

Allgemeine und Anorganische Chemie

Michael Binnewies
Maik Finze
Manfred Jäckel
Peer Schmidt
Helge Willner
Geoff Rayner-Canham

Allgemeine und Anorganische Chemie

3., vollständig überarbeitete Auflage

Maik Finze
Institut für Anorganische Chemie
Julius-Maximilians-Universität
Würzburg, Deutschland

Michael Binnewies, Manfred Jäckel
FB Chemie, Inst. Anorganische Chemie
Leibniz Universität Hannover
Hannover, Deutschland

Peer Schmidt
Fakultät 2 – Umwelt und Naturwissenschaften
Brandenburgische Technische Universität
Senftenberg, Deutschland

Helge Willner
FG Chemie
Bergische Universität Wuppertal FB C Mathematik
und Naturwissenschaften
Wuppertal, Deutschland

Geoff Rayner-Canham
Sir Wilfred Grenfell College
Memorial University of Newfoundland
Corner Brook, Kanada

ISBN 978-3-662-45066-6 ISBN 978-3-662-45067-3 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-45067-3

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2004, 2011, 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Planung: Frank Wigger

Zeichnungen: Martin Lay, Breisach a. Rh.

Einbandabbildung: (Steinsalzkristall/Kristallstruktur) Rudolf Wölki/Rudolf Wartchow, Jörg Mattik

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Spektrum ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur 3. Auflage

In den 10 Jahren seit Erscheinen der ersten Auflage hat sich das nun in der 3. Auflage vorliegende Buch einen festen Platz unter den einführenden Lehrbüchern der Allgemeinen und Anorganischen Chemie gesichert. Um dies auch für die kommenden Jahre zu gewährleisten, wurde das Autorenteam um zwei jüngere Kollegen erweitert: Prof. Maik Finze und Prof. Peer Schmidt.

Die bewährte Gliederung wurde in der 3. Auflage erhalten, Veränderungen betreffen insbesondere eine Aktualisierung des Inhalts. So wurde die Beschreibung großtechnischer Verfahren an den heutigen Stand der Technik angepasst. Auch die zunehmende Bedeutung bestimmter seltener Elemente wie Gallium und Indium für verschiedene Hightech-Produkte wird eingehender behandelt. Beispiele für neue Exkurse sind: Rohstoffe für Zukunftstechnologien, Schweißen und Löten, Magnetwerkstoffe, Wärmespeicher.

Die aktualisierten Nomenklaturempfehlungen der IUPAC aus dem Jahre 2005 haben einige Änderungen in der Nomenklatur anorganischer Verbindungen notwendig gemacht. So wird das früher als Hexacyanoferrat bekannte Anion heute als Hexacyanidoferrat bezeichnet.

Neu sind auch kurze Zusammenfassungen am Ende der meisten Kapitel. Diese Zusammenfassungen sollen Prüfungsvorbereitungen erleichtern.

Um den Umfang des Buches nicht immer weiter wachsen zu lassen, wurden manche Textpassagen gestrafft und andere – aus heutiger Sicht weniger wichtige – gestrichen.

Hinweise auf weiterhin bestehende Mängel und Anregungen zu Verbesserungen erreichen uns zuverlässig über das Lektorat von Springer Spektrum (frank.wigger@springer.com). Den Mitarbeitern des

Verlages danken wir für die erfreulich unkomplizierte Zusammenarbeit, allen voran Martina Mechler und Frank Wigger.

Michael Binnewies, Hannover
Maik Finze, Würzburg
Manfred Jäckel, Hannover
Peer Schmidt, Senftenberg
Helge Willner, Wuppertal

Mai 2016

Hinweise:

Die ausführlichen Lösungen zu den Übungsaufgaben am Ende der Kapitel stehen allen Lesern elektronisch über die Homepage des Verlages (► www.springer.com/978-3-662-45066-6) zur Verfügung. Dort finden Sie auch etwa 150 Farbfotos von Elementen, Laborchemikalien und Mineralien; siehe die Übersicht im Anschluss an den Index.

Für Dozenten ist über die Plattform Dozenten-Plus der Download sämtlicher Abbildungen und Tabellen der 3. Auflage möglich (zum Einsatz in der Lehre).

Außerdem ist weiterhin ein „Übungsbuch Allgemeine Chemie“ für Studierende verfügbar (Autoren Binnewies, Jäckel, Willner; ISBN 978-3-8274-1828-9).

Aus dem Vorwort zur 2. Auflage

Die 2004 erschienene erste Auflage dieses Lehrbuches ist überwiegend freundlich und wohlwollend aufgenommen worden. Bei der Vorbereitung der Neuauflage ging es deshalb – neben der Beseitigung kleiner Fehler und Ungereimtheiten – primär um Aktualisierungen und Verbesserungen in der Darstellung komplexer Zusammenhänge. Eine wichtige Orientierungshilfe bot uns die konstruktive Kritik aus zahlreichen Zuschriften: Sämtliche Anregungen wurden sorgfältig geprüft und – soweit sie nicht in gegenläufige Richtungen wiesen – auch weitgehend umgesetzt.

Hinzugekommen sind eine Reihe von Exkursen zu fachübergreifenden Themen wie „Ionische Flüssigkeiten“, „Einlagerungsverbindungen, Gashydrate und MOFs“, „Moissanit – ein Diamantersatz“, „Biomminerale“, „Chemie im Schwimmbad“. Neu sind auch ein Abschnitt zur Molekülsymmetrie und ein Exkurs zur Infrarot- und Raman-Spektroskopie in
▶ Kap. 5.

Die übrigen Ergänzungen betreffen sowohl allgemein-chemische Grundlagen (z. B. die Berechnung von pH-Werten) als auch wichtige Stoffe und ihre Verwendung. Die erweiterte Neufassung des Abschnitts „Einführung in die Chemie metallorganischer Verbindungen“ geht wesentlich auf die Mitarbeit unseres Wuppertaler Kollegen Fabian Mohr zurück. Ein herzliches Dankeschön dafür an dieser Stelle.

Den Anregungen mehrerer Kollegen folgend, haben wir versucht, auch neuere bindungstheoretische Konzepte zu berücksichtigen. Das betrifft vor allem die Interpretation der sogenannten *Hypervalenz* im Sinne einer *Hyperkoordination* unter Erhaltung des Oktettprinzips, die *Hyperkonjugation* und das Problem der *relativistischen Effekte*. Aufgenommen wurde auch eine zeitgemäße Darstellung zur Abstufung der Orbitalenergien im Rahmen von
▶ Kap. 2.

Vorwort zur 1. Auflage

Allgemeine und Anorganische Chemie bilden gemeinsam den Schwerpunkt der Ausbildung in den Anfangssemestern chemiebezogener Studiengänge. Das gilt sowohl für die Diplom-Studiengänge an Universitäten und Fachhochschulen als auch für Bachelor-Studiengänge, das Unterrichtsfach Chemie in Lehramtsstudiengängen und viele „Nebenfächer“. Ein Lehrbuch für diesen Bereich muss deshalb zunächst eine Brücke schlagen zwischen Schule und weiterführenden Lehrveranstaltungen. Neben einer praxisgerechten Vertiefung allgemeinchemischer Vorkenntnisse gehört dazu auch ein erster Überblick über die Vielfalt anorganischer Stoffe sowie eine Auswahl an ausbaufähigen Konzepten, die ein Verständnis für den Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaften ermöglichen.

Aufgrund der heute kaum noch überschaubaren Anzahl anorganischer Verbindungen kann ein einführendes Lehrbuch nur exemplarisch vorgehen. Im Mittelpunkt der Kapitel zur Chemie der Elemente stehen deshalb praxisnahe Beispiele aus Labor und Technik. Besonders berücksichtigt werden auch die wichtigsten Laborreagenzien und ihr Verhalten in wässriger Lösung. Einblicke in die Systematik anorganischer Stoffe geben die relativ kurzen Abschnitte zur Chemie wichtiger Stoffklassen. Gelegentlich werden auch interessante neuere Forschungsergebnisse aufgenommen.

Zahlreiche Exkurse ergänzen die Darstellung grundlegender Inhalte der Allgemeinen und Anorganischen Chemie. Sie beziehen sich überwiegend auf wichtige Untersuchungsmethoden (z. B. NMR-Spektroskopie), Umweltaspekte (z. B. Luftschadstoffe), Chemie in Natur, Alltag und Technik (z. B. Tropfsteinhöhlen, Wasserhärte, Laser, Lichtwellenleiter) oder historische Zusammenhänge (z. B. Entdeckung der Fullerene). Zusätzlich gefördert wird der Blick über den Tellerrand hinaus durch Abschnitte zu Biologischen Aspekten am Ende der meisten Kapitel.

Der vorliegende Lehrbuchtext ist eine stark erweiterte Bearbeitung des 2000 in 2. Auflage (bei Freeman, New York) erschienenen Titels *Descriptive Inorganic Chemistry* von Geoff Rayner-Canham. Das dort realisierte Konzept entsprach in vielen Punkten unserer Vorplanung, sodass zahlreiche

Abschnitte und Exkurse sowie die Mehrzahl der Übungsaufgaben ohne wesentliche Änderungen übernommen werden konnten (ohne diese Basis wäre es uns kaum möglich gewesen, das für Spektrum Akademischer Verlag geplante Lehrbuch in einem vertretbaren Zeitrahmen zu realisieren). Unterschiedliche Vorstellungen über das didaktische Konzept im Bereich der Allgemeinen Chemie erforderten jedoch Kürzungen, Umstellungen oder größere Ergänzungen. Völlig neu sind die ► Kap. 1, 8, 9, 12, 13 sowie die Anhänge A und B. Erhebliche Erweiterungen im Bereich der Anorganischen Chemie betreffen neben der Stoffsystematik insbesondere Reaktionen, die in den Praktika des Grundstudiums – z. B. in der Analytischen Chemie – häufig angewendet werden. Hinzugekommen sind auch zahlreiche Abschnitte und Exkurse über anorganische Stoffe in Alltag, Technik und Umwelt. Neben Hilfen zum Verständnis grundlegender Zusammenhänge und der Vermittlung des Basiswissens geht es damit auch um fachübergreifende Aspekte und Beiträge zu einer „chemischen Allgemeinbildung“.

Wir hoffen, dass sich das Lehrbuch – trotz (oder gerade wegen) der Fülle des Materials – auch dann bewährt, wenn enger begrenzte Ziele im Vordergrund stehen:

- Verständnis für das Reaktionsverhalten einzelner Stoffe
- Sicherung von Basiswissen bzw. Vertiefung im Bereich grundlegender Konzepte der Allgemeinen Chemie (z. B. für die Vorbereitung auf Klausuren)
- Überblick über die Chemie einzelner Elemente und die praktische Bedeutung der wichtigsten Verbindungen (z. B. für die Vorbereitung auf eine Prüfung)

Übungsaufgaben am Ende der einzelnen Kapitel sollen helfen, Sicherheit im Umgang mit Regeln und Gesetzmäßigkeiten zu erreichen und den Lernerfolg zu kontrollieren. Die ausführlichen Lösungen der Aufgaben sind über die Internet-Adresse ► www.spektrum-verlag.de/binnewies abrufbar.

Die Ausbildung im Bereich der Allgemeinen und Anorganischen Chemie ist keineswegs einheitlich

strukturiert; Unterschiede in Auswahl und Gewichtung der Themen kommen hinzu. Die Kapitel dieses Buches sind deshalb in der Regel so aufgebaut, dass sie – einige Grundlagenkenntnisse vorausgesetzt – in nahezu beliebiger Abfolge verwendbar sind (einzelne weiterführende Abschnitte müssen dabei ggf. übersprungen werden).

Um die Haupttexte zu entlasten, werden Kurztexte mit Beispielen, fachlichen Vertiefungen und Zusatzinformationen verschiedenster Art häufig in der Randspalte platziert. Bei den dort zu findenden Kurzbiographien wichtiger Wissenschaftler sind lebende Forscher nur aufgenommen, wenn sie mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurden.

Die als Anhänge A und B aufgenommenen ergänzenden Kapitel erläutern einige grundlegende Begriffe und elementare Zusammenhänge aus Physik und Mathematik. Diese kurzen Texte sollen Studienanfängern helfen, Vorkenntnisse aufzufrischen, und ihnen so den Start in die Chemie erleichtern.

Der Anhang C enthält eine umfangreiche, mit Sorgfalt zusammengetragene Datensammlung mit physikalisch-chemischen Größen zahlreicher Stoffe und Teilchenarten. Weitere Orientierungshilfen bieten das Glossar und Hinweise auf weiterführende Literatur.

Ergänzt wird das Lehrbuch durch die beiliegende CD-ROM. Sie enthält sämtliche Abbildungen und Tabellen des Lehrbuchs (in bearbeitbarer Form). Zahlreiche Aufnahmen von Mineralien und (farbigen) Chemikalien vermitteln ästhetische Eindrücke und helfen auch, wichtige Lerninhalte aus der Welt der Stoffe bildhaft in Erinnerung zu behalten. Die Fotos der Mineralien (aus der Sammlung des Instituts für Mineralogie der Universität Hannover) verdanken wir Rudolf Wölki. Die meisten übrigen Aufnahmen stammen von Herrn Dr. Zimmermann, Universität Duisburg. Die CD-Applikation wurde von Alexander Willner entwickelt.

Eine ganze Reihe von Personen haben durch ihr wohlwollendes Interesse und zahlreiche Hinweise, Ratschläge und Hilfestellungen die Erarbeitung des Lehrbuches entscheidend gefördert. So wurden beispielsweise einzelne Kapitel von den Kollegen Peter Behrens, Dietrich Feldmann, Hermann Josef Frohn, Paul Heitjans, Jürgen Janek, Gerhard Holste, Hartmut Plautz und Werner Urland sowie Herrn

Uwe Lins kritisch durchgesehen. Rudolf Wartchow und Jörg Mattik erstellten die überwiegende Mehrzahl der Kristallstruktur-Darstellungen. Die Reaktionsschemata am Ende der Kapitel gestaltete Herr Dr. Stefan von Ahsen, Universität Duisburg.

Eine wichtige Arbeitsgrundlage bildete die von Saskya Speer, Heiko Strugalla und Peter Ripplinger im Auftrag des Verlags angefertigte Übersetzung von Geoff Rayner-Canhams *Descriptive Inorganic Chemistry*. Thomas Burchardt, Sebastian Mros und Gunnar Söhlke haben dann später die Texterweiterungen und vielfachen Korrekturen elektronisch erfasst. Zahlreiche Verbesserungen im Einzelnen steuerte Frau Dr. Angela Simeon als Außenlektorin bei. Sie verfasste auch die Randnotizen mit biographischen Angaben zu den im Text erwähnten Wissenschaftlern.

Allen Beteiligten sagen wir an dieser Stelle ein herzliches Dankeschön. Unser Dank gilt auch den Mitarbeitern des Verlags für die konstruktive Zusammenarbeit, insbesondere unseren ständigen Ansprechpartnern Martina Mechler und Frank Wigger. Wenn trotz professioneller Hilfe bei der Einarbeitung der Korrekturen gelegentlich ein Fehler, eine Unklarheit oder eine allzu grobe Vereinfachung übersehen wurde, bleibt die Verantwortung bei uns. Hinweise auf wünschenswerte Verbesserungen sind uns jederzeit willkommen.

Michael Binnewies

Manfred Jäckel

Helge Willner

Hannover bzw. Wuppertal

September 2003

Kurzinhalt

1	Einführung: Regeln und Normen erleichtern die Verständigung	1
2	Aufbau der Atome	15
3	Ein Überblick über das Periodensystem	47
4	Die Ionenbindung	73
5	Die kovalente Bindung	97
6	Die metallische Bindung	139
7	Thermodynamik anorganischer Stoffe	155
8	Reine Stoffe und Zweistoffsysteme	181
9	Das chemische Gleichgewicht	223
10	Säuren und Basen	247
11	Oxidation und Reduktion	287
12	Komplexreaktionen	323
13	Geschwindigkeit chemischer Reaktionen	353
14	Wasserstoff	373
15	Die Elemente der Gruppe 1: Die Alkalimetalle	395
16	Die Elemente der Gruppe 2: Die Erdalkalimetalle	425
17	Die Elemente der Gruppe 13	451
18	Die Elemente der Gruppe 14: Die Kohlenstoffgruppe (Tetrele)	481
19	Die Elemente der Gruppe 15 (Pentele)	547
20	Die Elemente der Gruppe 16: Die Chalkogene	615
21	Die Elemente der Gruppe 17: Die Halogene	663
22	Die Elemente der Gruppe 18: Die Edelgase	697
23	Einführung in die Chemie der Übergangsmetalle	709
24	Die Nebengruppenelemente	753

25	Lanthanoide, Actinoide und verwandte Elemente	847
26	Anhang A: Einige Grundbegriffe der Physik	869
27	Anhang B: Mathematische Grundlagen	891
28	Anhang C: Datensammlung	907
	Serviceteil	939

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung: Regeln und Normen erleichtern die Verständigung	1
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i>	
	<i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
1.1	Reaktionsgleichungen und Reaktionsschemata	3
1.2	Größen und Einheiten	5
1.3	Nomenklatur – systematisch oder traditionell?	11
2	Aufbau der Atome	15
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i>	
	<i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
2.1	Atomkern und Elementarteilchen	16
2.2	Kernreaktionen	23
2.3	Der Aufbau der Elektronenhülle	29
	Die Schrödinger-Gleichung und ihre Bedeutung	32
	Die Form der Atomorbitale	35
	Besetzung der Orbitale mit Elektronen	38
	Elektronenkonfigurationen von Ionen	43
	ÜBUNGEN	45
3	Ein Überblick über das Periodensystem	47
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i>	
	<i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
3.1	Das moderne Periodensystem	50
3.2	Die Entstehung der Elemente	53
	Stabilität der Elemente und ihrer Isotope	53
3.3	Einteilung der Elemente	56
3.4	Periodische Eigenschaften: Atomradius	59
	Die Slater-Regeln	61
3.5	Periodische Eigenschaften: Ionisierungsenergie	62
3.6	Periodische Eigenschaften: Elektronenaffinität	65
3.7	Biochemie der Elemente	66
	ÜBUNGEN	68
4	Die Ionenbindung	73
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i>	
	<i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
4.1	Eigenschaften ionischer Verbindungen	75
4.2	Polarisierung und Kovalenz	78
4.3	Hydratation von Ionen	80
4.4	Ionengitter	81
	Die dichteste Kugelpackung	82
	Aufbau einfacher AB-Verbindungen	87
	Aufbau einfacher AB ₂ -Verbindungen	89
	Ausnahmen von den Regeln	91
	Kristallstrukturen mit komplexen Ionen	92
	ÜBUNGEN	94

5	Die kovalente Bindung	97
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt, Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
5.1	Lewis-Konzept und Oktettregel	98
5.2	Gebrochene Bindungsordnungen und das Konzept der Mesomerie	99
5.3	Formalladungen	100
5.4	Das Valenzschalen-Elektronenpaar-Abstoßungsmodell (VSEPR-Modell)	102
	Lineare Geometrie	103
	Trigonal-planare Geometrie	103
	Tetraedrische Geometrie	104
	Trigonal-bipyramidale Geometrie	105
	Oktaedrische Geometrie	106
	Mehr als sechs Bindungspartner	107
5.5	Stoffe mit kovalenten Netzwerken	108
5.6	Intermolekulare Kräfte	109
	Dispersionskräfte	109
5.7	Elektronegativität und polare Bindung	110
5.8	Dipol/Dipol-Wechselwirkungen	112
5.9	Wasserstoffbrückenbindungen	114
5.10	Die Valenzbindungstheorie (VB-Theorie)	114
	Hybridisierung von Orbitalen	115
5.11	Einführung in die Molekülorbitaltheorie (MO-Theorie)	117
	Molekülorbitale zweiatomiger Moleküle der ersten Periode	119
	Molekülorbitale zweiatomiger Moleküle der zweiten Periode	121
	Molekülorbitale heteronuklearer zweiatomiger Moleküle	125
5.12	Molekülsymmetrie	128
	Symmetrioperationen	128
	Punktgruppen	129
	ÜBUNGEN	135
6	Die metallische Bindung	139
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt, Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
6.1	Bindungsmodelle für Metalle und Halbleiter	141
	Das Bändermodell	141
	Halbleiter, Dotierung	143
	Die Struktur der Metalle	145
6.2	Bindungstypen im Vergleich	147
	Das Bindungsdreieck	148
	Periodische Trends im Bindungsverhalten	148
	ÜBUNGEN	154
7	Thermodynamik anorganischer Stoffe	155
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt, Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
7.1	Energieumsatz bei chemischen Reaktionen	156
	Enthalpie	157
	Von der Bildungsenthalpie zur Reaktionsenthalpie	158
7.2	Ermittlung der Gitterenthalpie ionischer Verbindungen – der Born-Haber-Kreisprozess	162
	Warum gibt es weder MgF_3 noch MgF ?	163
7.3	Theoretische Berechnung der Gitterenergie – Coulomb-Energie und Madelung-Konstante	164
7.4	Thermodynamik des Lösevorgangs ionischer Verbindungen	167

7.5	Bildung kovalenter Verbindungen	170
7.6	Entropie	170
7.7	Die freie Enthalpie als treibende Kraft einer Reaktion	172
	ÜBUNGEN	176
8	Reine Stoffe und Zweistoffsysteme	181
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i> <i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
8.1	Ideale und reale Gase	182
	Das ideale Gas	182
	Reale Gase	186
	Gasgemische	188
8.2	Flüssigkeiten	188
8.3	Kristalline Feststoffe	190
8.4	Amorphe Stoffe und Gläser	194
8.5	Phasendiagramme reiner Stoffe	195
8.6	Lösungen	199
	Löslichkeit von Gasen	200
	Mischbarkeit von Flüssigkeiten	201
8.7	Dampfdruck einer Lösung – Siedetemperaturerhöhung und Schmelztemperaturerniedrigung	203
8.8	Osmose und Umkehrosmose	205
8.9	Siedediagramme, Destillation und Rektifikation	206
	Azeotrope lassen sich durch Destillation nicht trennen	207
8.10	Schmelzdiagramme und Kristallisation	209
8.11	Moderne Trennverfahren, Chromatographie	214
	Chromatographische Verfahren	215
	ÜBUNGEN	220
9	Das chemische Gleichgewicht	223
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i> <i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
9.1	Umkehrbare Reaktionen und chemisches Gleichgewicht	225
	Gleichgewichtsverschiebung und das Prinzip des kleinsten Zwangs	226
9.2	Quantitative Beschreibung des chemischen Gleichgewichts	229
	Löslichkeitsgleichgewicht und Löslichkeitsprodukt	229
	Homogene Gleichgewichte und das Massenwirkungsgesetz	234
	Heterogene Gleichgewichte	236
	Berechnung von Gleichgewichtskonzentrationen und -drücken	236
	Gekoppelte Gleichgewichte	238
9.3	Massenwirkungsgesetz und chemische Energetik	241
	ÜBUNGEN	243
10	Säuren und Basen	247
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i> <i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
10.1	Das Brønsted-Lowry-Konzept	250
10.2	Quantitative Beschreibung von Säure/Base-Gleichgewichten in wässriger Lösung	252
	Säurekonstante und Basenkonstante	252
	Berechnung von pH-Werten	255
10.3	Säure/Base-Titration und Titrationskurven	258
	Pufferlösungen in der Praxis – ideales und reales Verhalten	262
10.4	Trends im Säure/Base-Verhalten	265
	Säurestärke und Moleküleigenschaften	266

	Hydratisierte Metallkationen als Brønsted-Säuren	268
	Säure/Base-Verhalten von Oxiden	270
10.5	Säuren und Basen nach Lewis	271
10.6	Harte und weiche Säuren und Basen nach Pearson	271
	Anwendung des HSAB-Konzepts	276
	ÜBUNGEN	282
11	Oxidation und Reduktion	287
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i> <i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
11.1	Regeln zur Bestimmung von Oxidationszahlen	289
	Oxidationszahl und Formalladung	292
	Oxidationszahlen und Periodensystem	292
11.2	Redoxgleichungen	293
11.3	Spannungsreihe und Standard-Elektrodenpotenzial	296
11.4	Die Nernst'sche Gleichung	299
11.5	Redox-Reaktionen in der analytischen Chemie	303
11.6	Elektrodenpotenzial und Energieumsatz bei Redox-Reaktionen	304
11.7	Oxidationszustands-/Frost-Diagramme	306
11.8	Elektrolyse	309
11.9	Galvanische Spannungsquellen	312
11.10	Korrosion und Korrosionsschutz	315
	ÜBUNGEN	317
12	Komplexreaktionen	323
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i> <i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
12.1	Grundbegriffe der Komplexchemie	326
12.2	Nomenklatur der Komplexverbindungen	329
12.3	Isomerie bei Komplexverbindungen	330
	Strukturisomerie	331
12.4	Beschreibung von Ligandenaustauschreaktionen durch Stabilitätskonstanten	332
	Stabilitätskonstanten	333
12.5	Chelatkomplexe	335
	Der Chelateffekt	338
12.6	Komplexe und Komplexometrie	341
	Bestimmung der Wasserhärte	344
12.7	Biologische Aspekte	345
	ÜBUNGEN	348
13	Geschwindigkeit chemischer Reaktionen	353
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i> <i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
13.1	Grundbegriffe	355
13.2	Geschwindigkeitsgesetze und Reaktionsordnung	357
13.3	Warum steigt die Reaktionsgeschwindigkeit mit der Temperatur?	363
	ÜBUNGEN	371
14	Wasserstoff	373
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i> <i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
14.1	Isotope des Wasserstoffs	374
14.2	Eigenschaften des Wasserstoffs	379

	Herstellung von Wasserstoff.....	381
14.3	Element/Wasserstoff-Verbindungen	383
	Ionische Hydride	383
	Kovalente Element/Wasserstoff-Verbindungen.....	383
	Metallische Hydride der d-Block-Elemente	387
14.4	Wasser und Wasserstoffbrückenbindungen	387
	Biologische Aspekte der Wasserstoffbrückenbindung	389
	ÜBUNGEN.....	391
15	Die Elemente der Gruppe 1: Die Alkalimetalle	395
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i>	
	<i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
15.1	Die Eigenschaften der Elemente.	397
15.2	Eigenschaften der Alkalimetallverbindungen	398
	Flammenfärbungen	399
15.3	Löslichkeitstrends bei Salzen der Alkalimetalle	401
15.4	Lithium und seine Verbindungen	405
15.5	Natrium: Gewinnung und Verwendung des Metalls.	408
15.6	Verbindungen mit Sauerstoff.	409
15.7	Hydroxide.	411
	Herstellung von Natriumhydroxid	411
	Verwendung von Natriumhydroxid.....	413
15.8	Gewinnung von Natriumchlorid und Kaliumchlorid	413
15.9	Natriumcarbonat	415
	Herstellung von Natriumcarbonat.....	415
	Verwendung von Natriumcarbonat.....	417
	Natriumhydrogencarbonat	417
15.10	Ähnlichkeiten zwischen Lithium und den Erdalkalimetallen	418
15.11	Biologische Aspekte	419
	ÜBUNGEN.....	421
16	Die Elemente der Gruppe 2: Die Erdalkalimetalle	425
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i>	
	<i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
16.1	Eigenschaften der Erdalkalimetallverbindungen	428
	Löslichkeit der Erdalkalimetallsalze	428
16.2	Beryllium	430
16.3	Magnesium	431
16.4	Calcium, Strontium und Barium	433
16.5	Oxide	434
16.6	Hydroxide	435
16.7	Calciumcarbonat	435
16.8	Zement	436
16.9	Erdalkalimetallsalze in Alltag und Technik	439
	Magnesiumsulfat und Calciumsulfat.....	439
	Calciumchlorid.....	440
	Calciumcarbid.....	441
	Strontium- und Bariumverbindungen in der Technik	442
16.10	Ähnlichkeiten zwischen Beryllium und Aluminium	442
16.11	Biologische Aspekte	443
	ÜBUNGEN.....	446

17	Die Elemente der Gruppe 13	451
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt, Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
17.1	Bor und seine Verbindungen mit Sauerstoff	453
17.2	Borane	456
	Natriumtetrahydridoborat: Na[BH ₄]	457
17.3	Borhalogenide	460
17.4	Isoelektronische Bor/Stickstoff- und Kohlenstoffverbindungen	462
17.5	Aluminium und seine Eigenschaften	463
	Chemische Eigenschaften des Aluminiums	465
17.6	Herstellung von Aluminium	466
17.7	Aluminiumhalogenide	469
17.8	Gallium und Indium	469
17.9	Thallium und der Inert-Pair-Effekt	471
17.10	Ähnlichkeiten zwischen Bor und Silicium	473
17.11	Biologische Aspekte	474
	ÜBUNGEN	476
18	Die Elemente der Gruppe 14: Die Kohlenstoffgruppe (Tetrele)	481
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt, Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
18.1	Kohlenstoff und seine Modifikationen	484
	Diamant	484
	Graphit	485
	Fullerene	487
	Kohlenstoffprodukte in Alltag und Technik	488
18.2	Isotope des Kohlenstoffs	490
18.3	Carbide	492
	Ionische Carbide	492
	Kovalente Carbide	493
	Metallische Carbide	494
18.4	Kohlenstoffmonoxid	494
18.5	Kohlenstoffdioxid	495
18.6	Hydrogencarbonate und Carbonate	499
	Hydrogencarbonate	499
	Carbonate	500
18.7	Der Treibhauseffekt	500
18.8	Kohlenstoffdisulfid und Kohlenstoffoxidsulfid	504
18.9	Die Halogenide des Kohlenstoffs	505
18.10	Chlorfluorkohlenwasserstoffe (CFKs) und verwandte Verbindungen	506
18.11	Methan	507
18.12	Cyanide	508
18.13	Silicium – das Element der Halbleiter- und Solartechnik	509
18.14	Molekülverbindungen des Siliciums	513
18.15	Siliciumdioxid	516
	Kieselgel	517
	Aerosile	517
18.16	Silicate und Alumosilicate	519
	Zeolithe	522
18.17	Gläser	524
18.18	Keramische Werkstoffe	527
18.19	Silicone	528
18.20	Germanium, Zinn und Blei	531

	Oxidationsstufen im Überblick	532
	Zinn- und Bleioxide	534
	Zinn- und Bleichloride	534
18.21	Biologische Aspekte	537
	Der Kohlenstoffkreislauf	537
	Silicium – ein essenzielles Element	538
	Toxische Zinnverbindungen	539
	Gesundheitsgefahren durch Bleiverbindungen	539
	ÜBUNGEN	541
19	Die Elemente der Gruppe 15 (Pentete)	547
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i>	
	<i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
19.1	Elementarer Stickstoff und seine Reaktionen	552
19.2	Überblick über die Chemie des Stickstoffs	555
19.3	Ammoniak und Ammoniumsalze	556
	Stickstoffdünger und die großtechnische Ammoniaksynthese	558
19.4	Weitere Wasserstoffverbindungen des Stickstoffs	561
	Hydrazin	562
	Stickstoffwasserstoffsäure	562
	Hydroxylamin	563
19.5	Stickstoffoxide	563
	Distickstoffoxid	563
	Stickstoffmonoxid	564
	Distickstofftrioxid	566
	Stickstoffdioxid und Distickstofftetraoxid	566
	Stickstoff(V)-oxid	567
19.6	Oxosäuren des Stickstoffs und ihre Salze	570
	Salpetrige Säure und Nitrite	570
	Salpetersäure und Nitrate	571
	Ostwald-Verfahren	572
	Nitrate	573
19.7	Stickstoff/Halogen-Verbindungen	575
19.8	Elementarer Phosphor und seine Modifikationen	577
	Industrielle Phosphorgewinnung	579
19.9	Oxosäuren des Phosphors und ihre Salze	580
	Phosphorsäure und ihre Salze	581
	Kondensierte Phosphorsäuren und ihre Salze	583
19.10	Phosphoroxide und Phosphorsulfide	585
	Phosphoroxide	585
	Phosphorsulfide	586
19.11	Phosphor/Halogen-Verbindungen	586
	Phosphor(III)-halogenide	586
	Phosphor(V)-halogenide	588
	Phosphor(V)-oxidchlorid und Phosphor(V)-sulfidchlorid	590
19.12	Phosphor/Wasserstoff-Verbindungen (Phosphane) und Metallphosphide	591
	Phosphan	591
	Höhere Phosphane	592
	Metallphosphide	593
19.13	Phosphor/Stickstoff-Verbindungen	594
19.14	Arsen, Antimon und Bismut	596
	Sauerstoff- und Schwefelverbindungen	597
	Halogenverbindungen	598

19.15	Biologische Aspekte	599
	Stickstoff	599
	Phosphor	604
	Arsen	605
	ÜBUNGEN	608
20	Die Elemente der Gruppe 16: Die Chalkogene	615
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt, Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
20.1	Sauerstoff	620
	Sauerstoff (O ₂)	620
	Ozon (O ₃)	623
20.2	Bindungsverhältnisse in Sauerstoffverbindungen	626
20.3	Wasser	629
20.4	Wasserstoffperoxid (H₂O₂)	630
20.5	Schwefel	631
	Modifikationen des Schwefels	632
	Industrielle Gewinnung von Schwefel	634
20.6	Schwefelwasserstoff und Sulfide	635
20.7	Oxide des Schwefels	638
	Schwefeldioxid, Schweflige Säure und ihre Salze	638
	Schwefeltrioxid	640
	Schwefelsuboxide	641
20.8	Schwefelsäure (H₂SO₄)	642
	Industrielle Herstellung von Schwefelsäure	643
	Sulfate und Hydrogensulfate	646
	Thiosulfate	647
	Peroxidodisulfate	648
	Oxosäuren des Schwefels im Überblick	648
20.9	Schwefelhalogenide und Schwefel/Stickstoff-Verbindungen	649
	Schwefelfluoride	650
	Schwefelchloride und -bromide	652
	Thionyl- und Sulfurylhalogenide	653
	Schwefel/Stickstoff-Verbindungen	653
20.10	Selen und Tellur	654
	Oxide und Oxosäuren	655
	Halogenide	656
20.11	Biologische Aspekte	656
	Sauerstoff	656
	Schwefel	657
	Selen	657
	ÜBUNGEN	659
21	Die Elemente der Gruppe 17: Die Halogene	663
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt, Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
21.1	Gewinnung und Verwendung der Halogene	670
21.2	Halogenwasserstoffe und Halogenide	673
	Ionische Halogenide	676
	Kovalente Halogenide	678
21.3	Sauerstoffsäuren der Halogene und ihre Salze	679
	Sauerstoffsäuren des Chlors	679
	Sauerstoffsäuren des Broms	681

	Sauerstoffsäuren des Iods.....	682
21.4	Halogenoxide	683
21.5	Interhalogenverbindungen, Polyhalogenid-Ionen und Halogen-Kationen	686
	Interhalogenverbindungen	686
	Polyhalogenid-Ionen	687
	Halogen-Kationen	688
	Pseudohalogenide und Pseudohalogene	689
21.6	Biologische Aspekte	690
	ÜBUNGEN.....	692
22	Die Elemente der Gruppe 18: Die Edelgase	697
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i> <i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
22.1	Gewinnung und Verwendung der Edelgase	699
22.2	Edelgasverbindungen	700
	Xenonfluoride.....	701
	Xenonoxide	703
	Wie lassen sich Xe/O-, Xe/N- und Xe/C-Bindungen knüpfen?	704
22.3	Biologische Aspekte	705
	ÜBUNGEN.....	707
23	Einführung in die Chemie der Übergangsmetalle	709
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i> <i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
23.1	Bindungskonzepte für Übergangsmetallverbindungen im Überblick	711
	Die 18-Valenzelektronen-Regel.....	713
	Die Valenzbindungstheorie	713
23.2	Die Kristallfeldtheorie – Grundlagen	714
	Oktaedrische Komplexe	716
	Tetraedrische Komplexe	719
	Quadratisch-planare Komplexe	719
	Der Jahn-Teller-Effekt.....	720
23.3	Die Kristallfeldtheorie – Anwendungen	721
	Magnetische Eigenschaften und ihre Deutung	722
	Kristallfeldeffekte bei Spinellen	726
	Hydratationsenthalpien	727
	Farben und Absorptionsspektren der Übergangsmetallkomplexe	728
23.4	Anwendung der Molekülorbitaltheorie auf Übergangsmetallkomplexe	731
23.5	Einführung in die Chemie metallorganischer Verbindungen	734
	Carbonylkomplexe	735
	Metallorganische Verbindungen der Hauptgruppenelemente.....	738
	Metallorganische Verbindungen der Übergangsmetalle	740
	Metallorganische Verbindungen als Katalysatoren.....	742
23.6	Thermodynamik und Kinetik bei Koordinationsverbindungen	746
23.7	Das HSAB-Konzept in der Chemie der Übergangsmetalle	747
23.8	Biologische Aspekte	748
	ÜBUNGEN.....	750
24	Die Nebengruppenelemente	753
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i> <i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
24.1	Ein Überblick über die d-Block-Elemente	755
	Gruppeneigenschaften	755

	Relative Stabilität der Oxidationsstufen der 3d-Metalle	757
24.2	Gewinnung der Metalle	759
	Eisen – vom Eisenerz zum Stahl	760
	Zink	764
	Kupfer – vom Erz zum Elektrolytkupfer	765
	Gold – die Cyanidlaugerei	766
	Titan – das Kroll-Verfahren	766
	Das aluminothermische Verfahren	768
24.3	Die Elemente der Gruppe 4: Titan, Zirconium und Hafnium	769
	Titan	770
	Zirconium und Hafnium	773
24.4	Die Elemente der Gruppe 5: Vanadium, Niob und Tantal	775
	Biologische Aspekte	778
24.5	Die Elemente der Gruppe 6: Chrom, Molybdän und Wolfram	778
	Chrom	778
	Molybdän und Wolfram	783
	Biologische Aspekte	791
24.6	Die Elemente der Gruppe 7: Mangan, Technetium und Rhenium	793
	Oxidationsstufen von Mangan	793
24.7	Die Eisenmetalle: Eisen, Cobalt und Nickel	798
	Die Eisenmetalle im Überblick	799
	Eisen	801
	Cobalt	808
	Nickel	810
24.8	Die Platinmetalle	812
	Komplexverbindungen	813
	Biologische Aspekte	816
24.9	Die Elemente der Gruppe 11: Kupfer, Silber und Gold	816
	Die Elemente	817
	Oxidationsstufen	818
	Stereochemie	819
	Kupfer	819
	Silber	824
	Gold	825
	Biologische Aspekte	827
24.10	Die Elemente der Gruppe 12: Zink, Cadmium und Quecksilber	828
	Die Elemente	828
	Oxidationsstufen	829
	Zink- und Cadmium-Verbindungen	830
	Quecksilber	832
	Biologische Aspekte	834
	ÜBUNGEN	840
25	Lanthanoide, Actinoide und verwandte Elemente	847
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt,</i> <i>Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
25.1	Die Lanthanoide	849
	Verbindungen	854
25.2	Die Actinoide	859
25.3	Die Transactinoide	864
	ÜBUNGEN	867

26	Anhang A: Einige Grundbegriffe der Physik	869
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt, Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
26.1	Mechanik	870
	Bewegung von Körpern	870
	Arbeit, Energie und Leistung	873
	Mechanische Eigenschaften von Flüssigkeiten	875
26.2	Schwingungen	877
26.3	Wellen	878
26.4	Elektrizität	880
26.5	Optik	886
27	Anhang B: Mathematische Grundlagen	891
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt, Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
27.1	Rechnen mit Potenzen und Wurzeln	892
27.2	Logarithmen	894
27.3	Funktionen und ihre grafische Darstellung	897
27.4	Algebraische Gleichungen	904
28	Anhang C: Datensammlung	907
	<i>Michael Binnewies, Maik Finze, Manfred Jäckel, Peer Schmidt, Helge Willner, Geoff Rayner-Canham</i>	
28.1	Bindungsenthalpien von Einfachbindungen (in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ bei 298 K)	908
28.2	Bindungsenthalpien einiger Mehrfachbindungen (in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ bei 298 K)	909
28.3	Physikalische Eigenschaften anorganischer Stoffe	909
28.4	Löslichkeit anorganischer Verbindungen in Wasser bei verschiedenen Temperaturen	925
28.5	Ionisierungsenthalpien für die schrittweise Ionisierung der Atome bei 25 °C (in $\text{MJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	929
28.6	Elektronenaffinitäten einiger Atome (Enthalpiewerte bei 25 °C in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	931
28.7	Elektronenaffinitäten einiger einfach negativer Ionen (Enthalpiewerte bei 25 °C in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	932
28.8	Ionenradien und Ladungsdichten ausgewählter Ionen	932
28.9	Radien einiger mehratomiger Ionen	937
28.10	Gitterenthalpien einiger Salze bei 25 °C (in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	937
28.11	Hydratationsenthalpien einiger Ionen bei 25 °C	938
	Serviceteil	939
	Glossar	940
	Weiterführende Literatur	950
	Stichwortverzeichnis	951