

N. N. Greenwood, A. Earnsley



© 2008 AGI-Information Management Consultants  
May be used for personal purposes only or by  
libraries associated to [dandelion.com](http://dandelion.com) network.

# Chemie der Elemente

Übersetzt von K. Hückmann



3.3.2	Deuterium	52
3.3.3	Tritium	54
3.4	Chemische Eigenschaften und Tendenzen	56
3.4.1	Protonsäuren und Protonbasen	57
3.5	Die Wasserstoffbrückenbindung	63
3.5.1	Einfluß auf Eigenschaften	64
3.5.2	Einfluß auf Strukturen	71
3.5.3	Stärke der Wasserstoffbrückenbindung und theoretische Beschreibung	75
3.6	Hydride	78
<b>4. Kapitel</b>	<b>Die Alkalimetalle: Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium, Cäsium und Francium</b>	<b>83</b>
4.1	Einführung	83
4.2	Die Elemente	83
4.2.1	Entdeckung und Isolierung	83
4.2.2	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	85
4.2.3	Herstellung und Verwendung der Metalle	94
4.2.4	Eigenschaften der Alkalimetalle	96
4.2.5	Chemische Reaktivität und Tendenzen	98
4.2.6	Lösungen in flüssigem Ammoniak und anderen Solventien	99
4.3	Verbindungen	102
4.3.1	Einführung: Das Modell der Ionenbindung	102
4.3.2	Halogenide und Hydride	105
4.3.3	Oxide, Peroxide, Superoxide und Suboxide	108
4.3.4	Hydroxide	112
4.3.5	Salze von Oxosäuren und andere Verbindungen	113
4.3.6	Komplexe - Kronenether und Kryptanden	118
4.3.7	Metallorganische Verbindungen	123
<b>5. Kapitel</b>	<b>Die Erdalkalimetalle: Beryllium, Magnesium, Calcium, Strontium, Barium und Radium</b>	<b>130</b>
5.1	Einführung	130
5.2	Die Elemente	132
5.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	132
5.2.2	Herstellung und Verwendung der Metalle	133
5.2.3	Eigenschaften der Elemente	135
5.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	137
5.3	Verbindungen	138
5.3.1	Einführung	138
5.3.2	Hydride und Halogenide	140
5.3.3	Oxide und Hydroxide	146
5.3.4	Salze von Oxosäuren und Koordinationsverbindungen	148
5.3.5	Metallorganische Verbindungen	157
5.3.5.1	Beryllium	157
5.3.5.2	Magnesium	162
5.3.5.3	Calcium, Strontium und Barium	170
<b>6. Kapitel</b>	<b>Bor</b>	<b>172</b>
6.1	Einführung	172
6.2	Bor	175

6.2.1	Isolierung und Reinigung des Elements	175
6.2.2	Struktur kristallinen Bors	176
6.2.3	Atomare und physikalische Eigenschaften des Bors	179
6.2.4	Chemische Eigenschaften	180
6.3	Boride	182
6.3.1	Einführung	182
6.3.2	Darstellung und Stöchiometrie	183
6.3.3	Struktur der Boride	185
6.4	Borane (Borhydride)	191
6.4.1	Einführung	191
6.4.2	Struktur und Bindungsverhältnisse	198
6.4.3	Eigenschaften der Borane	206
6.4.4	Die Chemie des Diborans $B_2H_6$	207
6.4.5	Die Chemie des n'af'o-Pentaborans $B_5H_9$	214
6.4.6	Die Chemie des «ido-Dekaborans $B_{10}H_{14}$	220
6.4.7	Die Chemie des <i>closo</i> - $B_{10}H^{12-}$	223
6.5	Carbaborane	225
6.6	Metallcarbaborane	233
6.7	Borhalogenide	242
6.7.1	Bortrihalogenide	242
6.7.2	Niedere Borhalogenide	249
6.8	Bor-Sauerstoff-Verbindungen	252
6.8.1	Boroxide und Bor-Oxosäuren	252
6.8.2	Borate	255
6.8.3	Organische Verbindungen, die eine Bor-Sauerstoff-Bindung enthalten	257
6.9	Bor-Stickstoff-Verbindungen	258
6.10	Weitere Verbindungen des Bors	264

## 7. Kapitel Aluminium, Gallium, Indium und Thallium 267

7.1	Einführung	267
7.2	Die Elemente	269
7.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	269
7.2.2	Darstellung und Verwendung der Metalle	271
7.2.3	Eigenschaften der Elemente	276
7.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	279
7.3	Verbindungen	282
7.3.1	Hydride und verwandte Komplexe	282
7.3.2	Halogenide und Halogenidkomplexe	287
7.3.2.1	Aluminiumtrihalogenide	288
7.3.2.2	Trihalogenide von Gallium, Indium und Thallium	293
7.3.2.3	Niedere Halogenide von Gallium, Indium und Thallium	298
7.3.3	Oxide und Hydroxide	300
7.3.4	Ternäre und komplexere Oxidphasen	307
7.3.4.1	Spinnelle und verwandte Verbindungen	308
7.3.4.2	Natrium- $\beta$ -aluminat und verwandte Phasen	310
7.3.4.3	Tricalciumaluminat, $Ca_3Al_2O_6$	312
7.3.5	Weitere anorganische Verbindungen	314
7.3.6	Metallorganische Verbindungen	321

## 8. Kapitel Kohlenstoff 327

8.1	Einführung	327
8.2	Kohlenstoff	330

8.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	330
8.2.2	Allotrope Formen	338
8.2.3	Atomare und physikalische Eigenschaften	341
8.2.4	Chemische Eigenschaften	343
8.3	Graphit-Einlagerungsverbindungen	349
8.4	Carbide	354
8.5	Hydride, Halogenide und Oxohalogenide	358
8.6	Oxide und Carbonate	361
8.7	Chalkogenide und verwandte Verbindungen	371
8.8	Cyanide und andere Kohlenstoff-Stickstoff-Verbindungen	374
8.9	Metallorganische Verbindungen	384
8.9.1	Monohapto-Liganden	386
8.9.2	Dihapto-Liganden	397
8.9.3	Trihapto-Liganden	402
8.9.4	Tetrahapto-Liganden	406
8.9.5	Pentahapto-Liganden	407
8.9.6	Hexahapto-Liganden	414
8.9.7	Heptahapto- und Octahapto-Liganden	416

## 9. Kapitel Silicium 420

9.1	Einführung	420
9.2	Silicium	421
9.2.1	Häufigkeit und Verteilung	421
9.2.2	Isolierung, Herstellung und technische Verwendung	422
9.2.3	Atomare und physikalische Eigenschaften	423
9.2.4	Chemische Eigenschaften	426
9.3	Verbindungen	429
9.3.1	Silicide	429
9.3.2	Siliciumhydride (Silane)	430
9.3.3	Siliciumhalogenide und verwandte Komplexe	434
9.3.4	Siliciumdioxid und Kieselsäuren	436
9.3.5	Silicatminerale	442
9.3.5.1	Silicate mit diskreten Einheiten	443
9.3.5.2	Silicate mit Ketten- oder Bänderstruktur	447
9.3.5.3	Silicate mit Schichtstruktur	450
9.3.5.4	Silicate mit Hohlraumstruktur	458
9.3.6	Weitere anorganische Verbindungen des Siliciums	461
9.3.7	Siliciumorganische Verbindungen und Silicone	464

## 10. Kapitel Germanium, Zinn und Blei 473

10.1	Einführung	473
10.2	Die Elemente	474
10.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	474
10.2.2	Herstellung und Verwendung der Elemente	475
10.2.3	Eigenschaften der Elemente	479
10.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	482
10.3	Verbindungen	484
10.3.1	Hydride und Hydrohalogenide	484
10.3.2	Halogenide und verwandte Komplexe	485
10.3.3	Oxide und Hydroxide	494
10.3.4	Derivate der Oxosäuren	500
10.3.5	Weitere anorganische Verbindungen	502

10.3.6	Metall-Metall-Bindungen und Cluster	504
10.3.7	Metallorganische Verbindungen	509
10.3.7.1	Germanium	509
10.3.7.2	Zinn	509
10.3.7.3	Blei	515
<b>11. Kapitel</b>	<b>Stickstoff</b>	<b>518</b>
11.1	Einführung	518
11.2	Das Element	521
11.2.1	Häufigkeit und Verteilung	521
11.2.2	Herstellung und Verwendung von Stickstoff	524
11.2.3	Atomare und physikalische Eigenschaften	526
11.2.4	Chemische Reaktivität	527
11.3	Verbindungen	533
11.3.1	Nitride, Azide und Nitridokomplexe	533
11.3.2	Ammoniak und Ammoniumsalze	536
11.3.2.1	Flüssiger Ammoniak als Lösungsmittel	542
11.3.3	Weitere Stickstoffhydride	545
11.3.3.1	Hydrazin	545
11.3.3.2	Hydroxylamin	551
11.3.3.3	Stickstoffwasserstoffsäure	553
11.3.4	Thermodynamische Beziehungen zwischen stickstoffhaltigen Spezies	554
11.3.5	Stickstoffhalogenide und verwandte Verbindungen	560
11.3.6	Stickstoffoxide	566
11.3.6.1	Distickstoffmonoxid, $N_2O$	568
11.3.6.2	Stickoxid, $NO$	569
11.3.6.3	Distickstofftrioxid, $N_2O_3$	580
11.3.6.4	Stickstoffdioxid, $NO_2$ , und Distickstofftetroxid, $N_2O_4$	581
11.3.6.5	Distickstoffpentoxid, $N_2O_5$ , und Stickstofftrioxid, $NO_3$	585
11.3.7	Oxosäuren, Oxoanionen und Salze von Oxosäuren des Stickstoffs	587
11.3.7.1	Hyposalpetrige Säure und Hyponitrite	587
11.3.7.2	Salpetrige Säure und Nitrite	591
11.3.7.3	Salpetersäure und Nitrate	596
11.3.7.4	Orthonitrate, $M_3NO_4$	607
<b>12. Kapitel</b>	<b>Phosphor</b>	<b>608</b>
12.1	Einführung	608
12.2	Das Element	611
12.2.1	Häufigkeit und Verteilung	611
12.2.2	Herstellung und Verwendung elementaren Phosphors	616
12.2.3	Allotrope Formen des Phosphors	618
12.2.4	Atomare und physikalische Eigenschaften	620
12.2.5	Chemische Reaktivität	623
12.3	Verbindungen	625
12.3.1	Phosphide	625
12.3.2	Phosphin und verwandte Verbindungen	628
12.3.3	Phosphorhalogenide	633
12.3.3.1	Phosphortrihalogenide	633
12.3.3.2	Diphosphortetrahalogenide	636

12.3.3.3	Phosphorpentahalogenide	637
12.3.3.4	Pseudohalogenide des dreiwertigen Phosphors	640
12.3.4	Oxid- und Sulfidhalogenide des Phosphors	641
12.3.5	Phosphoroxide, -Sulfide und -oxidsulfide	643
12.3.5.1	Oxide	643
12.3.5.2	Sulfide	647
12.3.5.3	Oxidsulfide	652
12.3.6	Oxosäuren des Phosphors und ihre Salze	652
12.3.6.1	Hypophosphorige Säure und Hypophosphite [H <sub>2</sub> PO(OH) und H <sub>2</sub> PO;T]	657
12.3.6.2	Phosphorige Säure und Phosphite [HPO(OH) <sub>2</sub> und HPO ~]	658
12.3.6.3	Hypophosphorsäure (H <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ) und Hypophosphate	659
12.3.6.4	Weitere niedrigere Oxosäuren des Phosphors	661
12.3.6.5	Die Phosphorsäuren	663
12.3.6.6	Orthophosphate	670
12.3.6.7	Ketten-Polyphosphate	676
12.3.6.8	Cyclo-Polyphosphorsäuren und cyclo-Polyphosphate	687
12.3.7	Phosphor-Stickstoff-Verbindungen	688
12.3.7.1	Cyclophosphazane	690
12.3.7.2	Phosphazene	692
12.3.7.3	Polyphosphazene	694
12.3.8	Phosphororganische Verbindungen	704

13. Kapitel	Arsen, Antimon und Bismut	708
13.1	Einführung	708
13.2	Die Elemente	709
13.2.1	Häufigkeit, Verteilung und Gewinnung	709
13.2.2	Atomare und physikalische Eigenschaften	713
13.2.3	Chemische Reaktivität und Gruppentendenzen	716
13.3	Verbindungen des Arsens, Antimons und Bismuts	718
13.3.1	Intermetallische Verbindungen und Legierungen	718
13.3.2	Hydride des Arsens, Antimons und Bismuts	722
13.3.3	Halogenide und verwandte Verbindungen	724
13.3.3.1	Trihalogenide MX <sub>3</sub>	724
13.3.3.2	Pentahalogenide MX <sub>5</sub>	728
13.3.3.3	Gemischte und niedrigere Halogenide	730
13.3.3.4	Halogenidkomplexe von M <sup>III</sup> und M <sup>V</sup>	732
13.3.3.5	Oxidhalogenide	739
13.3.4	Oxide und OxoVerbindungen	742
13.3.4.1	Oxo Verbindungen von M <sup>III</sup>	742
13.3.4.2	Gemischivalente Oxide	746
13.3.4.3	Oxo Verbindungen von M <sup>V</sup>	746
13.3.5	Sulfide und verwandte Verbindungen	748
13.3.6	Metall-Metall-Bindungen und Cluster	754
13.3.7	Weitere anorganische Verbindungen	765
13.3.8	Metallorganische Verbindungen	765
13.3.8.1	Arsen(III)-organische Verbindungen	766
13.3.8.2	Arsen(V)-organische Verbindungen	768
13.3.8.3	Physiologische Aktivität von Arsenverbindungen	770
13.3.8.4	Antimon- und bismutorganische Verbindungen	770

14. Kapitel	Sauerstoff	775
14.1	Das Element	775
14.1.1	Einführung	775
14.1.2	Vorkommen	778
14.1.3	Darstellung	779
14.1.4	Atomare und physikalische Eigenschaften	782
14.1.5	Andere Formen des Sauerstoffs	786
14.1.5.1	Ozon	786
14.1.5.2	Atomarer Sauerstoff	792
14.1.6	Chemische Eigenschaften molekularen Sauerstoffs (O <sub>2</sub> )	792
14.2	Verbindungen des Sauerstoffs	798
14.2.1	Komplexchemie: molekularer Sauerstoff als Ligand	798
14.2.2	Wasser	806
14.2.2.1	Einführung	806
14.2.2.2	Verteilung und Verfügbarkeit	807
14.2.2.3	Struktur und physikalische Eigenschaften	811
14.2.2.4	Kristallwasser, Aquakomplexe und feste Hydrate	814
14.2.2.5	Chemische Eigenschaften	817
14.2.2.6	Polywasser	823
14.2.3	Wasserstoffperoxid	824
14.2.3.1	Physikalische Eigenschaften	826
14.2.3.2	Chemische Eigenschaften	828
14.2.4	Sauerstofffluoride	831
14.2.5	Oxide	834
14.2.5.1	Methoden zur Klassifizierung	834
14.2.5.2	Nichtstöchiometrisches Verhalten	836
15. Kapitel	Schwefel	840
15.1	Das Element	840
15.1.1	Einführung	840
15.1.2	Häufigkeit und Verteilung	842
15.1.3	Herstellung und Verwendung elementaren Schwefels	845
15.1.4	Allotrope Formen des Schwefels	855
15.1.5	Atomare und physikalische Eigenschaften	866
15.1.6	Chemische Reaktivität	867
15.1.6.1	Mehratomige Schwefelkationen	870
15.1.6.2	Schwefel als Ligand	872
15.1.6.3	Weitere Liganden mit Schwefel als Donoratom	880
15.2	Schwefelverbindungen	884
15.2.1	Metallsulfide	
15.2.1.1	Allgemeine Betrachtung	
15.2.1.2	Strukturchemie der Metallsulfide	890
15.2.1.3	Anionische Polysulfide	892
15.2.2	Hydride des Schwefels (Sulfane)	893
15.2.3	Halogenide des Schwefels	895
15.2.3.1	Schwefelfluoride	895
15.2.3.2	Chloride, Bromide und Iodide des Schwefels	903
15.2.4	Oxidhalogenide des Schwefels	908
15.2.5	Oxide des Schwefels	910
15.2.5.1	Niedere Oxide	910
15.2.5.2	Schwefeldioxid, SO <sub>2</sub>	913
15.2.5.3	Schwefeloxidliganden	918

15.2.5.4	Schwefeltrioxid, $\text{SO}_3$	922
15.2.5.5	Höhere Oxide	923
15.2.6	Oxosäuren des Schwefels	924
15.2.6.1	Schwefelsäure, $\text{H}_2\text{SO}_4$	927
15.2.6.2	Die Peroxoschwefelsäuren $\text{H}_2\text{SO}_5$ und $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$	937
15.2.6.3	Thioschwefelsäure, $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_3$	938
15.2.6.4	Dithionsäure, $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_6$	940
15.2.6.5	Polythionsäuren, $\text{H}_2\text{S}_x\text{O}_6$	941
15.2.6.6	Schweflige Säure, $\text{H}_2\text{SO}_3$	942
15.2.6.7	Dischweflige Säure, $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_5$	945
15.2.6.8	Dithionige Säure, $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_4$	945
15.2.7	Schwefel-Stickstoff-Verbindungen	947
15.2.7.1	Binäre Schwefelnitride	948
15.2.7.2	Schwefel-Stickstoff-Kationen und -Anionen	957
15.2.7.3	Schwefelimide, $\text{S}_8\text{--},(\text{NH})_n$	962
15.2.7.4	Andere cyclische Schwefel-Stickstoff-Verbindungen	963
15.2.7.5	Schwefel-Stickstoff-Halogen-Verbindungen	965
15.2.7.6	Schwefel-Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen	969
16.	<b>Kapitel Selen, Tellur und Polonium</b>	976
16.1	Die Elemente	976
16.1.1	Einführung: Geschichtliches, Häufigkeit und Verteilung	976
16.1.2	Herstellung und Verwendung der Elemente	977
16.1.3	Allotropie	981
16.1.4	Atomare und physikalische Eigenschaften	984
16.1.5	Chemische Reaktivität und Tendenzen	985
16.1.6	Mehratomige Kationen $\text{M}^{n+}$	991
16.2	Verbindungen des Selens, Tellurs und Poloniums	994
16.2.1	Selenide, Telluride und Polonide	994
16.2.2	Hydride	996
16.2.3	Halogenide	997
16.2.3.1	Niedere Halogenide	997
16.2.3.2	Tetrahalogenide	1001
16.2.3.3	Hexahalogenide	1004
16.2.3.4	Halogenid-Komplexe	1005
16.2.4	Oxidhalogenide und Pseudohalogenide	1006
16.2.5	Oxide	1008
16.2.6	Hydroxide und Oxosäuren	1011
16.2.7	Weitere anorganische Verbindungen	1014
16.2.8	Organische Verbindungen	1015
17.	<b>Kapitel Die Halogene: Fluor, Chlor, Brom, Iod und Astat</b>	iois
17.1	Die Elemente	1018
17.1.1	Einführung	1018
17.1.1.1	Fluor	1028
17.1.1.2	Chlor	1022
17.1.1.3	Brom	1024
17.1.1.4	Iod	1025
17.1.1.5	Astat	1026
17.1.2	Häufigkeit und Verteilung	1026
17.1.3	Darstellung und Verwendung der Elemente	1028



17.1.4	Atomare und physikalische Eigenschaften der Elemente	1034
17.1.5	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1039
17.1.5.1	Allgemeine Betrachtungen zur Reaktivität und Stereochemie	1039
17.1.5.2	Lösungen und Charge-transfer-Komplexe	1042
17.2	Verbindungen von Fluor, Chlor, Brom und Iod	1046
17.2.1	Halogenwasserstoffe HX	1046
17.2.1.1	Darstellung und Verwendung	1046
17.2.1.2	Physikalische Eigenschaften der Halogenwasserstoffe	1051
17.2.1.3	Chemische Reaktivität der Halogenwasserstoffe	1053
17.2.1.4	Halogenwasserstoffe als nichtwäßrige Lösungsmittel	1057
17.2.2	Halogenide der Elemente	1061
17.2.2.1	Fluoride	1062
17.2.2.2	Chloride, Bromide und Iodide	1064
17.2.3	Interhalogenverbindungen	1067
17.2.3.1	Zweiatomige Interhalogenverbindungen XY	1067
17.2.3.2	Vieratomige Interhalogene XY <sub>3</sub>	1072
17.2.3.3	Sechs- und achtatomige Interhalogene XF <sub>5</sub> und IF <sub>7</sub>	1078
17.2.4	Polyhalogenid-Anionen	1083
17.2.5	Polyhalonium-Kationen	1087
17.2.6	Halogen-Kationen	1090
17.2.7	Oxide des Chlors, Broms und Iods	1093
17.2.7.1	Oxide des Chlors	1094
17.2.7.2	Oxide des Broms	1101
17.2.7.3	Oxide des Iods	1102
17.2.8	Oxosäuren und ihre Salze	1104
17.2.8.1	Allgemeine Betrachtung	1104
17.2.8.2	Hypohalogenige Säuren HOX und Hypohalogenite XO~	1108
17.2.8.3	Halogenige Säuren HOXO und Halogenite XOJ	1113
17.2.8.4	Halogensäuren HOXO <sub>2</sub> und Halogenate XOJ	1115
17.2.8.5	Perhalogensäuren und Perhalogenate	1119
17.2.8.6	Perchlorsäure und Perchlorate	1119
17.2.8.7	Perbromsäure und Perbromate	1127
17.2.8.8	Periodsäure und Periodate	1129
17.2.9	Halogenoxidfluoride und verwandte Verbindungen	1133
17.2.9.1	Chloroxidfluoride	1134
17.2.9.2	Bromoxidfluoride	1139
17.2.9.3	Iodoxidfluoride	1141
17.2.10	Halogenderivate von Oxosäuren	1144
17.3	Die Chemie des Astats	1147

<b>18. Kapitel</b>	<b>Die Edelgase: Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon und Radon</b>	<b>1150</b>
18.1	Einführung	1150
18.2	Die Elemente	1152
18.2.1	Verteilung, Herstellung und Verwendung	1152
18.2.2	Atomare und physikalische Eigenschaften der Elemente	1153
18.3	Chemie der Edelgase	1155
18.3.1	Clathrate	1156
18.3.2	Xenonverbindungen	1157
18.3.3	Verbindungen anderer Edelgase	1169

<b>19. Kapitel</b>	<b>Koordinationsverbindungen</b>	<b>1170</b>
19.1	Einführung	1170
19.2	Ligandentypen	1171
19.3	Stabilität von Koordinationsverbindungen	1174
19.4	Koordinationszahlen	1179
19.5	Isomerie	1189
19.5.1	Konformationsisomerie	1190
19.5.2	Geometrische Isomerie	1190
19.5.3	Optische Isomerie	1191
19.5.4	Ionisationsisomerie	1192
19.5.5	Bindungsisomerie	1192
19.5.6	Koordinationsisomerie	1193
19.5.7	Polymerisationsisomerie	1193
19.5.8	Ligandenisomerie	1194
19.6	Die koordinative Bindung	1194
19.7	Die Kristallfeldtheorie	1196
19.8	Farbe von Komplexen	1202
19.9	Thermodynamische Effekte der Kristallfeldaufspaltung	1210
19.10	Magnetische Eigenschaften	1212
19.11	Die Ligandenfeldtheorie	1213
19.12	Die Theorie der Molekülzustände (Molecular Orbital Theory)	1213
<b>20. Kapitel</b>	<b>Scandium, Yttrium, Lanthan und Actinium</b>	<b>1216</b>
20.1	Einführung	1216
20.2	Die Elemente	1217
20.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	1217
20.2.2	Darstellung und Verwendung der Metalle	1217
20.2.3	Eigenschaften der Elemente	1218
20.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1221
20.3	Verbindungen des Scandiums, Yttriums, Lanthans und Actiniums	1222
20.3.1	Einfache Verbindungen	1222
20.3.2	Komplexe	1223
20.3.3	Metallorganische Verbindungen	1225
<b>21. Kapitel</b>	<b>Titan, Zirkonium und Hafnium</b>	<b>1227</b>
21.1	Einführung	1227
21.2	Die Elemente	1228
21.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	1228
21.2.2	Darstellung und Verwendung der Metalle	1229
21.2.3	Eigenschaften der Elemente	1230
21.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1233
21.3	Verbindungen des Titans, Zirkoniums und Hafniums	1234
21.3.1	Oxide und Sulfide	1235
21.3.2	Gemischte oder komplexe Oxide	1239
21.3.3	Halogenide	1241
21.3.4	Verbindungen mit Oxoanionen	1243
21.3.5	Komplexe	1245
21.3.5.1	Oxidationszahl IV ( $d^0$ )	1245
21.3.5.2	Oxidationszahl III ( $d^1$ )	1250
21.3.5.3	Niedere Oxidationszahlen	1252
21.3.6	Metallorganische Verbindungen	1252

<b>22. Kapitel</b>	<b>Vanadium, Mob und Tantal</b>	1257
22.1	Einführung	1257
22.2	Die Elemente	1258
22.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	1258
22.2.2	Darstellung und Verwendung der Metalle	1259
22.2.3	Atomare und physikalische Eigenschaften der Elemente	1260
22.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1261
22.3	Verbindungen von Vanadium, Niob und Tantal	1263
22.3.1	Oxide	1264
22.3.2	Isopolymetallate	1266
22.3.3	Sulfide, Selenide und Telluride	1271
22.3.4	Halogenide und Oxidhalogenide	1272
22.3.5	Verbindungen mit Oxoanionen	1277
22.3.6	Komplexe	1278
22.3.6.1	Oxidationszahl V ( $d^0$ )	1278
22.3.6.2	Oxidationszahl IV ( $d^1$ )	1279
22.3.6.3	Oxidationszahl III ( $d^2$ )	1281
22.3.6.4	Oxidationszahl II ( $d^3$ )	1284
22.3.7	Metallorganische Verbindungen	1285
<b>23. Kapitel</b>	<b>Chrom, Molybdän und Wolfram</b>	1288
23.1	Einführung	1288
23.2	Die Elemente	1289
23.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	1289
23.2.2	Darstellung und Verwendung der Metalle	1289
23.2.3	Eigenschaften der Elemente	1291
23.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1292
23.3	Verbindungen von Chrom, Molybdän und Wolfram	1294
23.3.1	Oxide	1294
23.3.2	Isopolymetallate	1297
23.3.3	Heteropolymetallate	1306
23.3.4	Molybdän- und Wolframbronzen	1307
23.3.5	Sulfide, Selenide und Telluride	1309
23.3.6	Halogenide und Oxidhalogenide	1310
23.3.7	Komplexe	1315
23.3.7.1	Oxidationszahl VI ( $d^0$ )	1315
23.3.7.2	Oxidationszahl V ( $d^1$ )	1316
23.3.7.3	Oxidationszahl IV ( $d^2$ )	1317
23.3.7.4	Oxidationszahl III ( $d^3$ )	1318
23.3.7.5	Oxidationszahl II ( $d^4$ )	1324
23.3.8	Biologische Aktivität und Stickstoffixierung	1329
23.3.9	Metallorganische Verbindungen	1332
<b>24. Kapitel</b>	<b>Mangan, Technetium und Rhenium</b>	1335
24.1	Einführung	1335
24.2	Die Elemente	1336
24.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	1336
24.2.2	Darstellung und Verwendung der Metalle	1337
24.2.3	Eigenschaften der Elemente	1338
24.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1339
24.3	Verbindungen von Mangan, Technetium und Rhenium	1343

24.3.1	Oxide und Chalkogenide	1343
24.3.2	Oxoanionen	1347
24.3.3	Halogenide und Oxidhalogenide	1348
24.3.4	Komplexe	1352
24.3.4.1	Oxidationszahl VII ( $d^0$ )	1352
24.3.4.2	Oxidationszahl VI ( $d^1$ )	1353
24.3.4.3	Oxidationszahl V ( $d^2$ )	1353
24.3.4.4	Oxidationszahl IV ( $d^3$ )	1354
24.3.4.5	Oxidationszahl III ( $d^4$ )	1354
24.3.4.6	Oxidationszahl II ( $d^5$ )	1357
24.3.4.7	Niedere Oxidationszahlen	1361
24.3.5	Metallorganische Verbindungen	1361

**25. Kapitel Eisen, Ruthenium und Osmium** 1368

25.1	Einführung	1368
25.2	Die Elemente	1369
25.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	1369
25.2.2	Darstellung und Verwendung der Elemente	1370
25.2.3	Eigenschaften der Elemente	1375
25.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1377
25.3	Verbindungen von Eisen, Ruthenium und Osmium	1382
25.3.1	Oxide und andere Chalkogenide	1382
25.3.2	Gemischte Metalloxide und Oxoanionen	1384
25.3.3	Halogenide und Oxidhalogenide	1386
25.3.4	Komplexe	1389
25.3.4.1	Oxidationszahl VIII ( $d^0$ )	1389
25.3.4.2	Oxidationszahl VII ( $d^1$ )	1389
25.3.4.3	Oxidationszahl VI ( $d^2$ )	1389
25.3.4.4	Oxidationszahl V ( $d^3$ )	1390
25.3.4.5	Oxidationszahl IV ( $d^4$ )	1391
25.3.4.6	Oxidationszahl III ( $d^5$ )	1393
25.3.4.7	Oxidationszahl II ( $d^6$ )	1398
25.3.4.8	Niedere Oxidationszahlen	1405
25.3.5	Die Biochemie des Eisens	1406
25.3.5.1	Hämoglobin und Myoglobin	1406
25.3.5.2	Cytochrome	1410
25.3.5.3	Eisen-Schwefel-Proteine	1411
25.3.6	Metallorganische Verbindungen	1414
25.3.6.1	Carbonyle	1414
25.3.6.2	Carbonylhydride und Carbonylat-Anionen	1416
25.3.6.3	Carbonylhalogenide und andere substituierte Carbonyle	1418
25.3.6.4	Ferrocene und andere Cyclopentadien-Komplexe	1419

**26. Kapitel Cobalt, Rhodium und Iridium** 1423

26.1	Einführung	1423
26.2	Die Elemente	1424
26.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	1424
26.2.2	Darstellung und Verwendung der Elemente	1424
26.2.3	Eigenschaften der Elemente	1426
26.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1428
26.3	Verbindungen von Cobalt, Rhodium und Iridium	1430

26.3.1	Oxide und Sulfide	1430
26.3.2	Halogenide	1431
26.3.3	Komplexe	1433
26.3.3.1	Oxidationszahl IV ( $d^5$ )	1434
26.3.3.2	Oxidationszahl III ( $d^6$ )	1435
26.3.3.3	Oxidationszahl II ( $d^7$ )	1446
26.3.3.4	Oxidationszahl I ( $d^8$ )	1452
26.3.3.5	Niedere Oxidationszahlen	1456
26.3.4	Biochemie des Cobalts	1457
26.3.5	Metallorganische Verbindungen	1459
26.3.5.1	Carbonyle	1460
26.3.5.2	Cyclopentadien-Komplexe	1463

## 27. Kapitel Nickel, Palladium und Platin 1464

27.1	Einführung	1464
27.2	Die Elemente	1465
27.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	1465
27.2.2	Darstellung und Verwendung der Elemente	1466
27.2.3	Eigenschaften der Elemente	1469
27.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1470
27.3	Verbindungen von Nickel, Palladium und Platin	1472
27.3.1	Das Pd/H <sub>2</sub> -System	1472
27.3.2	Oxide und Chalkogenide	1474
27.3.3	Halogenide	1475
27.3.4	Komplexe	1477
27.3.4.1	Oxidationszahl IV ( $d^6$ )	1477
27.3.4.2	Oxidationszahl III ( $d^7$ )	1478
27.3.4.3	Oxidationszahl II ( $d^8$ )	1479
27.3.4.4	Oxidationszahl I ( $d^9$ )	1494
27.3.4.5	Oxidationszahl 0 ( $d^{10}$ )	1494
27.3.5	Metallorganische Verbindungen	1495
27.3.5.1	Verbindungen mit $\alpha$ -Bindung	1496
27.3.5.2	Carbonyle	1497
27.3.5.3	Cyclopentadien-Komplexe	1499
27.3.5.4	Alken- und Alkin-Komplexe	1500
27.3.5.5	Ti-Allyl-Komplexe	1502

## 28. Kapitel Kupfer, Silber und Gold 1504

28.1	Einführung	1504
28.2	Die Elemente	1505
28.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	1505
28.2.2	Darstellung und Verwendung der Elemente	1506
28.2.3	Atomare und physikalische Eigenschaften der Elemente	1508
28.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1510
28.3	Verbindungen von Kupfer, Silber und Gold	1514
28.3.1	Oxide und Sulfide	1514
28.3.2	Halogenide	1516
28.3.3	Photographie	1519
28.3.4	Komplexe	1521
28.3.4.1	Oxidationszahl III ( $d^8$ )	1522
28.3.4.2	Oxidationszahl II ( $d^9$ )	1523

28.3.4.3	Elektronenspektren und magnetische Eigenschaften des Kupfer(II)-Ions	1529
28.3.4.4	Oxidationszahl I ( $d^{10}$ )	1530
28.3.4.5	Clusterverbindungen des Golds	1534
28.3.5	Biochemie des Kupfers	1536
28.3.6	Metallorganische Verbindungen	1537
<b>29. Kapitel</b>	<b>Zink, Cadmium und Quecksilber</b>	<b>1539</b>
29.1	Einführung	1539
29.2	Die Elemente	1540
29.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	1540
29.2.2	Darstellung und Verwendung der Elemente	1541
29.2.3	Eigenschaften der Elemente	1544
29.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1545
29.3	Verbindungen von Zink, Cadmium und Quecksilber	1548
29.3.1	Oxide und Chalkogenide	1549
29.3.2	Halogenide	1553
29.3.3	Quecksilber©	1554
29.3.3.1	Polykationen des Quecksilbers	1556
29.3.4	Zink(II) und Cadmium(II)	1557
29.3.5	Quecksilber(II)	1559
29.3.5.1	Hg <sup>n</sup> -N-Verbindungen	1561
29.3.6	Metallorganische Verbindungen	1563
29.3.7	Bedeutung für Biologie und Umwelt	1568
<b>30. Kapitel</b>	<b>Die Lanthaniden (Z = 58-71)</b>	<b>1571</b>
30.1	Einführung	1571
30.2	Die Elemente	1574
30.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	1574
30.2.2	Darstellung und Verwendung der Elemente	1575
30.2.3	Eigenschaften der Elemente	1578
30.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1583
30.3	Verbindungen der Lanthaniden	1586
30.3.1	Oxide und Chalkogenide	1587
30.3.2	Halogenide	1589
30.3.3	Magnetische und spektroskopische Eigenschaften	1592
30.3.4	Komplexe	1594
30.3.4.1	Oxidationszahl IV	1594
30.3.4.2	Oxidationszahl III	1595
30.3.4.3	Oxidationszahl II	1598
30.3.5	Metallorganische Verbindungen	1599
30.3.5.1	Cyclopentadien- und verwandte Verbindungen	1599
30.3.5.2	Alkyl- und Arylverbindungen	1600
<b>31. Kapitel</b>	<b>Die Actiniden (Z = 90-103)</b>	<b>1601</b>
31.1	Einführung	1601
31.1.1	Superschwere Elemente	1605
31.2	Die Elemente	1606
31.2.1	Häufigkeit und Verteilung auf der Erde	1606
31.2.2	Darstellung und Verwendung der Elemente	1607
31.2.2.1	Kernreaktoren und Atomenergie	1608

---

31.2.2.2	Wiederaufbereitung von Kernbrennstoff	1614
31.2.3	Eigenschaften der Elemente	1616
31.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1619
31.3	Verbindungen der Actiniden	1624
31.3.1	Oxide und Chalkogenide	1624
31.3.2	Gemischte Metalloxide	1626
31.3.3	Halogenide	1627
31.3.4	Magnetische und spektroskopische Eigenschaften	1631
31.3.5	Komplexe	1632
31.3.5.1	Oxidationszahl VII	1632
31.3.5.2	Oxidationszahl VI	1632
31.3.5.3	Oxidationszahl V	1634
31.3.5.4	Oxidationszahl IV	1635
31.3.5.5	Oxidationszahl III	1638
31.3.5.6	Oxidationszahl II	1638
31.3.6	Metallorganische Verbindungen	1639
<b>Anhang 1</b>	Atomorbitale	1642
<b>Anhang 2</b>	Symmetrieelemente, Symmetrieoperationen und Punktgruppen	1647
<b>Anhang 3</b>	Einige nicht vom SI abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren	1650
<b>Anhang 4</b>	Häufigkeit der Elemente in der Erdkruste	1651
<b>Anhang 5</b>	Effektive Ionenradien	1652
<b>Anhang 6</b>	Nobelpreise für Chemie	1653
<b>Anhang 7</b>	Nobelpreise für Physik	1657
<b>Register</b>		1662

31.2.2.2	Wiederaufbereitung von Kernbrennstoff	1614
31.2.3	Eigenschaften der Elemente	1616
31.2.4	Chemische Reaktivität und Tendenzen	1619
31.3	Verbindungen der Actiniden	1624
31.3.1	Oxide und Chalkogenide	1624
31.3.2	Gemischte Metalloxide	1626
31.3.3	Halogenide	1627
31.3.4	Magnetische und spektroskopische Eigenschaften	1631
31.3.5	Komplexe	1632
31.3.5.1	Oxidationszahl VII	1632
31.3.5.2	Oxidationszahl VI	1632
31.3.5.3	Oxidationszahl V	1634
31.3.5.4	Oxidationszahl IV	1635
31.3.5.5	Oxidationszahl III	1638
31.3.5.6	Oxidationszahl II	1638
31.3.6	Metallorganische Verbindungen	1639
<b>Anhang 1</b>	Atomorbitale	1642
<b>Anhang 2</b>	Symmetrieelemente, Symmetrieoperationen und Punktgruppen	1647
<b>Anhang 3</b>	Einige nicht vom SI abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren	1650
<b>Anhang 4</b>	Häufigkeit der Elemente in der Erdkruste	1651
<b>Anhang 5</b>	Effektive Ionenradien	1652
<b>Anhang 6</b>	Nobelpreise für Chemie	1653
<b>Anhang 7</b>	Nobelpreise für Physik	1657
<b>Register</b>		1662