Teubner Studienbücher

Chemie

Aurich/Rinze: **Chemisches Praktikum für Mediziner**

2. Aufl. 240 Seiten. DM 28,80 / ÖS 225,- / SFr 28,80

Breitmaier: **Vom NMR-Spektrum zur Strukturformel organischer Verbindungen.**

Ein kurzes Praktikum der NMR-Spektroskopie

2. Aufl. 261 Seiten. DM 39,80 / ÖS 311,- / SFr 39,80

Ebert: **Biopolymere**

543 Seiten. DM 59,80 / ÖS 467,- / SFr 59,80

Elschenbroich/Salzer: **Organometallchemie**

Eine kurze Einführung.

3. Aufl. 562 Seiten. DM 46,- / ÖS 359,- / SFr 46,-

Engelke: **Aufbau der Moleküle**

Eine Einführung.

2. Aufl. 339 Seiten. DM 44,- / ÖS 343,- / SFr 44,-

Fellenberg: **Chemie der Umweltbelastung**

2. Aufl. 265 Seiten. DM 32,- / ÖS 250,- / SFr 32,-

Fuhrmann: **Allgemeine Toxikologie**

201 Seiten. DM 26,80 / ÖS 209,- / SFr 26,80

Hauptmann: **Reaktion und Mechanismus in der organischen Chemie**

227 Seiten. DM 28,80 / ÖS 225,- / SFr 28,80

Hennig/Rehorek: **Photochemische und photokatalytische Reaktionen von Koordinationsverbindungen**

164 Seiten. DM 24,80 / ÖS 194,- / SFr 24,80

Jordan: **Mechanismen anorganischer und metallorganischer Reaktionen**

X, 299 Seiten. DM 36,80 / ÖS 287,- / SFr 36,80

Kaim/Schwederski: **Bioanorganische Chemie**

Zur Funktion chemischer Elemente in Lebensprozessen

2. Aufl. XVI, 460 Seiten. DM 49,80 / ÖS 389,- / SFr 49,80

Preisänderungen vorbehalten.

B. G. Teubner Stuttgart

Teubner Studienbücher Chemie

**W. Kaim / B. Schwederski
Bioanorganische Chemie**

Teubner Studienbücher Chemie

Herausgegeben von

Prof. Dr. rer. nat. Christoph Elschenbroich, Marburg

Prof. Dr. rer. nat. Friedrich Hensel, Marburg

Prof. Dr. phil. Henning Hopf, Braunschweig

Die Studienbücher der Reihe Chemie sollen in Form einzelner Bausteine grundlegende und weiterführende Themen aus allen Gebieten der Chemie umfassen. Sie streben nicht die Breite eines Lehrbuchs oder einer umfangreichen Monographie an, sondern sollen den Studenten der Chemie – aber auch den bereits im Berufsleben stehenden Chemiker – kompetent in aktuelle und sich in rascher Entwicklung befindende Gebiete der Chemie einführen. Die Bücher sind zum Gebrauch neben der Vorlesung, aber auch – da sie häufig auf Vorlesungsmanuskripten beruhen – anstelle von Vorlesungen geeignet. Es wird angestrebt, im Laufe der Zeit alle Bereiche der Chemie in derartigen Lehrbüchern vorzustellen. Die Reihe richtet sich auch an Studenten anderer Naturwissenschaften, die an einer exemplarischen Darstellung der Chemie interessiert sind.

Bioanorganische Chemie

Zur Funktion chemischer Elemente
in Lebensprozessen

Von Prof. Dr.phil.nat. Wolfgang Kaim
und Brigitte Schwederski, Ph. D.
Universität Stuttgart

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

B. G. Teubner Stuttgart 1995

Prof. Dr.phil.nat. Wolfgang Kaim

Geboren 1951 in Bad Vilbel, Studium der Chemie in Frankfurt am Main und Konstanz, Diplom 1974 bei E. Daltrozzo, Promotion 1978 bei H. Bock, 1978/79 Aufenthalt bei F. A. Cotton (Texas A&M University, USA), 1982 Habilitation. Von 1981 bis 1987 Hochschulassistent am anorganisch-chemischen Institut der Universität Frankfurt, Karl Winnacker-Stipendiat 1982–1987, 1987 Heisenberg-Stipendium. Seit 1987 Ordinarius für Anorganische Chemie an der Universität Stuttgart.

Brigitte Schwederski, Ph. D.

Geboren 1959 in Recklinghausen, Studium der Chemie und Biologie in Bochum und an der Purdue University (USA), Diplom 1983 bei A. Haas, Promotion 1988 bei D.W. Margerum. Seit 1988 wiss. Assistentin am Institut für Anorganische Chemie der Universität Stuttgart.

Das Umschlagbild zeigt eine vereinfachte Darstellung des Katalysezyklus für die Umwandlung von Kohlenwasserstoffen R - H zu entsprechenden Alkoholen R-OH durch molekularen Sauerstoff O₂. Die dafür notwendigen Häm-enthaltenden Monooxygenase-Enzyme vom Typ des Cytochroms P-450 finden sich beispielsweise in den Mikrosom-Vesikeln der Leber; näheres hierzu in Abschnitt 6.2 (S. 120).

Die Deutsche Bibliothek – CIP Einheitsaufnahme

Kaim, Wolfgang:

Bioanorganische Chemie: zur Funktion chemischer Elemente in Lebensprozessen / von Wolfgang Kaim und Brigitte

Schwederski. – 2., überarb. Aufl. – Stuttgart: Teubner, 1995

(Teubner-Studienbücher : Chemie)

ISBN 978-3-519-13505-0

ISBN 978-3-322-91893-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-91893-2

NE: Schwederski, Brigitte:

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© B. G. Teubner Stuttgart 1995

Vorwort zur 2. Auflage

Während der Abfassung der ersten Auflage dieses Buches war uns bereits bewußt geworden, daß die Flut wesentlich neuer Erkenntnisse innerhalb kurzer Zeit eine weitere, aktualisierte Auflage unerläßlich machen würde. Die Notwendigkeit der Aktualisierung betrifft dabei beide Zielrichtungen des Buches, das zwar einerseits als Einführung in alle Teilgebiete der Bioanorganischen Chemie konzipiert wurde, aber gleichzeitig auch als aktueller Leitfaden für "Eingeweihte" mit der Angabe neuester Literatur nutzbar sein soll.

Wenngleich die allermeisten Fakten und Interpretationen aus der ersten Auflage unverändert geblieben sind, so wurden doch an vielen Stellen Erweiterungen und auch Korrekturen früherer Vorstellungen nötig. Zu den neu aufgenommenen "Highlights" zählen neuere Strukturbestimmungen, insbesondere der klassischen Nitrogenase, der Methan-Monooxygenase oder von Zink-Finger/DNA-Komplexen, aber auch die zunehmend bekannt gewordene essentielle Rolle des NO-Moleküls im Bereich der Neurobiochemie. Unverkennbar ist die wachsende Tendenz zur Annäherung an enzymatische Mechanismen durch spektroskopische und strukturelle Studien an *mehreren verschiedenen Zuständen* eines Enzyms sowie das rasch zunehmende Verständnis genregulatorischer Mechanismen bei Aufnahme und Nutzung "anorganischer" Elemente. Trotz der vielen neu eingefügten Aspekte ist es uns jedoch gelungen, die Gesamtseitenzahl im Vergleich zur ersten Auflage um weniger als 4 % wachsen zu lassen.

Mit Freude und Befriedigung haben wir nach Erscheinen der ersten Auflage sowohl die weitgehend positive Resonanz der Fachkollegen als auch die allgemein geweckte Aufmerksamkeit für dieses neue Gebiet und dessen "Lehrbuchfähigkeit" registriert. Die dabei zum Bewußtsein gelangende Vernetzung *aller* chemischer Teildisziplinen im Bereich der Lebenswissenschaften ist letztendlich nicht überraschend, auch wenn der Begriff "bio-anorganisch" von der Wortkombination her immer noch ungewohnt erscheint.

Angesichts der absehbaren und notwendigen Reifungsphase dieses bislang explosiv gewachsenen Gebietes und der einsetzenden Systematisierung erwarten wir einerseits ein anhaltend intensives Interesse, andererseits aber auch eine solidere Grundlagenkenntnis, wie sie sich zwangsläufig aus der stark gestiegenen Popularität des Fachgebiets ergibt und wozu wir durch dieses Studienbuch weiter beitragen wollen. Bestärkt wurden diese Bemühungen durch die Verleihung des Literaturpreises 1993 des Fonds der Chemischen Industrie für die erste Auflage, wofür wir uns an dieser Stelle sehr herzlich bedanken. Als Konsequenz aus der positiven Resonanz und aus entsprechenden Aufforderungen ist die vorliegende zweite Auflage auch in englischer Sprache erschienen.

Ein herzlicher Dank geht an alle, die uns auf Mängel in der 1. Auflage und auf mögliche Verbesserungen hingewiesen haben, insbesondere an Herrn Priv.-Doz. Dr. H. Strasdeit (Oldenburg) und Herrn Prof. Dr. B. Lippert (Dortmund) sowie an viele Chemiestudenten der Universität Stuttgart. Durch Teilnahme am Schwerpunktprogramm "Bioanorganische Chemie" der Deutschen Forschungsgemeinschaft und die gewährte Förderung sind uns weiter viele Anregungen und Vorabinformationen zuteil geworden. Ohne die sorgfältige und unermüdliche Assistenz von Frau Dipl.-Chem. Angela Winkelmann schließlich wäre die Erstellung der Druckvorlage auch diesmal nicht möglich gewesen, ihr gilt daher unser ganz besonderer Dank.

Stuttgart, im Februar 1995

Wolfgang Kaim
Brigitte Schwederski

Vorwort zur 1. Auflage

Dieses Buch ist hervorgegangen aus einer zweisemestrigen Vorlesung, gehalten seit 1983 an den Universitäten Frankfurt und Stuttgart (W.K.). Für ein Verständnis werden Grundkenntnisse aus den modernen Naturwissenschaften, speziell aus der Chemie und Biochemie vorausgesetzt, wie sie nach dem Besuch einführender Vorlesungen oder bei entsprechendem Interesse für das Sachgebiet vorhanden sein sollten. Wir haben uns trotz dieser Voraussetzung entschlossen, häufiger gebrauchte Begriffe in einem *Glossar* zu erläutern; weiterhin werden einige *physikalische Untersuchungsmethoden* (dunkel unterlegt) an entsprechender Stelle im Text skizziert und in bezug auf ihre Aussagekraft eingeordnet.

Eine besondere Schwierigkeit bei der Vorstellung dieses stark interdisziplinären und auch noch nicht eindeutig abgegrenzten Gebietes betrifft die Einschränkung in der Breite und im Detail. Obwohl der Schwerpunkt bei Metalloproteinen und den Elektrolyt-Elementen liegt, haben wir wegen der Betonung der Funktionalität chemischer Elemente und wegen teilweise öffentlich-populärwissenschaftlich geführter Diskussionen auch medizinisch-therapeutische, toxikologische und umweltbezogene Aspekte einbezogen. Was einzelne Details betrifft, so können oft nur Hypothesen vorgestellt werden; angesichts der außerordentlich raschen Entwicklung auf diesem Gebiet sind *viele der strukturellen und mechanistischen Aussagen mit der Einschränkung "höchstwahrscheinlich" oder gar nur "vermutlich"* zu versehen – auch wenn dies im Text nicht immer explizit zum Ausdruck kommen kann. Wie die Literaturzusammenstellung belegt, haben wir versucht, aktuelle Informationen aus dem Jahre 1991 noch zu berücksichtigen (1. Auflage).

Ein weiteres Problem stellt die Gliederung dar:

Die Aufteilung nach Elementen würde dem chemisch-systematischen Vorgehen entsprechen, wie es in Lehrbüchern der allgemeinen und anorganischen Chemie vorherrscht. Eine Systematik dieser Art halten wir aus didaktischen Gründen zumindest teilweise noch für angebracht. Organismen verhalten sich jedoch opportunistisch und kümmern sich nicht um derartige Einteilungen; für sie steht die Funktionalität, das möglichst erfolgreiche Bewältigen einer Anforderung im Vordergrund. Entsprechend haben wir beispielsweise das Protein Hämerythrin im Zusammenhang mit Sauerstoff-Transport und nicht in einem Kapitel "Eisen-Zentren" behandelt. Mehrere Abschnitte sind so einem bestimmten biologisch-funktionalen Problem wie etwa der Biomineralisation oder der Notwendigkeit von Antioxidantien gewidmet, haben dort aber mehrere verschiedene anorganische Elemente und auch rein organische Verbindungen zum Gegenstand. Das gewählte Titelbild – eine vereinfachte Darstellung des Katalysezyklus der P-450-Monooxygenierung – veranschaulicht die Betonung von Funktionalität und Reaktivität gegenüber statisch-strukturellen Gesichtspunkten.

Einige technische Hinweise: Die inzwischen verfügbaren Strukturdarstellungen auch sehr komplexer Metalloproteine können hier in Ermangelung einer Farbkodierung nicht adäquat vorgeführt werden; an entsprechender Stelle verweisen wir auf die Originalliteratur. Die Literatur ist im Text mit den Nachnamen der **AUTOREN** zitiert (ab vier Autoren: **Autor et al.**) und am Ende des Buches kapitelweise in der Reihenfolge ihres ersten Erscheinens im Text einschließlich des Titels zusammengefaßt. Auf Kapitel (**Kap.**), Abbildungen (**Abb.**), Tabellen (**Tab.**) und Formelschemata (**X.Y**) wird wie angegeben verwiesen.

Für Hinweise und Anregungen während der Abfassung des Manuskripts danken wir Herrn Prof. Christoph Elschenbroich (Marburg) sowie Frau Dr. Jeanne Jordanov und Herrn Dr. Eberhard Roth (Grenoble). Weitere aktuelle Informationen sind uns durch die Beteiligung am Schwerpunkt "Bioanorganische Chemie" der Deutschen Forschungsgemeinschaft zugänglich geworden. Dem Teubner-Verlag, insbesondere Herrn Dr. Peter Spuhler, sind wir für die Geduld bei der Betreuung dieses Buchprojektes dankbar. Ganz besonders herzlichen Dank schulden wir schließlich Frau Dipl.-Chem. Angela Winkelmann für ihr stetiges engagiertes Mitwirken an der laufenden Bearbeitung des Manuskripts und an der Erstellung der Druckvorlage.

Stuttgart, im Juni 1991

Wolfgang Kaim
Brigitte Schwederski

Inhaltsübersicht

1 Historischer Überblick und aktuelle Bedeutung	1
2 Einige Grundlagen	6
2.1 Vorkommen und Verfügbarkeit anorganischer Elemente in Organismen	6
2.2 Biologische Funktionen anorganischer Elemente	17
2.3 "Biologische" Liganden für Metallionen	18
2.3.1 Koordination durch Proteine – Anmerkungen zur enzymatischen Katalyse	19
2.3.2 Tetrapyrrol-Liganden und andere Makrozyklen	26
2.3.3 Nukleobasen, Nukleotide und Nukleinsäuren (RNA, DNA) als Komplexliganden	36
2.4 Bedeutung von Modellverbindungen	39
3 Cobalamine einschließlich Vitamin und Coenzym B₁₂	40
3.1 Historischer Abriss und strukturelle Charakterisierung	40
3.2 Reaktionen der Alkylcobalamine	43
3.2.1 Einelektronen-Reduktion und -Oxidation	43
3.2.2 Co–C-Bindungsspaltung	43
3.2.3 Mutase-Aktivität des Coenzym B ₁₂	48
3.2.4 Alkylierungs-Reaktionen des Methylcobalamins	55
3.3 Modellsysteme und Rolle des Apoenzyms	56
4 Metalle im Zentrum der Photosynthese: Magnesium und Mangan	58
4.1 Umfang und Gesamteffektivität der Photosynthese	58
4.2 Primärprozesse der Photosynthese	60
4.2.1 Licht-Absorption (Energieaufnahme)	60
4.2.2 Excitonen-Transport (gerichtete Energieübertragung)	61
4.2.3 Ladungstrennung und Elektronentransport	65
4.3 Ankopplung chemischer Reaktionen: Die Wasseroxidation	72

5	Der anorganische Naturstoff O₂: Aufnahme, Transport und Speicherung	87
5.1	Entstehung sowie molekulare und komplexchemische Eigenschaften von Disauerstoff O ₂	87
5.2	Sauerstoff-Transport und -Speicherung mittels Hämoglobin und Myoglobin	93
5.3	Alternativer Sauerstoff-Transport in einigen Wirbellosen: Hämerythrin und Hämocyanin	108
6	Katalyse durch Hämoproteine: Elektronenübertragung, Sauerstoffaktivierung und Metabolismus anorganischer Zwischenprodukte	114
6.1	Cytochrome	116
6.2	Cytochrom P-450: Sauerstoffübertragung von O ₂ auf nicht aktivierte Substrate	120
6.3	Peroxidasen: Abbau und Verwertung des zweifach reduzierten Disauerstoffs	128
6.4	Steuerung des Reaktionsmechanismus der Oxyhäm-Gruppe – Erzeugung und Funktion organischer freier Radikale	130
6.5	Hämoproteine in der katalytischen Umsetzung teilreduzierter Stickstoff- und Schwefeloxide	132
7	Eisen-Schwefel- und andere Nichthäm-Eisen-Proteine	136
7.1	Biologische Bedeutung der Elementkombination Eisen/Schwefel	136
7.2	Rubredoxine	141
7.3	[2Fe-2S]-Zentren	142
7.4	Mehrkernige Fe/S-Cluster: Bedeutung der Proteinumgebung und katalytische Aktivität	143
7.5	Modellverbindungen für Eisen-Schwefel-Proteine	149
7.6	Eisenenzyme ohne Porphyrin- und Schwefel-Liganden	151
7.6.1	Eisenhaltige Ribonukleotid-Reduktase (RR)	152
7.6.2	Methan-Monooxygenase	154
7.6.3	Violette saure Phosphatasen (Fe/Fe und Zn/Fe)	154
7.6.4	Einkernige Nichthäm-Eisen-Enzyme	155

8 Aufnahme, Transport und Speicherung eines essentiellen Elements: Das Beispiel Eisen	158
8.1 Problematik der Eisenmobilisierung – Löslichkeit, Oxidationsstufen und medizinische Relevanz	158
8.2 Siderophore: Eisen-Aufnahme durch Mikroorganismen	160
8.3 Phytosiderophore: Aufnahme von Eisen durch Pflanzen	167
8.4 Transport und Speicherung von Eisen	168
8.4.1 Transferrin	169
8.4.2 Ferritin	173
8.4.3 Hämosiderin	178
9 Nickelhaltige Enzyme: Die steile Karriere eines lange übersehenen Biometalls	179
9.1 Überblick	179
9.2 Urease	180
9.3 Hydrogenasen	182
9.4 CO-Dehydrogenase = CO-Oxidoreduktase = Acetyl-CoA-Synthase	186
9.5 Methyl-Coenzym M-Reduktase	188
9.6 Modellverbindungen	192
10 Kupferhaltige Proteine: Die Alternative zu biologischem Eisen	193
10.1 Der Typ 1: "Blaue" Kupfer-Proteine	201
10.2 Typ 2- und Typ 3-Kupfer-Zentren in O ₂ -aktivierenden Proteinen: Sauerstofftransport und Oxygenierung	204
10.3 Kupferproteine als Oxidasen/Reduktasen	209
10.4 Cytochrom c-Oxidase	214
10.5 Cu,Zn-Superoxid-Dismutase: Ein substratspezifisches Antioxidans ..	217

11 Biologische Funktion der “frühen” Übergangsmetalle: Molybdän, Wolfram, Vanadium, Chrom	222
11.1 Sauerstoff-Übertragung durch Wolfram- und Molybdän-enhaltende Enzyme	222
11.1.1 Überblick	222
11.1.2 Der Molybdopterin-Cofaktor	223
11.2 Metalloenzyme im biologischen Stickstoffkreislauf: Molybdän-abhängige Stickstoff-Fixierung	231
11.3 Alternative Nitrogenasen	241
11.4 Biologisches Vanadium außerhalb von Nitrogenasen	244
11.5 Chrom(III) im Stoffwechsel	247
12 Zink: Enzymatische Katalyse von Aufbau- und Abbau-Reaktionen sowie strukturelle und genregulatorische Funktionen	248
12.1 Überblick	248
12.2 Carboanhydrase (CA)	252
12.3 Carboxypeptidase A (CPA) und andere Hydrolasen (Peptidasen, Proteinasen, Lipasen, Phosphatasen)	257
12.4 Katalyse von Kondensations-Reaktionen durch zinkhaltige Enzyme	262
12.5 Alkohol-Dehydrogenase (ADH) und verwandte Enzyme	263
12.6 Der “Zink-Finger” und andere genregulierende Metalloproteine	266
12.7 Insulin, hGH, Metallothionein und DNA-Reparatursysteme als zinkhaltige Proteine	269
13 Ungleich verteilte Mengenelemente: Funktion und Transport von Alkalimetall- und Erdalkalimetall-Kationen	271
13.1 Charakterisierung von K^+ , Na^+ , Ca^{2+} und Mg^{2+}	271
13.2 Komplexe von Alkali- und Erdalkalimetallionen mit Makrozyklen	277
13.3 Ionenkanäle	282
13.4 Ionenpumpen	287

14 Katalyse und Regulation bioenergetischer Prozesse durch die Erdalkalimetallionen Mg^{2+} und Ca^{2+}	291
14.1 Magnesium: Katalyse des Phosphat-Transfers durch zweiwertige Ionen	286
14.2 Calcium als Bestandteil biologischer Regelkreise	300
15 Biomineralisation: Kontrollierte Konstruktion biologischer Hochleistungsmaterialien	308
15.1 Überblick	308
15.2 Keimbildung und Kristallwachstum	314
15.3 Beispiele für Biominerale	315
15.3.1 Calciumphosphate in Wirbeltierknochen	315
15.3.2 Calciumcarbonat	319
15.3.3 Kieselsäure	320
15.3.4 Eisenoxide	322
15.3.5 Schwermetallsulfate	323
16 Biologische Bedeutung anorganischer Nichtmetall-Elemente	324
16.1 Überblick	324
16.2 Bor	324
16.3 Silicium	324
16.4 Arsen und Phosphor als Phosphan	325
16.5 Brom	326
16.6 Fluor	326
16.7 Iod	327
16.8 Selen	329

17 Die bioanorganische Chemie vorwiegend toxischer Metalle	336
17.1 Überblick	336
17.2 Blei	338
17.3 Cadmium	341
17.4 Thallium	345
17.5 Quecksilber	345
17.6 Aluminium	351
17.7 Beryllium	354
17.8 Chrom als Chromat	355
 18 Biochemisches Verhalten anorganischer Radionuklide: Strahlenbelastung und medizinischer Nutzen	 357
18.1 Überblick	357
18.2 Natürliche und künstliche Radioisotope außerhalb medizinischer Anwendungen	358
18.3 Bioanorganische Chemie von Radiopharmazeutika	363
18.3.1 Übersicht	363
18.3.2 Technetium – ein künstliches "bioanorganisches" Element	366
 19 Chemotherapie mit Verbindungen nicht-essentieller Elemente: Platin, Gold, Lithium	 369
19.1 Überblick	369
19.2 Platin-Komplexe in der Krebstherapie	369
19.2.1 Entdeckung, Anwendungsspektrum und Struktur-Wirkungs-Beziehungen	369
19.2.2 Wirkungsweise von Cisplatin	372
19.3 Cytotoxische Verbindungen anderer Metalle	378

19.4 Goldhaltige Pharmazeutika in der Therapie rheumatischer Arthritis	380
19.4.1 Historische Entwicklung	380
19.4.2 Goldverbindungen als Antirheumatika	380
19.4.3 Hypothesen über die Wirkungsweise goldhaltiger Antirheumatika	381
19.5 Lithium in der Psychopharmathérapie	382
Literaturverzeichnis	383
Glossar	437
Stichwortverzeichnis	443

Verzeichnis der Einschübe

“Harte” und “weiche” Koordinationszentren	16
“Entatischer Zustand” - Enzymatische Katalyse	24
Elektronenspinzustände bei Übergangsmetallionen	33
Elektronenspinresonanz I	45
Organische Redox-Coenzyme	52
Strukturbestimmung durch Röntgenbeugung	67
Röntgenabsorptions-Spektroskopie	77
Spin-Spin-Kopplung	81
Resonanz-RAMAN-Spektroskopie	109
MÖSSBAUER-Spektroskopie	109
Spiegelbildisomere bei oktaedrisch konfigurierten Komplexen	163
Elektronenspinresonanz II	199
“Oxidation”	225
Heteroatom-Kernresonanz (NMR)	276