

# **Chemie**

## **Ein Lehrbuch für Ingenieure**





Edition  
Harri   
Deutsch 

# Chemie

## Ein Lehrbuch für Ingenieure

von

Roland Pfestorf

**9., korrigierte Auflage**

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG  
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

**Europa-Nr.: 54487**

**Autoren:**

Dr. Johannes Kunisch	Kapitel 1, 2, 7.1–7.8, 8, 9.1, 26–34
Prof. Dr. Roland Pfestorf	Kapitel 3–6, 7.9, 8, 10, 19.5
Dr. Karl-Heinz Lautenschläger	Kapitel 9.2, 9.3, 11–19.4, 20–25
Dr. Heinz Kadner	verantwortete bis zur 7. Auflage die Kapitel 3 bis 6

**Herausgeber:**

Prof. Dr. Roland Pfestorf, ehemals Professor für Chemie/Physikalische Chemie an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (FH), vorher Universität Leipzig.  
rpfestorf@t-online.de

9., korrigierte Auflage 2013

Druck 5 4 3 2

ISBN 978-3-8085-5448-7

ISBN 978-3-8085-5839-3 (E-Book)

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2013 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten

<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: Satzherstellung Dr. Naake, 09618 Brand-Erbisdorf

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Druck: BALTO print, Vilnius LT-08217, Litauen

## Vorwort

Auch im Zeitalter der Globalisierung und der Informationsverwaltung muss ein Mindestmaß an chemischen Grundkenntnissen zum Verständnis von Stoffeigenschaften und Stoffwandlungsprozessen vorausgesetzt werden. Dabei wird das massive Vordringen von Informations- und Kommunikationstechnik für das gegenwärtige und zukünftige Bildungswesen auch auf diesem Gebiet zu einer großen Herausforderung. Im Rahmen dieses Buches wird das Wissen um prinzipielle chemische Zusammenhänge den stofflich orientierten Kapiteln vorangestellt, deren Inhalt man sich bei Bedarf – vor allem zum Verständnis bestimmter chemischer und technologischer Problemstellungen – aneignen kann.

Ob Materialwissenschaften, Werkstoff- bzw. Umwelttechnik oder Nano- und Biotechnologie, keine dieser Fachdisziplinen kommt ohne solide chemische Grundkenntnisse aus. Viele Nichtfachleute fürchten heute – teilweise unberechtigt – aufgrund des fehlenden chemischen Sachverstandes vermeintliche Risiken durch Chemikalien in Lebensmitteln, im Wasser, im häuslichen Umfeld und global in unserer Umwelt. Chemiker und Ingenieure mit entsprechender Spezialisierung sollten durch objektive und fundierte Urteile diesem Trend entgegenwirken können.

Dazu wurde auch das vorliegende Lehrbuch, welches schon über viele Jahre besonders die Ausbildung von Ingenieuren im Nebenfach an Fachhochschulen begleitet, von einem kleinen Autorenteam in Form der vorliegenden Auflage sowohl in seiner äußeren Gestaltung als auch in ausgewählten Kapiteln inhaltlich überarbeitet. In einer Zeit, in der vergleichbare Abiturkenntnisse nicht mehr vorausgesetzt werden können und damit Studenten ein Ingenieurstudium mit sehr unterschiedlichen (teilweise auch mangelhaften!) naturwissenschaftlichen Vorkenntnissen aufnehmen, soll das vorliegende Buch bei der Aneignung eines soliden Grundlagenwissens im Fach Chemie für verschiedene Ingenieurdisziplinen behilflich sein. Leider sind es nämlich fehlende Grundbegriffe, die den angehenden Ingenieuren das Verständnis chemischer Problemstellungen der Praxis erschweren.

Ausgehend von den Gesetzmäßigkeiten der allgemeinen Chemie werden die Arten der chemischen Bindung und darauf aufbauend die hauptsächlichen Reaktionstypen der anorganischen und organischen Chemie behandelt. Hierdurch bleibt der Charakter eines Lehrbuches erhalten, welches versucht, einen Überblick über die gesamte Chemie zu geben.

Auf folgende ingenieurtechnisch interessante Teilabschnitte des Buches sei besonders hingewiesen:

- Elektrochemie und Korrosion,
- Eisen und Stahl,
- Chemie und Technologie des Wassers,
- Petrol- und Kohlechemie,
- polymere Werkstoffe und Faserstoffe.

Wo es sich anbietet, werden Bezüge zu den aktuellen Umweltproblemen unserer Zeit hergestellt.

Trotzdem kann dieses Lehrbuch nicht alle stoffbezogenen Belange im umfangreichen Fächerspektrum der Chemie erfüllen. Es sollte aber leichter möglich sein, auf der Grundlage einer ausführlich behandelten allgemeinen Chemie notwendige Erweiterungen unter Nutzung zusätzlicher Quellen fachrichtungsbezogen und anwendungsorientiert vorzunehmen.

Dieses Lehrbuch ist sowohl zum Selbststudium – verknüpft mit kapitelbezogenen Aufgaben und Lösungen – als auch zur Vertiefung ausgewählter Lehrinhalte in der Fachdisziplin Chemie geeignet. Da es die allgemeine Chemie in praxisrelevanter Form darstellt, wird es besonders für die Ausbildung von Ingenieuren im Lehrgebiet Chemie – auch im Nebenfach – an Fachhochschulen empfohlen.

In der vorliegenden 9. Auflage des Lehrbuches werden konsequent die SI-Einheiten verwendet und die Elemente und Verbindungen weitgehend nach der IUPAC-Nomenklatur bezeichnet.

Die in diesem Lehrbuch der Chemie gegebenen Gefahrstoffhinweise können selbstverständlich nicht eine zusätzliche Information seiner Benutzer über jene Gefahrstoffe ersetzen, mit denen man in der Praxis eines Ingenieurs umzugehen hat. Es wird dafür auf die einschlägige Spezialliteratur verwiesen.

Das vorliegende Lehrbuch wird trotz aller Sorgfalt bei der Überarbeitung nicht frei von Fehlern sein. Hinweise, Anregungen und Kritik werden von den Autoren jederzeit entgegengenommen und bei einer Nachauflage berücksichtigt.

Herrn Dr. Steffen Naake, Brand-Erbisdorf, gebührt unser Dank bei der Satzherstellung auf der Basis der neuen Rechtschreibregeln.

Leipzig, im Herbst 2013

Im Auftrag der Autoren

*Roland Pfestorf*

## **Leserkontakt**

Autoren und Verlag Europa-Lehrmittel  
Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG  
Düsseldorfer Str. 23  
42781 Haan-Gruiten  
lektorat@europa-lehrmittel.de  
<http://www.europa-lehrmittel.de>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Gegenstand, Bedeutung und Entwicklung der Chemie</b>	17
1.1	Gegenstand der Chemie	17
1.2	Entstehung, Entwicklung und Bedeutung der Chemie	18
<b>2</b>	<b>Stoffe</b>	20
2.1	Begriff des Stoffes (Stoff – Körper)	20
2.2	Atomarer Aufbau der Stoffe	20
2.3	Physikalische Eigenschaften der Stoffe – Aggregatzustände	21
2.4	Reine Stoffe und Stoffgemische	24
2.5	Lösungen und Konzentrationseinheiten	26
2.6	Die physikalische Trennung von Mischungen	28
2.6.1	Übersicht über Trennoperationen	28
2.6.2	Trennung von Stoffgemischen durch Änderung des Aggregatzustandes	30
2.7	Elemente und Verbindungen	34
<b>3</b>	<b>Atombau</b>	36
3.1	Elementarteilchen	36
3.2	Aufbau des Atoms	36
3.2.1	Bau des Atomkerns	37
3.2.1.1	Nuclide und Isotope	38
3.2.2	Bau der Atom- oder Elektronenhülle	39
3.2.2.1	Welle-Teilchen-Dualismus der Elektronen	39
3.2.2.2	Energieniveaus, Elektronenzustände, Quantenzahlen	42
3.2.2.3	Räumlicher Bau der Atomhülle – Orbitale	43
3.2.2.4	Elektronenkonfiguration – Atommodelle	45
3.2.2.5	Gesetzmäßigkeiten im Bau der Atomhülle	49
3.3	Atombau als Ordnungsprinzip der Elemente	50
<b>4</b>	<b>Periodensystem der Elemente</b>	52
4.1	Anordnung der Elemente nach ihrer Ähnlichkeit	52
4.1.1	Entwicklung des Periodensystems	52
4.1.2	Halogene und Edelgase als Beispiel	52
4.2	Anordnung der Elemente und Darstellung des Periodensystems	54
4.2.1	Atombau als Ordnungsprinzip	54
4.2.2	Lang- und Kurzperiodensystem	55
4.3	Periodizität der Eigenschaften der Elemente	57
4.3.1	Gleiche Eigenschaften	57
4.3.2	Eigenschaften, die sich periodisch ändern	58
4.4	Bedeutung dieser Gesetzmäßigkeiten für die Chemie	59
<b>5</b>	<b>Chemische Bindung</b>	61
5.1	Grundlagen der chemischen Bindung	61
5.2	Atombindung	62
5.2.1	Wesen der Atombindung	62
5.2.1.1	VB-Methode	63
5.2.1.2	$\sigma$ -Bindung	64

5.2.1.3	$\pi$ -Bindung	65
5.2.1.4	Grundlagen der MO-Methode	65
5.2.2	Polarisierte Atombindung	67
5.2.3	Richtung der Atombindung	69
5.2.4	Atombindigkeit	70
5.2.5	Mesomerie	71
5.2.6	Eigenschaften der Verbindungen mit Atombindung	72
5.3	Ionenbeziehung	73
5.3.1	Wesen der Ionenbeziehung	73
5.3.2	Ionisierungsenergie und Elektronenaffinität	74
5.3.3	Ionenwertigkeit	74
5.3.4	Eigenschaften von Verbindungen mit Ionenbeziehung	75
5.4	Metallbindung	77
5.5	Zwischenmolekulare Bindung	78
5.6	Chemische Bindung und PSE	80
5.7	Besonderheiten der chemischen Bindung	81
5.7.1	Bindungsverhältnisse am Kohlenstoffatom	81
5.7.2	Bindungsverhältnisse in Komplexverbindungen	83
5.7.2.1	Komplexverbindungen	83
5.7.2.2	Struktur der Komplexe	84
5.7.2.3	Wertigkeiten in Komplexverbindungen	87
5.7.2.4	Komplexbildung am Metallion	89
5.7.2.5	Bezeichnung von Komplexverbindungen	90
5.8	Grundbegriffe der Kristallchemie	91
<b>6</b>	<b>Disperse Systeme</b>	<b>94</b>
6.1	Grundbegriffe	94
6.1.1	Aufbau disperser Systeme	94
6.1.2	Dispersitätsgrad	94
6.1.3	Arten disperser Systeme	94
6.1.4	Eigenschaften disperser Systeme	95
6.2	Kolloiddisperse Systeme	97
6.2.1	Arten der Kolloide	98
6.2.2	Herstellung kolloider Systeme	99
6.2.3	Eigenschaften kolloiddisperser Substanzen	100
6.2.3.1	Hydrophile und hydrophobe Kolloide	100
6.2.3.2	Reversible und irreversible Kolloide	101
6.2.3.3	Schutzkolloide	101
6.2.3.4	Sol-Gel-Umwandlung	101
6.2.3.5	Adsorption	102
6.3	Bedeutung der Kolloidchemie	102
<b>7</b>	<b>Massen-, Volumen- und Energieverhältnisse bei chemischen Reaktionen</b>	<b>104</b>
7.1	Verbindung und chemische Reaktion	104
7.2	Gesetz von der Erhaltung der Masse und Gesetz der bestimmten Masseverhältnisse	105
7.3	Relative Atommasse und relative Molekülmasse	106
7.4	Stoffmenge, Mol und Avogadro-Konstante	107
7.5	Stoffmengen- und Äquivalentkonzentration	108
7.6	Gesetz von Avogadro	110



7.7	Zustandsgleichung der Gase . . . . .	111
7.8	Stöchiometrische Berechnungen . . . . .	112
7.9	Thermodynamische Grundbegriffe zur energetischen Charakterisierung chemischer Reaktionen . . . . .	112
7.9.1	Innere Energie, Enthalpie und der 1. Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	112
7.9.2	Thermodynamische Reaktionsgrößen . . . . .	114
7.9.2.1	Molare Reaktions- und Bildungsenthalpien . . . . .	114
7.9.2.2	Direkte und indirekte Bestimmung von Reaktionsenthalpien . . . . .	116
7.9.3	Entropie, Prozessrichtung und der 2. Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	117
7.9.3.1	Prinzip von Thomsen und Berthelot . . . . .	118
7.9.3.2	Gibbs-Helmholtz-Gleichung und die freie Reaktionsenthalpie . . . . .	118
7.9.3.3	Triebkraft und Gleichgewicht bei chemischen Reaktionen . . . . .	119
<b>8</b>	<b>Chemisches Gleichgewicht und Massenwirkungsgesetz . . . . .</b>	<b>121</b>
8.1	Umkehrbarkeit chemischer Reaktionen . . . . .	121
8.2	Chemisches Gleichgewicht . . . . .	122
8.3	Verschiebung der Gleichgewichtslage . . . . .	124
8.3.1	Einfluss des Drucks . . . . .	124
8.3.2	Einfluss der Temperatur . . . . .	126
8.3.3	Einfluss der Konzentration . . . . .	126
8.4	Chemisches Gleichgewicht in heterogenen Systemen . . . . .	127
8.5	Beschleunigte Gleichgewichtseinstellung . . . . .	129
8.5.1	Einfluss der Temperatur . . . . .	129
8.5.2	Einfluss von Katalysatoren . . . . .	130
8.6	Zusammenwirkung von Druck, Temperatur und Katalysator . . . . .	131
8.7	Reaktionsgeschwindigkeit . . . . .	133
8.8	Reaktionsordnung . . . . .	134
8.9	Massenwirkungsgesetz . . . . .	136
8.9.1	Ableitung des Massenwirkungsgesetzes . . . . .	136
8.9.2	Anwendung des Massenwirkungsgesetzes . . . . .	137
<b>9</b>	<b>Reaktionen anorganischer Verbindungen . . . . .</b>	<b>142</b>
9.1	Aufbau und Abbau von Ionengittern . . . . .	142
9.1.1	Dissoziationskonstante und Dissoziationsgrad . . . . .	142
9.1.2	Konzentration und Aktivität . . . . .	144
9.1.3	Löslichkeitsprodukt . . . . .	145
9.2	Säure-Base-Reaktionen . . . . .	148
9.2.1	Die Brönstedtsche Säure-Base-Definition . . . . .	148
9.2.2	Korrespondierende Säure-Base-Paare . . . . .	150
9.2.3	Protolyte – Ampholyte . . . . .	152
9.2.4	Protolytische Reaktionen . . . . .	153
9.2.5	Die Autoprotolyse des Wassers . . . . .	154
9.2.6	Der pH-Wert . . . . .	155
9.2.7	Die Stärke der Protolyte . . . . .	157
9.2.8	Der $pK_S$ -Wert und der $pK_B$ -Wert . . . . .	158
9.2.9	Berechnung des pH-Wertes . . . . .	163
9.2.10	Säure-Base-Titration . . . . .	165
9.2.11	Titration schwacher und mittelstarker Protolyte – Pufferlösungen . . . . .	169

9.2.12	Saure oder basische Reaktion wässriger Salzlösungen (Hydrolyse) . . . . .	173
9.2.13	Basischer und saurer Charakter von Metallhydroxiden (amphotere Hydroxide) . .	174
9.3	Redoxreaktionen . . . . .	175
9.3.1	Oxidation als Elektronenabgabe – Reduktion als Elektronenaufnahme . . . . .	175
9.3.2	Korrespondierende Redoxpaare . . . . .	176
9.3.3	Weitere Beispiele für Redoxsysteme . . . . .	179
<b>10</b>	<b>Elektrochemie und Korrosion . . . . .</b>	<b>183</b>
10.1	Einführung . . . . .	183
10.2	Leitfähigkeit von Elektrolytlösungen . . . . .	185
10.2.1	Spezifische elektrische Leitfähigkeit . . . . .	185
10.2.2	Einfluss von Temperatur und Konzentration auf die spezifische elektrische Leitfähigkeit . . . . .	187
10.2.3	Anwendung der Leitfähigkeitsmessung . . . . .	189
10.3	Elektrochemische Gleichgewichte . . . . .	189
10.3.1	Verhalten der Metalle gegenüber Oxonium- oder Hydronium-Ionen . . . . .	189
10.3.2	Galvanische Zellen . . . . .	191
10.3.3	Entstehen von Potenzialdifferenzen . . . . .	193
10.3.4	Standardpotenziale von Metallelektroden . . . . .	197
10.3.5	Standardpotenziale für Elektroden mit Nichtmetall-Ionen . . . . .	203
10.3.6	Standardpotenziale bei Ionenumladungen und bei anderen Redoxvorgängen . . .	206
10.4	Galvanische Elemente . . . . .	207
10.4.1	Quellenspannung und Klemmenspannung . . . . .	207
10.4.2	Konzentrationselement . . . . .	208
10.4.3	Primärelemente . . . . .	214
10.4.4	Sekundärelemente . . . . .	215
10.4.4.1	Bleiakkumulator (Bleisammler) . . . . .	216
10.4.4.2	Eisen-Nickel-Akkumulator (Stahlsammler) . . . . .	218
10.4.4.3	Nickel-Metallhydrid-Akkumulator (NMH) . . . . .	218
10.4.5	Brennstoffzellen . . . . .	220
10.5	Elektrolyse . . . . .	220
10.5.1	Begriffe . . . . .	220
10.5.2	Elektrodenvorgänge . . . . .	222
10.5.2.1	Katodenvorgänge . . . . .	222
10.5.2.2	Anodenvorgänge . . . . .	223
10.5.3	Elektrolyse von Salzschmelzen . . . . .	224
10.5.4	Elektrolyse in wässriger Lösung . . . . .	224
10.5.4.1	Allgemeine Regeln . . . . .	224
10.5.4.2	Beispiele für Elektrolysen in wässriger Lösung . . . . .	227
10.5.5	Faradaysche Gesetze . . . . .	230
10.6	Anwendung der Elektrolyse . . . . .	232
10.6.1	Elektrogravimetrie und Coulometrie . . . . .	232
10.6.2	Technische Schmelzflusselektrolysen . . . . .	233
10.6.3	Elektrolytische Metallraffination . . . . .	235
10.6.4	Alkalichloridelektrolyse . . . . .	236
10.6.4.1	Diaphragmaverfahren . . . . .	237
10.6.4.2	Amalgam- oder Quecksilberverfahren . . . . .	238
10.6.4.3	Membranverfahren . . . . .	239

---

10.6.5	Galvanisieren und Aloxieren (Eloxieren)	240
10.6.6	Elysieren	241
10.7	Korrosion von Metallen	242
10.7.1	Begriff und Bedeutung der Korrosion	242
10.7.2	Elektrochemische Korrosion	242
10.7.3	Korrosion bei Eisenlegierungen	244
10.7.3.1	Rosten	245
10.7.3.2	Verzundern	246
10.8	Korrosionsschutz der Metalle	247
10.8.1	Aktiver und passiver Korrosionsschutz der Metalle	247
10.8.2	Passiver Korrosionsschutz für unlegierte Eisenwerkstoffe	248
10.8.2.1	Untergrundvorbehandlung unlegierter Eisenwerkstoffe	248
10.8.2.2	Korrosionsschutzüberzüge für unlegierte Eisenwerkstoffe	249
<b>11</b>	<b>Wasserstoff</b>	<b>253</b>
11.1	Elementarer Wasserstoff	253
11.2	Verbindungen des Wasserstoffs	255
11.2.1	Wasser	255
11.2.2	Wasserstoffperoxid	256
<b>12</b>	<b>Halogene</b>	<b>258</b>
12.1	Übersicht über die Elemente der 7. Hauptgruppe	258
12.2	Chlor	260
12.3	Verbindungen des Chlors	262
12.3.1	Chlorwasserstoff und Salzsäure	262
12.3.2	Oxide und Sauerstoffsäuren des Chlors	263
12.4	Brom und seine Verbindungen	265
12.5	Iod und seine Verbindungen	266
12.6	Fluor und seine Verbindungen	267
<b>13</b>	<b>Elemente der Sauerstoffgruppe</b>	<b>269</b>
13.1	Übersicht über die Elemente der 6. Hauptgruppe	269
13.2	Sauerstoff	269
13.3	Ozon	272
13.4	Schwefel	273
13.5	Verbindungen des Schwefels	275
13.5.1	Schwefelwasserstoff	275
13.5.2	Schwefeldioxid	276
13.5.3	Schweflige Säure	278
13.5.4	Schwefeltrioxid	279
13.5.5	Schwefelsäure	281
13.6	Selen und Tellur	283
<b>14</b>	<b>Elemente der Stickstoffgruppe</b>	<b>285</b>
14.1	Übersicht über die Elemente der 5. Hauptgruppe	285
14.2	Stickstoff	285
14.3	Verbindungen des Stickstoffs	288
14.3.1	Ammoniak	288
14.3.2	Stickstoffoxide	294
14.3.3	Salpetrige Säure	295

14.3.4	Salpetersäure . . . . .	295
14.3.5	Kalkstickstoff . . . . .	297
14.3.6	Stickstoffdüngemittel . . . . .	298
14.4	Phosphor . . . . .	300
14.5	Verbindungen des Phosphors . . . . .	302
14.5.1	Phosphorwasserstoff . . . . .	303
14.5.2	Phosphorhalogenverbindungen . . . . .	303
14.5.3	Oxide und Sauerstoffsäuren des Phosphors . . . . .	304
14.5.4	Phosphat-Düngemittel . . . . .	307
14.5.5	Phosphororganische Verbindungen . . . . .	308
14.6	Arsen und seine Verbindungen . . . . .	309
14.7	Antimon und seine Verbindungen . . . . .	309
14.8	Bismut und seine Verbindungen . . . . .	310
<b>15</b>	<b>Nichtmetalle der Kohlenstoffgruppe . . . . .</b>	<b>312</b>
15.1	Übersicht über die Elemente der 4. Hauptgruppe . . . . .	312
15.2	Kohlenstoff . . . . .	312
15.3	Verbindungen des Kohlenstoffs . . . . .	318
15.3.1	Kohlenstoffmonoxid . . . . .	318
15.3.2	Kohlenstoffdioxid . . . . .	320
15.3.3	Kohlensäure . . . . .	323
15.3.4	Kohlenwasserstoffe . . . . .	324
15.3.5	Carbide . . . . .	324
15.3.6	Cyanide . . . . .	325
15.4	Silicium . . . . .	326
15.5	Verbindungen des Siliciums . . . . .	327
15.5.1	Siliciumdioxid . . . . .	327
15.5.2	Kieselsäure und Silicate . . . . .	328
15.6	Technische Silicate . . . . .	330
15.6.1	Gläser . . . . .	330
15.6.2	Keramische Erzeugnisse . . . . .	332
15.7	Silicone . . . . .	334
15.8	Germanium . . . . .	336
15.9	Bor und seine Verbindungen . . . . .	337
<b>16</b>	<b>Edelgase . . . . .</b>	<b>339</b>
16.1	Vorkommen der Edelgase . . . . .	339
16.2	Eigenschaften und Verwendung der Edelgase . . . . .	339
<b>17</b>	<b>Eigenschaften, Vorkommen und Darstellungsprinzipien der Metalle . . . . .</b>	<b>341</b>
17.1	Eigenschaften der Metalle . . . . .	341
17.2	Vorkommen der Metalle . . . . .	346
17.3	Aufbereitung der Erze . . . . .	347
17.4	Darstellungsprinzipien der Metalle . . . . .	348
17.4.1	Reduktion von Schwermetalloxiden . . . . .	349
17.4.2	Raffination der Rohmetalle . . . . .	351

<b>18</b>	<b>Metalle der 1. Hauptgruppe</b>	354
18.1	Übersicht über die Metalle der 1. Hauptgruppe	354
18.2	Lithium	355
18.3	Natrium	356
18.3.1	Elementares Natrium	356
18.3.2	Natriumverbindungen	356
18.4	Kalium	359
18.4.1	Elementares Kalium	359
18.4.2	Kaliumverbindungen	360
18.4.3	Gewinnung der Kalisalze	361
<b>19</b>	<b>Metalle der 2. Hauptgruppe</b>	365
19.1	Übersicht über die Metalle der 2. Hauptgruppe	365
19.2	Magnesium	366
19.2.1	Elementares Magnesium	366
19.2.2	Magnesiumverbindungen	367
19.3	Calcium	368
19.3.1	Elementares Calcium	368
19.3.2	Calciumverbindungen	368
19.4	Barium	369
19.5	Baubindemittel	370
19.5.1	Bedeutung der Baubindemittel	370
19.5.2	Luftbinder	370
19.5.2.1	Kalk	370
19.5.2.2	Gips	371
19.5.2.3	Magnesiabinder	371
19.5.3	Hydraulische Bindemittel	371
19.5.3.1	Zemente	371
19.5.3.2	Weitere hydraulische Bindemittel	373
19.5.4	Hydrothermale Bindemittel	374
19.5.4.1	Kalksandstein	374
19.5.4.2	Porenbeton	374
<b>20</b>	<b>Metalle der 3. Hauptgruppe</b>	375
20.1	Übersicht über die Elemente der 3. Hauptgruppe	375
20.2	Aluminium	375
20.2.1	Elementares Aluminium	375
20.2.2	Aluminiumverbindungen	377
20.2.3	Aluminothermisches Verfahren	379
<b>21</b>	<b>Metalle der 4. Hauptgruppe</b>	380
21.1	Übersicht über die Elemente der 4. Hauptgruppe	380
21.2	Zinn	380
21.2.1	Elementares Zinn	380
21.2.2	Zinnverbindungen	381
21.3	Blei	382
21.3.1	Elementares Blei	382
21.3.2	Bleiverbindungen	383

<b>22</b>	<b>Metalle der 1. und 2. Nebengruppe</b>	385
22.1	Übersicht über die Metalle der 1. Nebengruppe	385
22.2	Kupfer	385
22.2.1	Elementares Kupfer	385
22.2.2	Kupferverbindungen	389
22.3	Silber	389
22.3.1	Elementares Silber	389
22.3.2	Silberverbindungen	390
22.4	Übersicht über die Metalle der 2. Nebengruppe	391
22.5	Zink	391
22.6	Quecksilber	393
22.6.1	Elementares Quecksilber	393
22.6.2	Quecksilberverbindungen	394
<b>23</b>	<b>Eisen und Stahl</b>	396
23.1	Übersicht über die Metalle der 8. Nebengruppe	396
23.2	Eisen	396
23.2.1	Elementares Eisen	396
23.2.2	Eisenverbindungen	398
23.3	Eisen- und Stahlgewinnung	399
23.3.1	Roheisengewinnung	399
23.3.2	Stahlgewinnung	402
23.4	Cobalt	405
23.5	Nickel	407
<b>24</b>	<b>Wichtige Metalle der 4. bis 7. Nebengruppe</b>	409
24.1	4. Nebengruppe	409
24.2	5. Nebengruppe	410
24.3	6. Nebengruppe	411
24.4	7. Nebengruppe	415
<b>25</b>	<b>Chemie und Technologie des Wassers</b>	419
25.1	Die wirtschaftliche Bedeutung des Wassers	419
25.2	Natürliches Wasser	419
25.3	Wasserhärte	420
25.4	Anforderungen an die Wasserbeschaffenheit	421
25.4.1	Anforderungen an die Trinkwassergüte	421
25.4.2	Anforderungen der Industrie an Brauchwasser	422
25.5	Trinkwasseraufbereitung	423
25.5.1	Flockung und Filtration	424
25.5.2	Kalk-Kohlenstoffdioxid-Gleichgewicht	426
25.5.3	Entkeimung des Wassers	427
25.6	Enthärtung des Wassers	428
25.7	Abwasserreinigung	430
25.7.1	Mechanische Reinigung	430
25.7.2	Biologische Reinigung	431
25.7.3	Schlammbehandlung	434

25.8	Wasseruntersuchung . . . . .	437
25.8.1	Bestimmung der Wasserhärte . . . . .	437
25.8.2	Bestimmung des biochemischen Sauerstoffbedarfs . . . . .	438
<b>26</b>	<b>Gegenstand der organischen Chemie . . . . .</b>	<b>440</b>
26.1	Gegenstand der organischen Chemie . . . . .	440
26.2	Aufgaben und Bedeutung der organischen Chemie . . . . .	441
26.3	Zusammensetzung, Formeln und Isomerie organischer Verbindungen . . . . .	442
26.4	Einteilung und Nomenklatur organischer Verbindungen . . . . .	445
26.5	Bindungsverhältnisse . . . . .	446
26.5.1	Die $\sigma$ - und die $\pi$ -Bindung . . . . .	446
26.5.2	Polarisation der Atombindung . . . . .	449
26.6	Eigenschaften organischer Verbindungen . . . . .	451
26.6.1	Schmelz- und Siedepunkt organischer Verbindungen . . . . .	451
26.6.2	Löslichkeit organischer Verbindungen . . . . .	452
26.7	Reaktionen organischer Verbindungen . . . . .	453
26.7.1	Reaktionsgeschwindigkeit . . . . .	453
26.7.2	Reaktionsarten . . . . .	454
<b>27</b>	<b>Gesättigte aliphatische Kohlenwasserstoffe – Alkane . . . . .</b>	<b>457</b>
<b>28</b>	<b>Ungesättigte aliphatische Kohlenwasserstoffe – Alkene und Alkine . . . . .</b>	<b>464</b>
28.1	Alkene – Olefine . . . . .	465
28.2	Alkadiene – Diolefine . . . . .	469
28.3	Alkine – Acetylene . . . . .	473
<b>29</b>	<b>Halogenverbindungen der Alkane und Alkene . . . . .</b>	<b>476</b>
29.1	Halogenalkane . . . . .	476
29.2	Halogenalkene . . . . .	478
<b>30</b>	<b>Derivate der aliphatischen Kohlenwasserstoffe . . . . .</b>	<b>483</b>
30.1	Funktionelle Gruppen . . . . .	483
30.2	Alkanole (Alkohole) . . . . .	484
30.2.1	Einwertige Alkanole . . . . .	484
30.2.2	Mehrwertige Alkanole . . . . .	486
30.2.3	Technisch wichtige Alkanole . . . . .	486
30.3	Alkanale (Aldehyde) . . . . .	488
30.4	Alkanone (Ketone) . . . . .	490
30.5	Alkansäuren . . . . .	491
30.6	Alkensäuren . . . . .	494
30.7	Substituierte Carbonsäuren und Carbonsäurederivat . . . . .	495
30.7.1	Substituierte Carbonsäuren – optische Isomerie . . . . .	495
30.7.2	Carbonsäurederivate und Derivate der Kohlensäure . . . . .	497
30.8	Ester . . . . .	498
30.9	Ether . . . . .	500

<b>31 Cyclische Verbindungen</b> . . . . .	503
31.1 Cycloalkane – Naphthene . . . . .	503
31.2 Aromatische Kohlenwasserstoffe – Benzol . . . . .	504
31.3 Substitutionsprodukte aromatischer Kohlenwasserstoffe . . . . .	509
31.4 Phenole . . . . .	511
31.5 Aromatische Alkohole und Carbonsäuren . . . . .	512
31.6 Kondensierte aromatische Ringsysteme . . . . .	514
31.7 Heterocyclische Verbindungen . . . . .	515
<b>32 Petrol- und Kohlechemie</b> . . . . .	517
32.1 Entstehung, Vorkommen und Inhaltsstoffe von Erdöl und Erdgas . . . . .	517
32.2 Physikalische Trennung von Erdölbestandteilen . . . . .	518
32.3 Erdölveredlung mit chemischen Methoden – Petrolchemie . . . . .	521
32.4 Inhaltsstoffe, Entstehung und Vorkommen der Kohle . . . . .	523
32.5 Verfahren der Kohleveredlung . . . . .	524
32.6 Kraftstoffe . . . . .	526
32.7 Schmieröle und Schmierfette . . . . .	527
<b>33 Eiweiße, Fette und Kohlenhydrate</b> . . . . .	530
33.1 Aminosäuren . . . . .	530
33.2 Proteine . . . . .	531
33.3 Fette und fette Öle . . . . .	532
33.4 Seifen und synthetische Waschgrundstoffe . . . . .	533
33.5 Kohlenhydrate . . . . .	536
33.5.1 Monosaccharide . . . . .	537
33.5.2 Oligosaccharide . . . . .	538
33.5.3 Polysaccharide: Stärke und Cellulose . . . . .	539
<b>34 Polymere Werkstoffe und Faserstoffe – Kunststoffe</b> . . . . .	542
34.1 Arten der Polymerisation und Polymereigenschaften . . . . .	542
34.2 Thermoplaste auf der Basis von Ethen und Ethenderivaten . . . . .	544
34.3 Synthetischer Kautschuk . . . . .	549
34.4 Duroplaste auf der Basis von Phenolen . . . . .	551
34.5 Kunststoffe auf der Basis von Harnstoff und anderen Stickstoffverbindungen . . . . .	552
34.6 Epoxidharze . . . . .	553
34.7 Polyester . . . . .	554
34.8 Polyamide . . . . .	555
34.9 Kunststoffe auf Cellulosebasis . . . . .	556
<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	560
<b>Lösungen zu den Aufgaben</b> . . . . .	561
<b>Anlagen</b> . . . . .	589
<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	608



# 1 Gegenstand, Bedeutung und Entwicklung der Chemie

## 1.1 Gegenstand der Chemie

Die Chemie ist, wie z. B. die Physik, Geologie oder Biologie, eine Naturwissenschaft.

Die einzelnen Wissenschaften unterscheiden sich durch ihren Gegenstand. Während sich die Biologie mit dem lebenden Organismus, mit Tier und Pflanze, beschäftigt, ist der Gegenstand der Physik die Energie in ihren verschiedenen Formen. Es ist verhältnismäßig schwierig, den Gegenstand der Chemie exakt abzugrenzen. In erster Linie beschäftigt sich die Chemie mit den stofflichen Vorgängen (Stoffumwandlungen, chemische Reaktionen). Im Verlauf chemischer Vorgänge entstehen aus den Ausgangsstoffen neue, andere Stoffe mit Eigenschaften, die von denen der Ausgangsstoffe verschieden sind. Schließlich gehören auch Untersuchungen über den Aufbau und die Eigenschaften der Stoffe zum Gegenstand der Chemie, da die stofflichen Vorgänge weitgehend vom Aufbau und den Eigenschaften der beteiligten Stoffe abhängen.

■ Gegenstand der Chemie sind die Stoffe und die stofflichen Veränderungen.

Die Naturwissenschaften stehen nicht isoliert nebeneinander. Viele Aufgaben der Chemie können nur in Zusammenarbeit mit anderen naturwissenschaftlichen Disziplinen gelöst werden. Besonders zwischen Chemie und Physik besteht ein enger Zusammenhang. So sind z. B. die Stoffumwandlungen in erster Linie an den mit ihnen verbundenen physikalischen Erscheinungen zu erkennen und werden in ihrem Ablauf durch physikalische Bedingungen beeinflusst. Die in der Chemie interessierende Frage nach dem Aufbau und den Eigenschaften der Stoffe wird zugleich auch vom Physiker gestellt. Beide wissenschaftliche Disziplinen haben gemeinsam zu ihrer Beantwortung beigetragen. Auch die Mathematik ist für die Chemie bedeutsam. Nachdem die qualitative Seite einer Stoffumwandlung oder der Aufbau eines Stoffes erkannt ist, werden die quantitativen Beziehungen mithilfe der Mathematik erfasst.

Die Chemie wird in einzelne Gebiete eingeteilt, wobei diese Teilgebiete eng miteinander zusammenhängen und sich teilweise überschneiden.

Die *analytische Chemie* beschäftigt sich mit der Trennung eines Stoffgemisches in reine Stoffe, mit der Identifizierung (Nachweis) und der mengenmäßigen Bestimmung dieser Stoffe. Die analytische Chemie ist von großer praktischer Bedeutung. Sie dient u. a. der Kontrolle chemischer Produktionsprozesse, der Prüfung von Werkstoffen und Brennstoffen, sie dient als Hilfsmittel bei der Diagnostik von Krankheiten usw. Vor allem aber schafft die analytische Chemie die Voraussetzungen für die chemische Synthese von praktisch wichtigen Produkten.

Die *synthetische (präparative) Chemie* befasst sich mit dem Aufbau von komplizierter gebauten Stoffen auf dem Wege der Stoffumwandlung. Insbesondere liefert die synthetische Chemie die Grundlagen für die Synthesen in der chemischen Technik, die aus einer geringen

Zahl von zum Teil billigen und leicht zugänglichen Rohstoffen eine Fülle von Werkstoffen, Gebrauchsgütern usw. produziert.

Gegenstand der *allgemeinen* und *physikalischen Chemie* sind u. a. die Grundgesetze der Chemie, die für jede Stoffumwandlung gelten.

Die spezielle Behandlung der Stoffe und ihrer chemischen Umsetzungen geschieht entweder im Rahmen der *organischen* oder der *anorganischen Chemie*. Dabei umfasst die organische Chemie das Gebiet der Kohlenstoffverbindungen, die anorganische Chemie die Verbindungen aller anderen Elemente. Daneben gibt es innerhalb der Chemie zahlreiche Spezialgebiete, wie die *Radiochemie*, die *Geochemie*, die *Biochemie*, die *Umweltchemie* usw.

## 1.2 Entstehung, Entwicklung und Bedeutung der Chemie

Die Chemie entstand und entwickelte sich in der Auseinandersetzung des Menschen mit seiner Umwelt. Der Trieb, sein Leben zu erhalten, ließ den Menschen der Urgesellschaft das zufällig gefundene Feuer zum Schutz gegen Kälte und zur Bereitung seiner Nahrung verwenden. Später lernte er, mithilfe des Feuers Bronze und schließlich auch Eisen zu gewinnen. Seit dieser Zeit wurden in ständig steigendem Maße chemische Prozesse zur Befriedigung der Bedürfnisse des Menschen herangezogen.

Während des Altertums und des Mittelalters wurden Gerberei und Färberei, Brauerei und Brennerei sowie die Bereitung von Arzneimitteln nach erprobten und überlieferten Rezepten betrieben, ohne dass man eine Vorstellung von den Gesetzen der zugrunde liegenden Prozesse hatte. Unabhängig von der gewerblichen Anwendung chemischer Prozesse entfalteten im Mittelalter die Alchemisten eine rege Experimentiertätigkeit. Dem damaligen niedrigen Stand der Naturerkenntnis entsprechend, gingen die Alchemisten von mystischen Vorstellungen aus. Ihre Hauptanliegen, Gold und ein Universalmittel gegen alle Krankheiten herzustellen, mussten selbstverständlich scheitern. Dagegen entdeckte mancher Alchemist bei seinen Versuchen zufällig einen bisher unbekanntem Stoff, so z. B. *Brandt* (1669) den Phosphor. Von größerem Nutzen als die *Alchemie* war für die Menschheit die von *Paracelsus* Anfang des 16. Jahrhunderts ins Leben gerufene *Iatrochemie*, die sich mit der Herstellung von Arzneimitteln befasste. Die Alchemisten und Iatrochemiker betrachteten aber die beobachteten chemischen Erscheinungen isoliert. Erst seit dem 17. Jahrhundert kam mit der Entwicklung des Bürgertums das Bedürfnis auf, die Gesetzmäßigkeiten, nach denen die Stoffe zu neuen Stoffen zusammentreten, zu erforschen. Mit der Entdeckung einiger grundlegenden Naturgesetze Ende des 18. Jahrhunderts bis Anfang des 19. Jahrhunderts konnte eine wissenschaftliche Chemie entstehen.

Seit der Mitte des 19. Jahrhunderts begann sich die chemische Industrie, deren Anfänge bis ins 18. Jahrhundert zurückreichen, auf Grund der fortschreitenden ökonomischen Entwicklung kräftig zu entfalten. Zuerst entstand in England zur Verarbeitung der Baumwolle und pflanzlichen Öle der englischen Kolonien eine ausgedehnte Soda- und Seifenindustrie. Die deutsche Chemieindustrie nahm vom Superphosphat und vor allem von den Teerfarben ihren Ausgang. Wenn auch die Entwicklung der deutschen Chemieindustrie verspätet einsetzte, so hatte sie doch bereits bis zum Beginn des ersten Weltkrieges auf vielen Gebieten, besonders

auf dem Gebiet der Farbstoffe und Pharmazeutika, nahezu eine Monopolstellung erreicht und war in der Folgezeit bis 1945 besonders durch die Entwicklung von kriegswichtigen Syntheseverfahren (Benzin, Kautschuk) gekennzeichnet.

Die Anwendung chemischer Verfahren und Methoden in der Wirtschaft ist heute eine Hauptrichtung des technischen Fortschritts und trägt wesentlich zur Steigerung der Arbeitsproduktivität bei. Sie besteht darin, dass zunehmend chemische Produkte als Arbeitsgegenstände oder Arbeitsmittel verwendet und chemische Methoden in vielen Produktionszweigen angewendet werden. In diesem Zusammenhang ist an die teilweise Verdrängung der traditionellen Werkstoffe (Metalle, Naturfaserstoffe usw.) durch Hochpolymere (Kunststoffe, Chemiefaserstoffe usw.) zu denken. Aber auch die Chemisierung der landwirtschaftlichen Produktion (Verwendung von synthetischen Düngemitteln, Futterzusätzen) und anderer Industriezweige ist bedeutend. Es gibt verschiedene Gründe, weshalb insbesondere mithilfe der Chemisierung effektiver produziert werden kann. Chemische Produkte werden aus in größeren Mengen vorhandenen, relativ billigen und zum Teil austauschbaren Rohstoffen erzeugt. Solche Rohstoffe für die Chemieproduktion sind Kohle und Erdöl, Erdgas, Wasser, Luft, Steinsalz, Kalkstein und Silikate. Im Gegensatz dazu stehen die Rohstoffe der metallurgischen Produktion (Erze) nur begrenzt zur Verfügung, sind nicht austauschbar und relativ teuer. Gleiches gilt auch für nachwachsende Rohstoffe aus pflanzlicher und tierischer Produktion (Holz, Wolle, Seide, Öle usw.). Die chemische Produktion ist auch deswegen besonders wirtschaftlich, weil in ihrem Verlauf nur sehr wenige nicht verwertbare Nebenprodukte auftreten (Recycling-Prozesse) und vor allem, weil ihre Technologie sehr oft einen kontinuierlichen Verfahrensablauf mit allen wirtschaftlichen Vorteilen der Mechanisierung und Automatisierung gestattet. Außerdem ist zu beachten, dass mit Hilfe der Chemie neue, nicht in der Natur vorhandene Stoffe erzeugt werden können, deren Eigenschaften vorzüglich dem Verwendungszweck angepasst sind (z. B. Werkstoffe „nach Maß“, Pharmazeutika, Biokraftstoffe usw.) Zunehmend bringt diese Entwicklung ausgedehnte ökologische Probleme mit sich, die ihrerseits wiederum die Anwendung chemischen Wissens zu ihrer Lösung verlangen.

## ○ **Aufgaben**

**1.1** Welche Berührungspunkte haben Chemie und Physik?

**1.2** Was versteht man unter analytischer und was unter synthetischer (präparativer) Chemie?

**1.3** Es sind Beispiele für die Anwendung chemischer Verfahren und Methoden in der Industrie mit ihrer wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkung zu nennen.

## 2 Stoffe

### 2.1 Begriff des Stoffes (Stoff – Körper)

Deutlich muss der Begriff *Stoff* vom Begriff *Körper* abgegrenzt werden. Körper sind Gebilde mit einer bestimmten Gestalt, die häufig der beabsichtigten Verwendung besonders angepasst wurde. Nur die Stoffe sind Gegenstand der Chemie. Mit den Körpern beschäftigt sich die Chemie im Allgemeinen nicht. Die Gestalt ist keine charakteristische Eigenschaft des Stoffes. Eine Ausnahme bilden die Kristallformen. Die Gestalt eines kristallinen Körpers ist eine Eigentümlichkeit des Stoffes, aus dem der Kristall besteht. Die Kristallform ist durch die Art der kleinsten Stoffteilchen (Ionen, Atome, Moleküle) bedingt und damit eine spezifische Stoffeigenschaft.

### 2.2 Atomarer Aufbau der Stoffe

Alle Stoffe sind aus *Atomen* aufgebaut (→ Kapitel 3). Die Atome sind aus chemischer Sicht die kleinsten Bausteine der Stoffe. Bei jeder chemischen Umsetzung bleiben die Atome erhalten, sie ändern lediglich ihre gegenseitige Lage zueinander, schließen sich zu neuen Verbänden zusammen, sie gruppieren sich um, verändern ihre elektrische Ladung usw.

Die Atome sind vom Standpunkt der Chemie die kleinsten Bausteine aller Feststoffe, Flüssigkeiten und Gase. Sie bleiben bei chemischen Umsetzungen erhalten.

Die Atome sind außerordentlich klein. Ihr Durchmesser liegt in der Größenordnung von wenigen hundertmillionstel Zentimetern. Ein Eisenatom z. B. hat einen Radius von  $1,72 \cdot 10^{-10}$  m. Die Masse der verschiedenen Atome liegt zwischen  $10^{-24}$  und  $10^{-22}$  g.

Jedes Atom besteht aus einem elektrisch positiv geladenen *Atomkern* und einer *Atom-* oder *Elektronenhülle*. Die Atomhülle wird von (elektrisch negativ geladenen) Elektronen gebildet.

Das Vermögen eines Atoms, mit anderen Atomen Bindungen einzugehen, d. h. an chemischen Umsetzungen beteiligt zu sein, ist praktisch nur durch die Zusammensetzung der Atomhülle bedingt.

Es sind gegenwärtig unter chemischen Gesichtspunkten – entsprechend der Anzahl der Elemente – 114 verschiedene Atomsorten bekannt. Die Atomsorten unterscheiden sich durch die Größe, die Masse und vor allem durch die Hüllenstruktur der Atome.

Innerhalb einer Atomsorte gleichen sich die einzelnen Atome in ihrer Hüllenstruktur und damit in ihrem Verhalten bei chemischen Umsetzungen. Zum Beispiel haben zwei Eisenatome stets die gleiche Atomhülle, chemische Umsetzungen mit ihnen verlaufen in der gleichen Weise. Jedoch können innerhalb einer Atomsorte Atome mit unterschiedlicher Kernzusammensetzung auftreten (*Isotope*). In ihrem chemischen Verhalten sind solche Isotope nicht zu unterscheiden (→ Abschn. 3.2.1.1).