak

- 3 Komplex-/Koordinationschemie — 429**
- 3.1 Einleitung — **429**
- 3.2 Geschichte — **431**
- 3.3 Nomenklatur von Komplexverbindungen — **433**
- 3.4 Ligandenklassen — **436**
- 3.5 Oxidationszahl und Valenzelektronenzahl des Metallatoms in Komplexverbindungen — **441**
- 3.6 Gesamt-Valenzelektronenzahl in Komplexen — **442**
- 3.7 Koordinationszahl und -polyeder von Komplexverbindungen — **444**
- 3.8 Isomerie bei Komplexverbindungen — **454**
- 3.9 Die Bindung in Komplexen und ihre Effekte — **461**
- 3.9.1 Valenzbindungstheorie (VB-Theorie) — **461**
- 3.9.2 Kristallfeldtheorie (CF-Theorie) — **462**
- 3.9.3 Stereochemische und thermodynamische Effekte der Kristallfeldaufspaltung — **471**
- 3.9.4 Kristallfeldaufspaltung – UV/Vis-Spektroskopie — **478**
- 3.9.5 Kristallfeldtheorie – Defizite des Modells — **481**
- 3.9.6 Kristallfeldtheorie – Mehrelektronennäherung — **482**
- 3.9.7 Ligandenfeldtheorie — **498**
- 3.9.8 Molekülorbitaltheorie (MO-Theorie) — **507**
- 3.10 Stabilität von Metallkomplexen — **518**
- 3.10.1 Thermodynamische und kinetische Stabilität — **518**

3.10.2	Stabilitätskonstanten und Komplexbildungsgleichgewichte —	520
3.10.3	Stabilitätstrends —	526
3.10.4	Der Chelateffekt – Grundlagen —	532
3.10.5	Der Chelateffekt – Anwendungen —	535
3.11	Reaktivität von Metallkomplexen, Kinetik und Mechanismen —	546
3.11.1	Substitutionsreaktionen —	546
3.11.2	Redoxreaktionen – Elektronentransfer mit Komplexen —	560
3.11.3	Ligandenreaktionen in der Koordinationssphäre von Metallatomen —	573
3.12	Disauerstoff-Metallkomplexe —	578
3.13	Distickstoff-Metallkomplexe —	583
3.14	Cyanido-Metallkomplexe —	590
3.15	Metall–Metall-Bindungen und Metallcluster —	597
3.16	Medizinische Anwendungen von Metallkomplexen —	604
3.17	Metall-organische Gerüstverbindungen (MOFs), poröse Koordinationspolymere —	608
3.18	Lumineszenz bei Metallkomplexen —	613
3.19	Molekulare Magnete —	623
3.20	Methoden zur Untersuchung von Metallkomplexen —	626
3.21	Anhang —	636
3.21.1	Molekülsymmetrie und Gruppentheorie —	636
3.21.2	Systematische Ermittlung von Russell-Saunders-Termen —	643

Christoph Janiak

4	Organometallchemie —	647
4.1	Einleitung und Metall-Kohlenstoff-Bindung —	647
4.2	Hauptgruppenmetall- und -elementorganyle —	651
4.2.1	Alkalimetallorganyle —	651
4.2.2	Erdalkalimetallorganyle —	657
4.2.3	Organyle der 13. Gruppe: B, Al —	659
4.2.4	Organyle der 14. Gruppe: Si, Sn und Pb —	667
4.2.5	Elementorganyle der 15. Gruppe: Phosphor —	680
4.2.6	Fluktuierende Hauptgruppenmetallorganyle —	689
4.2.7	Hauptgruppenmetall- π -Komplexe —	691
4.2.8	Subvalente Hauptgruppen- σ -Organyle und Element-Element-Bindungen —	698
4.2.9	Kation-Aren- π -Wechselwirkungen —	704
4.3	Übergangsmetallorganyle —	706
4.3.1	Carbonylkomplexe —	706
4.3.1.1	Binäre Metallcarbonyle – Synthesen, Strukturen, Eigenschaften —	707
4.3.1.2	„Nichtklassische“ Metallcarbonyle —	728
4.3.1.3	Metallcarbonylderivate —	730
4.3.1.4	Isoelektronische Liganden zu CO —	736

- 4.3.1.5 Anwendungen von Metallcarbonylen und Derivaten — **745**
- 4.3.2 Carben-(Alkyliden-)Komplexe — **748**
- 4.3.3 Carbin-(Alkylidin-)Komplexe — **765**
- 4.3.4 Übergangsmetall- π -Komplexe — **768**
- 4.3.4.1 Olefin-(Alken-)Komplexe — **768**
- 4.3.4.2 Alkin-(Acetylen-)Komplexe — **776**
- 4.3.4.3 Allylkomplexe — **777**
- 4.3.4.4 Komplexe mit cyclischen π -Liganden — **780**
- 4.3.5 Agostische Wechselwirkungen — **795**
- 4.3.6 Elementarreaktionen mit Metallorganen — **798**
- 4.3.7 Metallorganische Verbindungen der Lanthanoide — **807**
- 4.4 Katalyse — **808**
- 4.4.1 Homogenkatalytische Verfahren — **808**
- 4.4.1.1 Acetaldehyd durch Ethenoxidation und Aceton durch Propenoxidation (Wacker-Hoechst-Verfahren) — **808**
- 4.4.1.2 Essigsäureherstellung durch Carbonylierung von Methanol (BASF- und Monsanto-Verfahren) — **811**
- 4.4.1.3 Aldehyde aus Olefinen durch Hydroformylierung („Oxo-Synthese“) — **814**
- 4.4.1.4 Butadienhydrocyanierung, Adiponitrilsynthese — **818**
- 4.4.1.5 Butadien-trimerisierung und -dimerisierung — **820**
- 4.4.1.6 Der Shell Higher Olefin Process (SHOP), Ethenoligomerisierung — **822**
- 4.4.1.7 Asymmetrische Hydrierungen – Synthese von L-Dopa und L-Phenylalanin — **823**
- 4.4.1.8 Enantioselektive Olefinisomerisierung, L-Menthol-Synthese — **827**
- 4.4.1.9 Transferhydrierung von Alkoholen zu Ketonen — **829**
- 4.4.1.10 Metallocenkatalysatoren für die Olefinpolymerisation — **830**
- 4.4.2 Heterogenkatalytische Verfahren — **841**
- 4.4.2.1 Fischer-Tropsch-Synthese — **842**
- 4.4.2.2 Olefin-/Alken-Metathese — **847**
- 4.4.2.3 Olefinpolymerisation mit heterogenen Katalysatoren, klassische Ziegler-Natta-Katalyse — **852**

Carola Schulzke

- 5 Bioanorganische Chemie — 857**
- 5.1 Das Fach Bioanorganische Chemie — **857**
- 5.2 Grundlegendes — **858**
- 5.3 Biometalle als Zentren hochkomplexer Koordinationsverbindungen — **861**
- 5.3.1 Das Protein als Ligand — **862**
- 5.3.2 Makrozyklische Liganden — **865**
- 5.4 Aufnahme, Transport und Speicherung von Eisen — **867**
- 5.4.1 Der Begriff Homöostase — **867**
- 5.4.2 Eisen als Bioelement – Grundlagen — **867**

5.4.3	Siderophore für die Aufnahme von Eisen —	869
5.4.4	Transport von Eisenionen mittels Transferrin —	871
5.4.5	Ferritin als Eisenspeicherprotein —	874
5.5	Sauerstoffaufnahme, -transport und -speicherung —	879
5.5.1	Das Sauerstofftransportprotein Hämocyanin —	879
5.5.2	Das Sauerstofftransportprotein Hämyerthrin —	882
5.5.3	Hämoglobin und Myoglobin —	883
5.6	Redoxprozesse hämartiger Eisenproteine und -enzyme —	892
5.6.1	Biologische Redoxprozesse —	892
5.6.2	Die Atmungskette —	893
5.6.3	Die Cytochrome —	894
5.6.4	Die Cytochrom c Oxidase —	895
5.6.5	Andere hämartige Enzyme —	898
5.7	Nichthäm-Eisenproteine und -enzyme —	902
5.7.1	Eisen-Schwefel-Kofaktoren —	902
5.7.2	Einkernige Nichthäm-Eisenenzyme —	909
5.7.3	Zweikernige Nichthäm-Eisenenzyme —	912
5.8	Nitrogenase —	915
5.9	Kupfer —	919
5.9.1	Blaue (Typ 1) Kupferproteine —	919
5.9.2	Typ-2-Kupferproteine —	922
5.9.3	Typ-3-Kupferproteine —	925
5.9.4	Mehrkernige Kupferproteine —	929
5.10	Photosynthese und der Oxygen-Evolving Complex (OEC) —	932
5.10.1	Allgemeines —	932
5.10.2	Die Lichtabsorption —	932
5.10.3	Komponenten, Reaktionen und der Elektronentransport in der Photosynthese —	936
5.10.4	Die Wasseroxidation am Oxygen-Evolving Complex —	939
5.11	Beispiele für Proteine und Enzyme mit weiteren Übergangsmetallen —	944
5.11.1	Zink —	944
5.11.2	Nickel —	951
5.11.3	Cobalt —	964
5.11.4	Vanadium —	967
5.11.5	Molybdän und Wolfram —	971