

Schirmeister / Schmuck / Wich

Mit Taschenfalter

Beyer / Walter  
**Organische  
Chemie**

25. AUFLAGE



Hirzel Verlag







Schirmeister / Schmuck / Wich

---

# Beyer / Walter

# Organische Chemie

Begründet von

Prof. em. Dr. Hans Beyer<sup>†</sup>, Greifswald

Prof. em. Dr. Wolfgang Walter<sup>†</sup>, Hamburg

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Wittko Francke, Hamburg

Fortgeführt von

Prof. Dr. Tanja Schirmeister, Mainz

Prof. Dr. Carsten Schmuck, Essen

Jun.-Prof. Dr. Peter R. Wich, Mainz

Unter Mitarbeit von

Denise Bamberger, Heinz Bandmann, Lina Bartsch, Daniel

Bellinger, Christoph Borek, Uwe Dietzel, Martin Ehlers,

Prof. Dr. Bernd Engels, Matthias Fach, Dr. Christopher

Ganser, Dr. Barbara Geibel, Dr. Simon Grabowsky, Prof. Dr.

Mark Helm, Lina Irsheid, Michael Juchum, Sandra

Junghänel, Jochen Kesselring, Prof. Dr. Caroline Kisker,

Dennis Kuchenbecker, Dr. Sebastian Langolf, Dr. Thomas

Lemster, Dr. Ferdinand Matz, Dr. Christoph Menrath, Ira

Schmid, Dr. Thomas Schneider, Dr. Simon Vogel, Dr. Armin

Welker und Elio Zellermann

25., völlig neu bearbeitete Auflage

Mit 2309 Abbildungen und 28 Tabellen  
und Poster „Taschenfalter“



Hirzel Verlag

## Anschriften der Autoren

### Prof. Dr. Tanja Schirmeister

Institut für Pharmazie und Biochemie  
Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
Staudinger Weg 5  
55128 Mainz  
schirmei@uni-mainz.de

### Prof. Dr. Carsten Schmuck

Fakultät für Chemie  
Universität Duisburg-Essen  
Universitätsstraße 7  
45141 Essen  
carsten.schmuck@uni-due.de

### Jun.-Prof. Dr. Peter R. Wich

Institut für Pharmazie und Biochemie  
Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
Staudinger Weg 5  
55128 Mainz  
wich@uni-mainz.de

Alle Angaben in diesem Werk wurden sorgfältig geprüft. Dennoch können die Autoren und der Verlag keine Gewähr für deren Richtigkeit übernehmen.

Ein Markenzeichen kann markenrechtlich geschützt sein, auch wenn ein Hinweis auf etwa bestehende Schutzrechte fehlt.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzung, Nachdruck, Mikroverfilmung oder vergleichbare Verfahren sowie für die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen.

Die Voraufgaben dieses Buches erschienen unter dem Titel „Lehrbuch der Organischen Chemie“.

25., völlig neu bearbeitete Auflage 2016

ISBN 978-3-7776-1673-5 (Print)

ISBN 978-3-7776-2164-7 (E-Book)

© 2016 S. Hirzel Verlag

Birkenwaldstr. 44, 70191 Stuttgart

[www.hirzel.de](http://www.hirzel.de)

Printed in Germany

Autorenassistentz: Dr. Gabriele Lauser, Silvia Rädlein, Sandra Schroeder, Dr. Nicole Kindler

Sachregistererstellung: Dr. Matthias Delbrück, Dr. Angelika Fallert-Müller, Dr. Beatrix Föllner, Walter Greulich

Satz: primustype R. Hurler GmbH, Notzingen

Druck und Bindung: Appl, Wemding

Umschlaggestaltung: deblik, Berlin

Umschlagabbildung: Dr. Simon Grabowsky, Universität Bremen

Die Abbildung zeigt ein experimentell abgeleitetes elektrostatisches Potenzial von L-Alanyl-L-Phenylalanyl-L-Alanin auf einer Elektronendichte-Isooberfläche und wurde mit dem Programm Moliso ([www.moliso.de](http://www.moliso.de)) erzeugt.

## Vorwort

Der *Beyer/Walter* hat sich seit seinem ersten Erscheinen 1953 schnell zu einem Standardwerk der Organischen Chemie entwickelt. Während die anderen großen Lehrbücher der Organischen Chemie, die größtenteils aus dem angelsächsischen Raum stammen, traditionell ihren Schwerpunkt auf der Beschreibung von Reaktionen und Mechanismen haben, stehen beim *Beyer/Walter* seit jeher die einzelnen Stoffklassen und Verbindungen, ihre Eigenschaften sowie ihre Herstellung und Verwendung im Vordergrund.

Mit diesem einzigartigen Konzept hat sich der *Beyer/Walter* über alle Jahrzehnte seinen festen Platz in der Ausbildung vor allem von Chemikern und Pharmazeuten gesichert. Es dürfte sicherlich kaum Studierende eines chemisch orientierten Studiengangs geben, die dieses Buch nicht bereits einmal genutzt haben, um die Strukturformel eines Naturstoffes nachzuschlagen oder etwas über die Herstellung und Verwendung eines bestimmten Heterocyclus zu lernen. Im Laufe der Jahre wurde der *Beyer/Walter* aufgrund seines großen Erfolgs in mehrere Sprachen übersetzt. Im Jahr 2004 erschien, 50 Jahre nach der Erstauflage, die 24. und bisher letzte Auflage dieses Klassikers.

Zwar wurden mit jeder neuen Auflage Aktualisierungen vorgenommen, Fehler korrigiert und neue Themen aufgenommen. Nach mittlerweile über 60 Jahren im Einsatz stellte sich aber die Frage, ob solche Änderungen am bestehenden Buch noch ausreichen, um den *Beyer/Walter* auch für die nächsten Jahrzehnte fit zu machen. Vielleicht war es an der Zeit, eine umfassendere Überarbeitung und gegebenenfalls komplette Neugestaltung in Angriff zu nehmen? Denn trotz aller erfolgten inhaltlichen Überarbeitungen und Aktualisierungen hatten sich in all den Jahren natürlich auch Erwartungen und Ansprüche an Grafik, Layout und Sprache eines Lehrbuchs stark verändert. Manche Beschreibungen chemischer Sachverhalte im alten *Beyer/Walter* klingen aus heutiger Sicht mittlerweile ungewohnt. Heute übliche Begriffe wie Nucleophil und Elektrophil wurden früher nicht benutzt, stattdessen sprach man z. B. von Donor- und Akzeptorkomponenten. Auch die moderne Betrachtung von Reaktivitäten und Eigenschaften von Verbindungen auf der Basis von Molekülorbitalen und deren Wechselwirkungen gab es damals in dieser Form noch nicht. Der Verlag hat daher entschieden, dass mit der 25. Auflage eine komplette Überarbeitung und Modernisierung stattfinden sollte.

Als der Verlag uns Anfang 2012 fragte, ob wir diese Aufgabe übernehmen wollen, war unsere spontane Antwort: „Im Prinzip ja, aber...“. Einerseits reizte uns die Chance, an der Neugestaltung dieses Klassikers, den wir alle selbst aus unserem Studium kannten, mitarbeit-

ten zu dürfen. Andererseits hatten wir großen Respekt vor dieser Herausforderung. Wie gestaltet man ein seit Jahrzehnten etabliertes Lehrbuch neu, bewahrt aber gleichzeitig seinen Charakter und seine von der Leserschaft geschätzten Vorzüge gegenüber anderen Lehrbüchern? Die inhaltliche Basis der vorliegenden Komplettüberarbeitung bildet daher nach wie vor die 24. Auflage von 2004, in der wir allerdings an vielen Stellen Ergänzungen und Aktualisierungen vorgenommen, veraltete Verfahren und Methoden gestrichen und dafür neue aufgenommen haben.

Insbesondere haben wir aber den Inhalt komplett neu sortiert und arrangiert, wie ein Blick ins Inhaltsverzeichnis sofort zeigt. Anstelle von 11 großen Kapiteln mit vielen Unterkapiteln, haben wir die Stoffklassen in insgesamt 35 Kapiteln neu zusammengefasst.

Auch innerhalb der Kapitel haben wir eine neue Strukturierung eingeführt. Bei jeder Stoffklasse beschreiben wir zuerst die Strukturen und Eigenschaften, dann die Gewinnung und Synthese, bevor wir wichtige Reaktionen und Anwendungen vorstellen. Abschließend werden einzelne ausgewählte Vertreter der Stoffklasse diskutiert. Diese neue Aufteilung soll es erleichtern, zuerst einmal die allgemeinen Zusammenhänge und Grundprinzipien, die für die gesamte Stoffklasse gelten, zu erkennen und zu verstehen, bevor man sich dann einzelnen Verbindungen und deren teilweise sehr speziellen Anwendungen und Besonderheiten zuwendet. Neu im Buch sind zudem Exkurse, in denen wir z. B. historische oder medizinisch-pharmakologische Hintergründe, interessante Anekdoten, aber auch wichtige Reaktionen und Mechanismen detaillierter vorstellen. Einen Überblick finden Sie hinten im Buch.

Die Besprechung von Reaktionen und Mechanismen erfolgt bewusst nicht in der Tiefe und Detailfülle wie in anderen Lehrbüchern der Organischen Chemie. Der *Beyer/Walter* war nie ein „Mechanismen-Buch“ und sollte auch bei der Neugestaltung durch uns keines werden. Das Hauptanliegen des Buches ist und bleibt die Beschreibung der Stoffklassen und einzelner Verbindungen. Komplett neu geschrieben haben wir den Allgemeinen Teil, der jetzt in den ersten drei Kapiteln Stoffe und ihre Zusammensetzung (Kapitel 1), Atom- und chemische Bindung, funktionelle Gruppen und deren nasschemische und instrumentelle Analytik (Kapitel 2) sowie die Struktur und Stereochemie organischer Verbindungen (Kapitel 3) beschreibt.

Auch beim Layout wurden deutliche Änderungen vorgenommen. Die jeweiligen Informationen präsentieren wir bewusst in längeren Fließtexten, während gleichzeitig einzelne Strukturformeln und Reaktionsschemata zu größeren Abbildungen zusammengefasst

sind. Dadurch sind Text und graphische Informationen stärker voneinander getrennt als es im *Beyer/Walter* bisher der Fall war. Wir sind der Meinung, dass so der Lesefluss und damit letztendlich das Verständnis erleichtert werden.

Alle Formeln und Abbildungen wurden zudem komplett neu gestaltet und mit einem einheitlichen Farbschema versehen. So sind z. B. alle Verbindungsnamen in Blau, physikalische Eigenschaften und Beschreibungen in Grün und wichtige Strukturelemente in Rot gehalten. An vielen Stellen illustrieren wir die diskutierten Sachverhalte zusätzlich durch Farbabbildungen.

Bei all diesen vielen Änderungen glauben wir, dass die Neufassung nichts von den Vorzügen und Stärken des „alten“ *Beyer/Walter* verloren hat, dafür aber übersichtlicher und insgesamt moderner und ansprechender geworden ist. Ob und in wie weit uns das gelungen ist, müssen Sie als Leserinnen und Leser selbst entscheiden. Wir laden Sie ein, uns Ihre Eindrücke und Erfahrungen mit dieser Neufassung mitzuteilen. Unsere E-Mail-Adressen finden Sie im Impressum. Zögern Sie nicht, mit uns in Kontakt zu treten! Helfen Sie uns durch Ihre Rückmeldungen, den *Beyer/Walter* so weiterzuentwickeln, dass er auch weiterhin das Standardwerk für die Organische Stoffchemie bleibt, das er seit Jahrzehnten ist.

Selbstverständlich wäre ein solches Projekt nicht machbar gewesen ohne die tatkräftige Unterstützung

und Mithilfe vieler Personen. Zuerst einmal möchten wir Herrn Dr. Tim Kersebohm, Frau Dr. Gabriele Lauser und Frau Natascha Wenzel vom S. Hirzel Verlag danken. Herr Kersebohm war seitens des Verlages die treibende Kraft für dieses Projekt und hat uns mit vielen Ratschlägen und Anregungen zur Seite gestanden. Frau Lauser hat das gesamte Manuskript federführend Korrektur gelesen und war maßgeblich an der Umsetzung des Layouts beteiligt. Frau Wenzel hat im Verlag die Herstellung des Buches betreut. Ein besonders großer Dank geht an unsere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die uns bei der Erstellung der Texte und der Neugestaltung der Formelzeichnungen und Abbildungen geholfen haben. Ohne diese Hilfe wäre die Neufassung niemals innerhalb von drei Jahren fertig geworden. Wer uns im Einzelnen unterstützt hat, lesen Sie ganz vorne im Buch. Abschließend danken wir auch unseren Partnerinnen und Partnern, die uns in den letzten 3 ½ Jahren viele, viele Stunden entbehren mussten, während derer wir Texte geschrieben, Manuskripte korrigiert und Abbildungen verbessert haben.

Und jetzt viel Spaß mit dem neuen *Beyer/Walter*!

Mainz und Essen, im Herbst 2015    Tanja Schirmeister  
Carsten Schmuck  
Peter R. Wich

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	V	2.5.5 NMR-Spektroskopie .....	44
Abkürzungsverzeichnis .....	XVI	2.5.6 Kristallstrukturanalyse, Röntgenstrukturanalyse .....	52
<b>1 Stoffe und ihre Zusammensetzung.....</b>	<b>1</b>	<b>3 Struktur organischer Verbindungen und Stereochemie .....</b>	<b>53</b>
1.1 Organische Chemie und organische Stoffe	1	<b>3.1 Konstitution und Struktur .....</b>	<b>53</b>
1.2 Zusammensetzung und Reinheit organischer Stoffe .....	3	3.1.1 Historische Aspekte .....	53
1.2.1 Reinsubstanzen und Stoffgemische .....	3	3.1.2 Konstitution, Konnektivität und Darstellungs- weisen organischer Verbindungen (Formeln) .....	53
1.2.2 Charakterisierung organischer Verbindungen	3	<b>3.2 Isomerie .....</b>	<b>54</b>
1.3 Trennung von homogenen Stoffgemischen .....	4	3.2.1 Konstitutions- und Stereoisomere .....	54
1.3.1 Extraktion .....	5	3.2.2 Konfigurations- und Konformationsisomere	56
1.3.2 Kristallisation .....	6	3.2.3 Tautomerie .....	56
1.3.3 Destillation .....	6	<b>3.3 Konformation .....</b>	<b>58</b>
1.3.4 Sublimation – Resublimation .....	7	3.3.1 Torsionswinkel .....	58
1.3.5 Chromatographie .....	7	3.3.2 Ethan-Konformationen .....	59
<b>2 Atombau, chemische Bindung, funktionelle Gruppen und deren Analytik .....</b>	<b>11</b>	3.3.3 <i>n</i> -Butan-Konformationen .....	60
2.1 Atombau .....	11	3.3.4 <i>n</i> -Pentan-Konformationen .....	61
2.2 Chemische Bindung .....	14	<b>3.4 Optische Isomerie und Chiralität .....</b>	<b>63</b>
2.2.1 Ionenbindung .....	14	3.4.1 Chiralitäts- und Symmetrieelemente .....	63
2.2.2 Atombindung .....	15	3.4.2 Spezifische Drehung und Polarimetrie .....	66
2.2.3 C–H-, C–C-, C=C- und C≡C-Bindungen ..	16	3.4.3 Enantiomere: <i>Fischer</i> -Projektion und D/L-Nomenklatur .....	68
2.3 Funktionelle Gruppen .....	20	3.4.4 Enantiomere: absolute Konfiguration nach CIP .....	71
2.3.1 Hard and Soft Acids and Bases (HSAB), <i>Lewis</i> -Säuren und -Basen .....	21	3.4.5 Axiale und planare Chiralität .....	72
2.3.2 Induktive und mesomere Effekte funktio- neller Gruppen .....	25	3.4.6 Trennung von Enantiomeren, stereo- selektive Synthese .....	75
2.4 Nasschemische Analytik funktioneller Gruppen .....	27	<b>3.5 Diastereoisomerie .....</b>	<b>79</b>
2.4.1 Einführung und allgemeine Prinzipien .....	27	3.5.1 Verbindungen mit mehreren Chiralitätselementen .....	79
2.4.2 Nachweis von primären aromatischen Ami- nen, elektronenreichen Aromaten und Nitrit	29	3.5.2 ( <i>E/Z</i> )-Isomerie .....	81
2.4.3 Nachweis von Nitrat, nitrierbaren Aromaten und CH-aciden Verbindungen .....	29	<b>3.6 Prochiralität und Topizität .....</b>	<b>84</b>
2.4.4 Nachweis von elektronenreichen Aromaten und Aldehyden unter Zugabe von Säure ....	30	3.6.1 Prochiralität .....	84
2.5 Spektroskopische Methoden .....	33	3.6.2 Topizität .....	84
2.5.1 Elektromagnetische Strahlung, Energie und ihre Auswirkungen auf organische Moleküle	33	<b>3.7 Pseudochiralität .....</b>	<b>87</b>
2.5.2 Massenspektrometrie .....	35	<b>3.8 Stereochemie von Cycloalkanen .....</b>	<b>88</b>
2.5.3 IR-Spektroskopie .....	39	3.8.1 Ringspannung .....	88
2.5.4 UV/Vis-Spektroskopie .....	41	3.8.2 Einfache Cycloalkane .....	90
		3.8.3 Stereoisomerie der Decaline .....	94
		<b>3.9 Konformation von Peptiden .....</b>	<b>98</b>

<b>4</b>	<b>Gesättigte Kohlenwasserstoffe</b> .....	<b>99</b>	<b>6.3</b>	<b>Thiole</b> .....	<b>198</b>
<b>4.1</b>	<b>Alkane</b> .....	<b>99</b>	6.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	198
4.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	99	6.3.2	Gewinnung und Synthese .....	198
4.1.2	Gewinnung und Synthese .....	104	6.3.3	Reaktionen und Anwendungen .....	200
4.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	105	6.3.4	Ausgewählte Verbindungen .....	200
<b>4.2</b>	<b>Monocyclische Alkane (Cycloalkane)</b> .....	<b>106</b>	<b>7</b>	<b>Halogenalkane</b> .....	<b>203</b>
4.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	106	<b>7.1</b>	<b>Monohalogenalkane</b>	
4.2.2	Gewinnung und Synthese .....	110		<b>(Alkylhalogenide)</b> .....	<b>203</b>
4.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	116	7.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	204
<b>4.3</b>	<b>Bi- und polycyclische Kohlenwasserstoffe</b> .....	<b>118</b>	7.1.2	Gewinnung und Synthese .....	205
4.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	118	7.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	208
4.3.2	Gewinnung und Synthese .....	122	7.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	212
4.3.3	Reaktionen und Anwendungen .....	125	<b>7.2</b>	<b>Mehrfach halogenierte Alkane</b> .....	<b>212</b>
<b>5</b>	<b>Ungesättigte aliphatische Kohlenwasserstoffe</b> .....	<b>129</b>	7.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	212
<b>5.1</b>	<b>Alkene (Olefine) und Cycloalkene</b> .....	<b>129</b>	7.2.2	Gewinnung und Synthese .....	213
5.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	129	7.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	215
5.1.2	Gewinnung und Synthese .....	130	7.2.4	Ausgewählte Verbindungen .....	216
5.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	131	<b>7.3</b>	<b>Fluorierte Kohlenwasserstoffe</b> .....	<b>216</b>
5.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	146	7.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	216
<b>5.2</b>	<b>Konjugierte Polyene</b> .....	<b>150</b>	7.3.2	Gewinnung und Synthese .....	217
5.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	150	7.3.3	Reaktionen und Anwendungen .....	218
5.2.2	Reaktionen und Anwendungen .....	151	7.3.4	Ausgewählte Verbindungen .....	218
5.2.3	Ausgewählte Verbindungen .....	157	<b>8</b>	<b>Aliphatische Stickstoffverbindungen</b> .....	<b>221</b>
<b>5.3</b>	<b>Kumulene</b> .....	<b>163</b>	<b>8.1</b>	<b>Amine</b> .....	<b>221</b>
5.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	163	8.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	222
5.3.2	Gewinnung und Synthese .....	164	8.1.2	Gewinnung und Synthese .....	223
5.3.3	Ausgewählte Verbindungen .....	166	8.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	226
<b>5.4</b>	<b>Alkine</b> .....	<b>168</b>	8.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	231
5.4.1	Struktur und Eigenschaften .....	168	<b>8.2</b>	<b>Diazoverbindungen, Diazirine,</b>	
5.4.2	Gewinnung und Synthese .....	169		<b>Diaziridine</b> .....	<b>233</b>
5.4.3	Reaktionen und Anwendungen .....	169	8.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	233
5.4.4	Ausgewählte Verbindungen .....	174	8.2.2	Gewinnung und Synthese .....	234
<b>6</b>	<b>Alkohole und Thiole</b> .....	<b>175</b>	8.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	236
<b>6.1</b>	<b>Einwertige Alkohole</b> .....	<b>175</b>	8.2.4	Ausgewählte Verbindungen .....	237
6.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	175	<b>8.3</b>	<b>Aliphatische Hydrazine und Azide</b> .....	<b>238</b>
6.1.2	Gewinnung und Synthese .....	178	8.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	238
6.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	181	8.3.2	Gewinnung und Synthese .....	239
6.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	183	8.3.3	Reaktionen und Anwendungen .....	242
<b>6.2</b>	<b>Mehrwertige Alkohole</b> .....	<b>184</b>	8.3.4	Ausgewählte Verbindungen .....	243
6.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	184	<b>9</b>	<b>Ether und Thioether</b> .....	<b>245</b>
6.2.2	Gewinnung und Synthese .....	185	<b>9.1</b>	<b>Ether</b> .....	<b>245</b>
6.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	185	9.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	245
6.2.4	Ausgewählte Verbindungen .....	191	9.1.2	Gewinnung und Synthese .....	248
			9.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	249

<b>9.2 Thioether</b> .....	<b>251</b>	11.3.2 Gewinnung und Synthese.....	290
9.2.1 Struktur und Eigenschaften.....	251	11.3.3 Reaktionen und Anwendungen.....	290
9.2.2 Gewinnung und Synthese.....	251	<b>11.4 Organische Quecksilberverbindungen</b> .....	<b>292</b>
9.2.3 Reaktionen und Anwendungen.....	251	11.4.1 Struktur und Eigenschaften.....	292
9.2.4 Ausgewählte Verbindungen .....	253	11.4.2 Gewinnung und Synthese.....	292
<b>10 Organische Derivate anorganischer Säuren, organische Derivate der Elemente P, B, Si und As</b> .....	<b>255</b>	11.4.3 Reaktionen und Anwendungen.....	293
<b>10.1 Ester anorganischer Säuren</b> .....	<b>255</b>	<b>11.5 Organische Aluminiumverbindungen</b> .....	<b>293</b>
10.1.1 Struktur und Eigenschaften.....	255	11.5.1 Struktur und Eigenschaften.....	293
10.1.2 Gewinnung und Synthese.....	257	11.5.2 Gewinnung und Synthese.....	293
10.1.3 Reaktionen und Anwendungen.....	258	11.5.3 Reaktionen und Anwendungen.....	295
10.1.4 Ausgewählte Verbindungen .....	260	<b>11.6 Organische Zinnverbindungen</b> .....	<b>295</b>
<b>10.2 Sulfon-, Sulfin- und Sulfensäuren</b> .....	<b>263</b>	11.6.1 Struktur und Eigenschaften.....	295
10.2.1 Struktur und Eigenschaften.....	263	11.6.2 Gewinnung und Synthese.....	295
10.2.2 Gewinnung und Synthese.....	264	11.6.3 Reaktionen und Anwendungen.....	295
10.2.3 Reaktionen und Anwendungen.....	265	<b>11.7 Organische Bleiverbindungen</b> .....	<b>296</b>
10.2.4 Ausgewählte Verbindungen .....	266	11.7.1 Struktur und Eigenschaften.....	296
<b>10.3 Nitroalkane</b> .....	<b>266</b>	11.7.2 Gewinnung und Synthese.....	296
10.3.1 Struktur und Eigenschaften.....	266	11.7.3 Reaktionen und Anwendungen.....	297
10.3.2 Gewinnung und Synthese.....	269	<b>11.8 Organische Übergangsmetallkomplexe</b> ....	<b>297</b>
10.3.3 Reaktionen und Anwendungen.....	271	11.8.1 Struktur und Eigenschaften.....	297
<b>10.4 Organische Phosphor- und Arsenverbindungen</b> .....	<b>272</b>	11.8.2 Reaktionen und Anwendungen.....	299
10.4.1 Struktur und Eigenschaften.....	272	<b>12 Aliphatische Carbonylverbindungen</b> .	<b>305</b>
10.4.2 Gewinnung und Synthese.....	272	<b>12.1 Alkanale (aliphatische Aldehyde)</b> .....	<b>305</b>
10.4.3 Reaktionen und Anwendungen.....	273	12.1.1 Struktur und Eigenschaften.....	305
10.4.4 Ausgewählte Verbindungen .....	276	12.1.2 Gewinnung und Synthese.....	306
<b>10.5 Organische Silicium- und Borverbindungen</b> .....	<b>277</b>	12.1.3 Reaktionen und Anwendungen.....	307
10.5.1 Struktur und Eigenschaften.....	277	12.1.4 Ausgewählte Verbindungen .....	317
10.5.2 Gewinnung und Synthese.....	277	<b>12.2 Alkanone (aliphatische Ketone)</b> .....	<b>323</b>
10.5.3 Reaktionen und Anwendungen.....	278	12.2.1 Struktur und Eigenschaften.....	323
10.5.4 Ausgewählte Verbindungen .....	282	12.2.2 Gewinnung und Synthese.....	323
<b>11 Metallorganische Verbindungen</b> .....	<b>283</b>	12.2.3 Reaktionen und Anwendungen.....	325
<b>11.1 Alkalimetallorganische Verbindungen (Alkalimetallorganyle)</b> .....	<b>283</b>	12.2.4 Ausgewählte Verbindungen .....	331
11.1.1 Struktur und Eigenschaften.....	283	<b>13 Aliphatische Mono- und Dicarbonsäuren</b> .....	<b>339</b>
11.1.2 Gewinnung und Synthese.....	284	<b>13.1 Gesättigte Mono- und Dicarbonsäuren</b> ....	<b>339</b>
11.1.3 Reaktionen und Anwendungen.....	285	13.1.1 Struktur und Eigenschaften.....	339
<b>11.2 Organische Magnesiumverbindungen</b> .....	<b>286</b>	13.1.2 Gewinnung und Synthese.....	344
11.2.1 Struktur und Eigenschaften.....	286	13.1.3 Reaktionen und Anwendungen.....	351
11.2.2 Gewinnung und Synthese.....	286	13.1.4 Ausgewählte Verbindungen .....	357
11.2.3 Reaktionen und Anwendungen.....	287	<b>13.2 Ungesättigte aliphatische Mono- und Dicarbonsäuren</b> .....	<b>358</b>
<b>11.3 Organische Zinkverbindungen</b> .....	<b>290</b>	13.2.1 Struktur und Eigenschaften.....	358
11.3.1 Struktur und Eigenschaften.....	290	13.2.2 Gewinnung und Synthese.....	359
		13.2.3 Reaktionen und Anwendungen.....	366
		13.2.4 Ausgewählte Verbindungen .....	372

<b>14</b>	<b>Carbonsäurederivate</b> .....	<b>375</b>	<b>16</b>	<b>Derivate von Kohlensäure, Cyansäure und Kohlenstoffmonoxid sowie Carbene und Nitrene</b> .....	<b>433</b>
<b>14.1</b>	<b>Carbonsäurehalogenide</b> .....	<b>375</b>	<b>16.1</b>	<b>Kohlensäure und ihre Derivate</b> .....	<b>433</b>
14.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	375	16.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	433
14.1.2	Gewinnung und Synthese .....	375	16.1.2	Gewinnung und Synthese .....	436
14.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	376	16.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	438
<b>14.2</b>	<b>Carbonsäureanhydride</b> .....	<b>378</b>	16.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	443
14.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	378	<b>16.2</b>	<b>(Iso-)Cyansäure und ihre Derivate</b> .....	<b>444</b>
14.2.2	Gewinnung und Synthese .....	379	16.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	445
14.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	381	16.2.2	Gewinnung und Synthese .....	450
<b>14.3</b>	<b>Ketene</b> .....	<b>382</b>	16.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	453
14.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	382	<b>16.3</b>	<b>Kohlenstoffmonoxid und seine Derivate</b> ..	<b>455</b>
14.3.2	Gewinnung und Synthese .....	382	16.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	455
14.3.3	Reaktionen und Anwendungen .....	383	16.3.2	Gewinnung und Synthese .....	456
<b>14.4</b>	<b>Ester und Orthoester</b> .....	<b>383</b>	16.3.3	Reaktionen und Anwendungen .....	457
14.4.1	Struktur und Eigenschaften .....	383	16.3.4	Ausgewählte Verbindungen .....	459
14.4.2	Gewinnung und Synthese .....	383	<b>16.4</b>	<b>Carbene, Carbine und Nitrene als instabile Zwischenprodukte</b> .....	<b>459</b>
14.4.3	Reaktionen und Anwendungen .....	386	16.4.1	Struktur und Eigenschaften .....	459
<b>14.5</b>	<b>Carbonsäureamide</b> .....	<b>389</b>	16.4.2	Gewinnung und Synthese .....	461
14.5.1	Struktur und Eigenschaften .....	389	16.4.3	Reaktionen und Anwendungen .....	461
14.5.2	Gewinnung und Synthese .....	390	16.4.4	Ausgewählte Verbindungen .....	463
14.5.3	Reaktionen und Anwendungen .....	391	<b>17</b>	<b>Kohlenhydrate</b> .....	<b>465</b>
<b>14.6</b>	<b>Sonstige N-Derivate der Carbonsäuren</b> .....	<b>392</b>	<b>17.1</b>	<b>Monosaccharide</b> .....	<b>466</b>
<b>15</b>	<b>Carbonsäuren mit zusätzlichen funktionellen Gruppen</b> .....	<b>399</b>	17.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	466
<b>15.1</b>	<b>Halogencarbonsäuren</b> .....	<b>399</b>	17.1.2	Gewinnung und Synthese .....	474
15.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	399	17.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	476
15.1.2	Gewinnung und Synthese .....	400	17.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	488
15.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	403	<b>17.2</b>	<b>Oligosaccharide</b> .....	<b>493</b>
15.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	403	17.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	493
<b>15.2</b>	<b>Hydroxycarbonsäuren und Lactone</b> .....	<b>403</b>	17.2.2	Gewinnung und Synthese .....	493
15.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	403	17.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	494
15.2.2	Gewinnung und Synthese .....	407	17.2.4	Ausgewählte Verbindungen .....	496
15.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	410	<b>17.3</b>	<b>Polysaccharide (Glycane)</b> .....	<b>500</b>
15.2.4	Ausgewählte Verbindungen .....	412	<b>18</b>	<b>Aromatische Kohlenwasserstoffe (Arene)</b> .....	<b>511</b>
<b>15.3</b>	<b>Aminocarbonsäuren</b> .....	<b>414</b>	<b>18.1</b>	<b>Benzen</b> .....	<b>511</b>
15.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	414	18.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	511
15.3.2	Gewinnung und Synthese .....	416	18.1.2	Gewinnung und Synthese .....	515
15.3.3	Reaktionen und Anwendungen .....	417	18.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	516
15.3.4	Ausgewählte Verbindungen .....	420	<b>18.2</b>	<b>Alkylderivate des Benzens (Alkylbenzene)</b> ..	<b>516</b>
<b>15.4</b>	<b>Aldehyd- und Ketocarbonsäuren</b> .....	<b>422</b>	18.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	516
15.4.1	Struktur und Eigenschaften .....	422	18.2.2	Gewinnung und Synthese .....	517
15.4.2	Gewinnung und Synthese .....	424	18.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	518
15.4.3	Reaktionen und Anwendungen .....	427	18.2.4	Ausgewählte Verbindungen .....	518
15.4.4	Ausgewählte Verbindungen .....	430			

<b>18.3</b>	<b>Benzenderivate mit heteroatomhaltigen Seitenketten</b> .....	<b>519</b>	<b>21.2</b>	<b>Aromatische Ketone</b> .....	<b>592</b>
			21.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	592
			21.2.2	Gewinnung und Synthese .....	592
<b>18.4</b>	<b>Benzenderivate mit ungesättigten Substituenten</b> .....	<b>522</b>	21.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	594
			21.2.4	Ausgewählte Verbindungen .....	597
<b>19</b>	<b>Aromaten mit Halogen-, Nitro- und Sulfonsäuregruppen</b> .....	<b>527</b>	<b>21.3</b>	<b>Aromatische Monocarbonsäuren – Benzoessäure und ihre Derivate</b> .....	<b>599</b>
<b>19.1</b>	<b>Halogenierte Aromaten (Arylhalogenide)</b> .....	<b>527</b>	21.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	599
19.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	527	21.3.2	Gewinnung und Synthese .....	602
19.1.2	Gewinnung und Synthese .....	527	21.3.3	Reaktionen und Anwendungen .....	602
19.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	535	<b>21.4</b>	<b>Gesättigte arylsubstituierte aliphatische Monocarbonsäuren</b> .....	<b>608</b>
<b>19.2</b>	<b>Nitroaromaten</b> .....	<b>537</b>	21.4.1	Struktur und Eigenschaften .....	608
19.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	537	21.4.2	Gewinnung und Synthese .....	608
19.2.2	Gewinnung und Synthese .....	537	21.4.3	Reaktionen und Anwendungen .....	610
19.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	541	21.4.4	Ausgewählte Verbindungen .....	610
19.2.4	Ausgewählte Verbindungen .....	542	<b>21.5</b>	<b>Ungesättigte arylsubstituierte aliphatische Monocarbonsäuren</b> .....	<b>611</b>
<b>19.3</b>	<b>Aromatische Sulfonsäuren</b> .....	<b>543</b>	21.5.1	Struktur und Eigenschaften .....	611
19.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	543	21.5.2	Gewinnung und Synthese .....	612
19.3.2	Gewinnung und Synthese .....	544	21.5.3	Ausgewählte Verbindungen .....	613
19.3.3	Reaktionen und Anwendungen .....	544	<b>21.6</b>	<b>Aromatische Dicarbonsäuren</b> .....	<b>614</b>
19.3.4	Ausgewählte Verbindungen .....	548	21.6.1	Struktur und Eigenschaften .....	614
<b>20</b>	<b>Phenole und Derivate</b> .....	<b>553</b>	21.6.2	Gewinnung und Synthese .....	614
<b>20.1</b>	<b>Einwertige Phenole</b> .....	<b>553</b>	21.6.3	Reaktionen und Anwendungen .....	615
20.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	553	<b>22</b>	<b>Aromatische Stickstoffverbindungen</b> .....	<b>619</b>
20.1.2	Gewinnung und Synthese .....	553	<b>22.1</b>	<b>Aromatische Amine</b> .....	<b>619</b>
20.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	554	22.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	619
20.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	556	22.1.2	Gewinnung und Synthese .....	621
<b>20.2</b>	<b>Mehrwertige Phenole</b> .....	<b>563</b>	22.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	623
20.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	563	22.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	626
20.2.2	Ausgewählte Verbindungen .....	563	<b>22.2</b>	<b>Aromatische Azo- und Diazoniumverbindungen</b> .....	<b>627</b>
<b>20.3</b>	<b>Phenylether</b> .....	<b>571</b>	22.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	627
20.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	571	22.2.2	Gewinnung und Synthese .....	628
20.3.2	Gewinnung und Synthese .....	571	22.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	630
20.3.3	Ausgewählte Verbindungen .....	572	22.2.4	Ausgewählte Verbindungen .....	637
<b>20.4</b>	<b>Benzochinone</b> .....	<b>572</b>	<b>23</b>	<b>Oligo- und Polyphenyle, Arylalkane</b> .....	<b>639</b>
20.4.1	Struktur und Eigenschaften .....	572	<b>23.1</b>	<b>Biphenyle</b> .....	<b>639</b>
20.4.2	Reaktionen und Anwendungen .....	574	23.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	639
<b>21</b>	<b>Aromatische Carbonyl- und Carboxyverbindungen</b> .....	<b>579</b>	23.1.2	Gewinnung und Synthese .....	640
<b>21.1</b>	<b>Aromatische Aldehyde</b> .....	<b>579</b>	23.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	640
21.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	579	<b>23.2</b>	<b>Terphenyle und Polyphenyle</b> .....	<b>641</b>
21.1.2	Gewinnung und Synthese .....	580	23.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	641
21.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	584	23.2.2	Gewinnung und Synthese .....	642
21.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	590	23.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	642

<b>23.3 Arylmethane</b> .....	<b>644</b>	<b>25.2 Azulene</b> .....	<b>690</b>
23.3.1 Struktur und Eigenschaften .....	644	25.2.1 Struktur und Eigenschaften .....	690
23.3.2 Gewinnung und Synthese .....	646	25.2.2 Gewinnung und Synthese .....	691
23.3.3 Reaktionen und Anwendungen .....	647	25.2.3 Reaktionen und Anwendungen .....	692
23.3.4 Ausgewählte Verbindungen .....	649	25.2.4 Ausgewählte Verbindungen .....	692
<b>23.4 Arylethane und freie Radikale</b> .....	<b>653</b>	<b>25.3 Kationische, nichtbenzoide Aromaten</b> .....	<b>694</b>
23.4.1 Struktur und Eigenschaften .....	653	25.3.1 Struktur und Eigenschaften .....	694
23.4.2 Gewinnung und Synthese .....	653	25.3.2 Gewinnung und Synthese .....	695
23.4.3 Reaktionen und Anwendungen .....	657	25.3.3 Reaktionen und Anwendungen .....	695
<b>24 Kondensierte aromatische Ringsysteme</b> .....	<b>661</b>	25.3.4 Ausgewählte Verbindungen .....	695
<b>24.1 Inden</b> .....	<b>662</b>	<b>25.4 Anionische, nichtbenzoide Aromaten</b> .....	<b>696</b>
24.1.1 Struktur und Eigenschaften .....	662	25.4.1 Struktur und Eigenschaften .....	696
24.1.2 Gewinnung und Synthese .....	662	25.4.2 Gewinnung und Synthese .....	697
24.1.3 Reaktionen und Anwendungen .....	663	25.4.3 Reaktionen und Anwendungen .....	698
24.1.4 Ausgewählte Verbindungen .....	663	25.4.4 Ausgewählte Verbindungen .....	699
<b>24.2 Fluoren</b> .....	<b>664</b>	<b>26 Terpene</b> .....	<b>703</b>
24.2.1 Struktur und Eigenschaften .....	664	<b>26.1 Monoterpene</b> .....	<b>703</b>
24.2.2 Gewinnung und Synthese .....	664	26.1.1 Struktur, Eigenschaften und Anwendungen .....	704
24.2.3 Reaktionen und Anwendungen .....	665	26.1.2 Gewinnung und Synthese .....	709
24.2.4 Ausgewählte Verbindungen .....	665	<b>26.2 Terpene aus drei bis acht Isopreneinheiten</b> .....	<b>715</b>
<b>24.3 Naphthalen</b> .....	<b>666</b>	26.2.1 Struktur und Eigenschaften .....	715
24.3.1 Struktur und Eigenschaften .....	666	26.2.2 Gewinnung und Synthese .....	723
24.3.2 Gewinnung und Synthese .....	666	<b>26.3 Polyterpene</b> .....	<b>726</b>
24.3.3 Reaktionen und Anwendungen .....	667	26.3.1 Struktur und Eigenschaften .....	726
24.3.4 Ausgewählte Verbindungen .....	669	<b>27 Steroide</b> .....	<b>731</b>
<b>24.4 Anthracen</b> .....	<b>674</b>	<b>27.1 Natürliche und synthetische Steroide</b> .....	<b>731</b>
24.4.1 Struktur und Eigenschaften .....	674	27.1.1 Struktur und Eigenschaften .....	731
24.4.2 Gewinnung und Synthese .....	674	27.1.2 Gewinnung und Synthese .....	734
24.4.3 Reaktionen und Anwendungen .....	674	27.1.3 Ausgewählte Verbindungen .....	736
24.4.4 Ausgewählte Verbindungen .....	676	<b>28 Fünfringe mit einem Heteroatom</b> .....	<b>753</b>
<b>24.5 Phenanthren</b> .....	<b>680</b>	<b>28.1 Pyrrolgruppe</b> .....	<b>753</b>
24.5.1 Struktur und Eigenschaften .....	680	28.1.1 Struktur und Eigenschaften .....	753
24.5.2 Gewinnung und Synthese .....	681	28.1.2 Gewinnung und Synthese .....	754
24.5.3 Reaktionen und Anwendungen .....	681	28.1.3 Reaktionen und Anwendungen .....	755
<b>24.6 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe mit vier und mehr Ringen</b> .....	<b>682</b>	28.1.4 Ausgewählte Verbindungen .....	758
<b>25 Nichtbenzoide Aromaten und Annulene</b> .....	<b>687</b>	<b>28.2 Furangruppe</b> .....	<b>766</b>
<b>25.1 Annulene</b> .....	<b>687</b>	28.2.1 Struktur und Eigenschaften .....	766
25.1.1 Struktur und Eigenschaften .....	687	28.2.2 Gewinnung und Synthese .....	767
25.1.2 Gewinnung und Synthese .....	689	28.2.3 Reaktionen und Anwendungen .....	767
25.1.3 Reaktionen und Anwendungen .....	690	28.2.4 Ausgewählte Verbindungen .....	768
		<b>28.3 Thiophengruppe</b> .....	<b>771</b>
		28.3.1 Struktur und Eigenschaften .....	771
		28.3.2 Gewinnung und Synthese .....	771
		28.3.3 Reaktionen und Anwendungen .....	771

<b>29</b>	<b>Benzanellierte Ringsysteme der Pyrrol-, Furan- und Thiophengruppe</b>	<b>775</b>	<b>31</b>	<b>Fünfringe mit drei oder mehr Heteroatomen</b>	<b>823</b>
<b>29.1</b>	<b>Indolverbindungen</b>	<b>775</b>	<b>31.1</b>	<b>Triazole</b>	<b>823</b>
29.1.1	Struktur und Eigenschaften	775	31.1.1	Struktur und Eigenschaften	823
29.1.2	Gewinnung und Synthese	776	31.1.2	Gewinnung und Synthese	824
29.1.3	Reaktionen und Anwendungen	777	31.1.3	Reaktionen und Anwendungen	824
29.1.4	Ausgewählte Verbindungen	777	31.1.4	Ausgewählte Verbindungen	825
<b>29.2</b>	<b>Indolizinverbindungen</b>	<b>782</b>	<b>31.2</b>	<b>Tetrazol</b>	<b>828</b>
29.2.1	Struktur und Eigenschaften	782	31.2.1	Struktur und Eigenschaften	828
29.2.2	Gewinnung und Synthese	783	31.2.2	Gewinnung und Synthese	828
29.2.3	Reaktionen und Anwendungen	783	31.2.3	Reaktionen und Anwendungen	828
29.2.4	Ausgewählte Verbindungen	783	31.2.4	Ausgewählte Verbindungen	829
<b>29.3</b>	<b>Isoindole und Isobenzofurane</b>	<b>784</b>	<b>31.3</b>	<b>Pentazol</b>	<b>830</b>
29.3.1	Struktur und Eigenschaften	784	31.3.1	Struktur und Eigenschaften	830
29.3.2	Gewinnung und Synthese	784	31.3.2	Gewinnung und Synthese	831
29.3.3	Reaktionen und Anwendungen	785	<b>31.4</b>	<b>Thiadiazol</b>	<b>831</b>
29.3.4	Ausgewählte Verbindungen	786	31.4.1	Struktur und Eigenschaften	831
<b>29.4</b>	<b>Cumarone und Thionaphthene</b>	<b>788</b>	31.4.2	Gewinnung und Synthese	831
29.4.1	Struktur und Eigenschaften	788	31.4.3	Reaktionen und Anwendungen	831
29.4.2	Gewinnung und Synthese	788	31.4.4	Ausgewählte Verbindungen	832
29.4.3	Reaktionen und Anwendungen	789	<b>32</b>	<b>Sechsringe mit einem Heteroatom</b>	<b>835</b>
29.4.4	Ausgewählte Verbindungen	789	<b>32.1</b>	<b>Pyridingruppe</b>	<b>835</b>
<b>29.5</b>	<b>Kondensierte tricyclische Systeme</b>	<b>790</b>	32.1.1	Struktur und Eigenschaften	835
29.5.1	Struktur und Eigenschaften	790	32.1.2	Gewinnung und Synthese	836
29.5.2	Gewinnung und Synthese	791	32.1.3	Reaktionen und Anwendungen	836
29.5.3	Reaktionen und Anwendungen	791	32.1.4	Ausgewählte Verbindungen	838
29.5.4	Ausgewählte Verbindungen	791	<b>32.2</b>	<b>Pyrangruppe</b>	<b>843</b>
<b>30</b>	<b>Fünfringe mit zwei Heteroatomen</b>	<b>793</b>	32.2.1	Struktur und Eigenschaften	843
<b>30.1</b>	<b>Pyrazolgruppe</b>	<b>793</b>	32.2.2	Gewinnung und Synthese	843
30.1.1	Struktur und Eigenschaften	793	32.2.3	Reaktionen und Anwendungen	845
30.1.2	Gewinnung und Synthese	794	32.2.4	Ausgewählte Verbindungen	845
30.1.3	Reaktionen und Anwendungen	794	<b>33</b>	<b>Benzanellierte Sechs- und Siebenringe</b>	<b>847</b>
30.1.4	Ausgewählte Verbindungen	798	<b>33.1</b>	<b>Benzopyridine, Dibenzopyridine und Benzopyrane</b>	<b>847</b>
<b>30.2</b>	<b>Imidazolgruppe</b>	<b>802</b>	33.1.1	Struktur und Eigenschaften	847
30.2.1	Struktur und Eigenschaften	802	33.1.2	Gewinnung und Synthese	848
30.2.2	Gewinnung und Synthese	804	33.1.3	Reaktionen und Anwendungen	852
30.2.3	Reaktionen und Anwendungen	805	33.1.4	Ausgewählte Verbindungen	855
30.2.4	Ausgewählte Verbindungen	806	<b>33.2</b>	<b>Benzazepine, Dibenzazepine und Benzodiazepine</b>	<b>866</b>
<b>30.3</b>	<b>Oxazol, Isoxazol</b>	<b>810</b>	33.2.1	Struktur und Eigenschaften	866
30.3.1	Struktur und Eigenschaften	810	33.2.2	Gewinnung und Synthese	866
30.3.2	Gewinnung und Synthese	812	33.2.3	Reaktionen und Anwendungen	868
30.3.3	Reaktionen und Anwendungen	812	33.2.4	Ausgewählte Verbindungen	870
30.3.4	Ausgewählte Verbindungen	814			
<b>30.4</b>	<b>Thiazol, Isothiazol</b>	<b>815</b>			
30.4.1	Struktur und Eigenschaften	815			
30.4.2	Gewinnung und Synthese	815			
30.4.3	Reaktionen und Anwendungen	816			
30.4.4	Ausgewählte Verbindungen	818			

<b>34</b>	<b>Sechsringe mit zwei und drei Heteroatomen</b> .....	<b>873</b>	<b>36</b>	<b>Alkaloide</b> .....	<b>917</b>
<b>34.1</b>	<b>Diazine</b> .....	<b>873</b>	<b>36.1</b>	<b>Alkaloide vom Tetrahydropyrrol-, Pyridin- und Piperidin-Typ</b> .....	<b>918</b>
34.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	873	36.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	918
34.1.2	Gewinnung und Synthese .....	876	36.1.2	Gewinnung und Synthese .....	920
34.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	877	36.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	920
34.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	879	36.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	922
<b>34.2</b>	<b>Benzodiazine</b> .....	<b>883</b>	<b>36.2</b>	<b>Alkaloide vom Tropan-Typ</b> .....	<b>923</b>
34.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	883	36.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	923
34.2.2	Gewinnung und Synthese .....	883	36.2.2	Gewinnung und Synthese .....	925
34.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	884	36.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	926
34.2.4	Ausgewählte Verbindungen .....	884	<b>36.3</b>	<b>Alkaloide vom Chinolizidin-Typ</b> .....	<b>928</b>
<b>34.3</b>	<b>Piperazine, Thiazine, Oxazine, Dioxine</b> .....	<b>885</b>	36.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	928
34.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	885	36.3.2	Gewinnung und Synthese .....	928
34.3.2	Gewinnung und Synthese .....	885	36.3.3	Reaktionen und Anwendungen .....	928
34.3.3	Reaktionen und Anwendungen .....	885	<b>36.4</b>	<b>Alkaloide vom Chinolin-Typ</b> .....	<b>929</b>
34.3.4	Ausgewählte Verbindungen .....	886	36.4.1	Struktur und Eigenschaften .....	929
<b>34.4</b>	<b>Phenazine, Phenoxazine, Dibenzo-<i>p</i>-dioxine und Phenothiazine</b> .....	<b>888</b>	36.4.2	Gewinnung und Synthese .....	929
34.4.1	Struktur und Eigenschaften .....	888	36.4.3	Reaktionen und Anwendungen .....	930
34.4.2	Gewinnung und Synthese .....	889	<b>36.5</b>	<b>Alkaloide vom Isochinolin-Typ</b> .....	<b>931</b>
34.4.3	Reaktionen und Anwendungen .....	889	36.5.1	Struktur und Eigenschaften .....	931
34.4.4	Ausgewählte Verbindungen .....	889	36.5.2	Gewinnung und Synthese .....	933
<b>34.5</b>	<b>Triazine</b> .....	<b>894</b>	36.5.3	Reaktionen und Anwendungen .....	934
34.5.1	Struktur und Eigenschaften .....	894	36.5.4	Ausgewählte Verbindungen .....	935
34.5.2	Gewinnung und Synthese .....	894	<b>36.6</b>	<b>Alkaloide vom Indol-Typ</b> .....	<b>937</b>
34.5.3	Reaktionen und Anwendungen .....	894	36.6.1	Struktur und Eigenschaften .....	937
34.5.4	Ausgewählte Verbindungen .....	896	36.6.2	Gewinnung und Synthese .....	939
<b>35</b>	<b>Stickstoffhaltige bicyclische Heterosysteme (Heterobicyclen)</b> .....	<b>899</b>	36.6.3	Reaktionen und Anwendungen .....	939
<b>35.1</b>	<b>Purine</b> .....	<b>899</b>	<b>37</b>	<b>Aminosäuren, Peptide und Proteine</b> .....	<b>943</b>
35.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	899	<b>37.1</b>	<b>Aminosäuren</b> .....	<b>943</b>
35.1.2	Gewinnung und Synthese .....	900	37.1.1	Struktur und Eigenschaften .....	943
35.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	901	37.1.2	Gewinnung und Synthese .....	944
35.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	902	37.1.3	Reaktionen und Anwendungen .....	946
<b>35.2</b>	<b>Pteridine und Pterine</b> .....	<b>908</b>	37.1.4	Ausgewählte Verbindungen .....	948
35.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	908	<b>37.2</b>	<b>Peptide</b> .....	<b>954</b>
35.2.2	Gewinnung und Synthese .....	908	37.2.1	Struktur und Eigenschaften .....	954
35.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	909	37.2.2	Gewinnung und Synthese .....	954
35.2.4	Ausgewählte Verbindungen .....	909	37.2.3	Reaktionen und Anwendungen .....	957
<b>35.3</b>	<b>Weitere Heterobicyclen</b> .....	<b>913</b>	37.2.4	Ausgewählte Verbindungen .....	960
			<b>37.3</b>	<b>Proteine</b> .....	<b>968</b>
			37.3.1	Struktur und Eigenschaften .....	968
			37.3.2	Gewinnung und Synthese .....	971
			37.3.3	Reaktionen und Anwendungen .....	972
			37.3.4	Ausgewählte Verbindungen .....	973

<b>38 Nucleinsäuren</b> .....	<b>979</b>	<b>Wichtige Reaktionen und Begriffe</b>	
<b>38.1 Nucleobasen, Nucleoside und Nucleotide</b> .....	<b>979</b>	<b>in der Organischen Chemie</b> .....	<b>999</b>
38.1.1 Struktur und Eigenschaften .....	979	<b>Bildnachweis</b> .....	<b>1013</b>
38.1.2 Gewinnung und Synthese .....	980	<b>Sachregister</b> .....	<b>1017</b>
38.1.3 Reaktionen und Anwendungen .....	983	<b>Die Autoren</b> .....	<b>1175</b>
38.1.4 Ausgewählte Verbindungen .....	984		
<b>38.2 RNA und DNA</b> .....	<b>985</b>		
38.2.1 Struktur und Eigenschaften .....	985		
38.2.2 Gewinnung und Synthese .....	986		
38.2.3 Reaktionen und Anwendungen .....	988		
38.2.4 Ausgewählte Verbindungen .....	996		

## Abkürzungsverzeichnis

A	Einbuchstaben-Code für Alanin	CI	chemische Ionisierung
ABA	Abscisinsäure	CIP-System	<i>Cahn-Ingold-Prelog-System</i>
ABS	Alkylbenzensulfonat	CJK	<i>Creutzfeldt-Jakob-Krankheit</i>
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styren	CM-Cellulose	Carboxymethylcellulose
ACE	<i>angiotensin converting enzyme</i>	CMP	Cytidin-5'-monophosphat
Acetyl-CoA	Acetyl-Coenzym A	COC	Cycloolefin-Copolymer
AChE	Acetylcholinesterase	COMP	<i>cartilago oligomeric matrix protein</i>
ACL	D,L- $\alpha$ -Amino- $\beta$ -caprolactam	COSY	<i>correlated NMR spectroscopy</i>
ACP	Acyl-Carrier-Protein	COT	Cyclooctatetraen
ACS	<i>American Chemical Society</i>	COX	Cyclooxygenase
ACTH	Corticotropin, adeno-corticotropes Hormon	Cp-	Cyclopentadienyl
ADH	Vasopressin, antidiuretisches Hormon	CPG	<i>controlled pore glass</i> (nanoporige Glaskapillare)
ADHS	Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung	CR	Chloroprenkautschuk
ADP	Adenosintriphosphat	CRD	<i>carbohydrate recognition domain</i>
AGE	<i>advanced glycosylation end products</i>	CSE	Cholesterol-Synthese-Enzym
AHA	$\alpha$ -Hydroxycarbonsäuren ( <i><math>\alpha</math>-hydroxy acid</i> )	CT-Komplex	Charge-Transfer-Komplex
AHL	N-Acylhomoserinlacton	CVD	<i>chemical vapor deposition</i>
AIBN	$\alpha,\alpha'$ -Azoisobutyronitril	CW-Verfahren	<i>Continuous-Wave-Verfahren</i>
AIDS	<i>Acquired immune(o) deficiency syndrome</i>	CYP	Cytochrom P450
AMP	Adenosin-5'-monophosphat	D	Einbuchstaben-Code für Asparaginsäure
AO	Atomorbital	Da	Dalton
APCI	<i>atmospheric pressure CI</i>	DABCO	1,4-Diazabicyclo[2.2.2]octan
APG	Alkylpolyglucoside	DBN	1,5-Diazabicyclo[4.3.0]non-5-en
AP-Stelle	apurinische / apyrimidinische Stelle	DBP	Dibutylphthalat
Ar-	Aryl	DBU	1,8-Diazabicyclo[5.4.0]undec-7-en
ASIS	<i>aromatic solvent induced shift</i>	DC	Dünnschichtchromatographie
ASS	Acetylsalicylsäure	DCC	Dicyclohexylcarbodiimid
ATP	Adenosintriphosphat	DCIP	Dichlorindophenol-Natrium
ATR	<i>attenuated total reflexion</i> (abgeschwächte Totalreflexion)	DCN	1,4-Naphthalendicarbonitril
AZT	Azidothymidin	DCM	Dichlormethan
BDE	Bindungsdissoziationsenergie	DDD	Dichlordiphenyldichlorethan
BHT-	Butylhydroxytoluyl	DDE	Dichlordiphenyldichlorethylen
BINAP-	2,2'-Bisdiphenylphosphino-1,1'-binaphthyl	DDQ	2,3-Dichlor-5,6-dicyanobenzochinon
Boc-	<i>tert</i> -Butyloxycarbonyl	DDT	Dichlorodiphenyltrichloroethan
Botox	Botulinustoxin	DEAD	Azodicarbonsäurediethylester, Diethyldicarboxylat
BSE	<i>bovine spongiforme encephalopathy</i>	DEHP	Bis-2-ethylhexylphthalat / Di-2-ethylhexylphthalat
BTX-Aromaten	Benzen, Toluol und Xylen-Isomere	DEPC	Diethylpyrocarbonat
C	Einbuchstaben-Code für Cystein	DEPT	<i>distorsionless enhancement by polarization transfer</i>
CADD	<i>computer-aided drug design</i>	DET	Diethylphthalat
Cbz-	Carbobenzyoxy	de-Wert	Diastereomerenüberschuss
CDA	chirales Derivatisierungsreagenz	DHA	Docosahexaensäure
CFK	Carbonfaser-verstärkte Kunststoffe	DHCD	<i>cis</i> -5,6-Dihydroxy-1,3-cyclohexadien
CFKW	Chlorfluorkohlenwasserstoffe	DHEA	Dehydroepiandrosteron
CGTase	Cyclodextrin-Glycosyl-Transferase	DHQ	Dihydrochinin
HCC	Hexachlorcyclohexan	DIAD	Diisopropylazodicarboxylat
		DIBAH,	Diisobutylaluminiumhydrid
		DIBAL-H	

Diglyme	Diethylenglycolmonomethylether	FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
DIOP	O-Isopropyliden-2,3-dihydroxy-1,4-bis(diphenylphosphino)butan	FMN, FMNH <sub>2</sub>	Flavinmononucleotid (oxidierte bzw. reduzierte Form)
DIPEA	Diisopropylethylamin	FOSHU	<i>foods for specified health use</i>
DMAB	p-Dimethylaminobenzaldehyd	FSH	follikelstimulierendes Hormon
DMAP	4-Dimethylaminopyridin	FT-NMR	Fourier-Transformations-NMR-Spektroskopie
DMARD	<i>disease-modifying anti-rheumatic drug</i>	FVP	<i>flash vacuum pyrolysis</i>
DMDO	Dimethyldioxiran	G	Einbuchstaben-Code für Glycin
DMF	Dimethylformamid	GABA	γ-Aminobuttersäure / 4-Aminobuttersäure
DMPS	Dimercaptopropansulfonsäure	GAG	Glycosaminoglycane
DMS	Dimethylsulfat	GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker
DMSO	Dimethylsulfoxid	GFR	glomeruläre Filtrationsrate
DMT-	Dimethoxytrityl	GlcA	D-Gluconsäure
DNA	Desoxyribonucleinsäure	Glc NAc	N-Acetyl-D-glucosamin-Einheiten
DNOC	4,6-Dinitro-o-kresol	GlcU	D-Glucuronsäure
DNP-	Dinitrophenyl	GLP-1	<i>Glucagon-like peptide 1</i>
dNTP	Desoxyribonucleotidtriphosphat	GMP	Guanosin-5'-monophosphat
DOP	Diocetylphthalat	GSH	Gluthathion-SH
DOPA	3,4-Dihydroxyphenylalanin	GTP	Gruppen-Transfer-Polymerisation
DPP	Dipeptidylpeptidase	Gul U	L-Guluronsäure
DPPA	Diphenylphosphorylazid	h	<i>hour</i> (Stunde)
DPPH-	2,2-Diphenyl-1-pikrylhydrazyl	H	Einbuchstaben-Code für Histidin
dr-Wert	Diastereomerenverhältnis	HCH	Hexachlorcyclohexan
dT	Desoxythymidin	HDI	Hexamethyldiisocyanat
DTPA-	Pentetsäure, Diethylentriaminpentessigsäure	HDL	<i>high density lipoprotein</i>
E	Einbuchstaben-Code für Glutaminsäure	HDPE	<i>high density polyethylene</i>
(E)-	chemischer Deskriptor: entgegen	HEDP	Hydroxyethylidendiphosphat
EC	Ethylcellulose	HETCOR	heteronucleare Korrelationsspektroskopie
EDA-Komplex	Elektronendonator-Akzeptor-Komplex	HFCS	<i>high fructose corn syrup</i>
EDC	N-(3-Dimethylaminopropyl)-N'-ethylcarbodiimid	HIV	Humanes Immundefizienz-Virus
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure	HMBC	<i>heteronuclear multiple bond correlation</i>
EEP	erythroetische Protoporphyrin	HMG-CoA	Hydroxymethylglutaryl-Coenzym A
EI	Elektronenionisierung	HMQC	<i>heteronuclear multiple quantum correlation</i>
EPA	Eicosapentaensäure	HNDP	Hexanitrodiphenylamin
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>	HNS	Hexanitrostilben
EPC	<i>enantiomeric pure compounds</i>	HOBt	1-Hydroxybenzotriazol
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Monomer	HOMO	<i>highest occupied molecular orbital</i>
EPM	Ethylen-Propylen-Monomer	HPLC	<i>high pressure liquid chromatography</i>
EPR	<i>ethylene-propylene rubber</i>	HPTLC	<i>high performance thin layer chromatography</i>
EPS	expandiertes Polystyren	HSA	Humanes Serum Albumin
er-Wert	Enantiomerenverhältnis	HSAB	<i>hard and soft acids and bases</i>
ESI	electron spray ionization	HSD	Hydroxy-Steroid-Dehydrogenase
ESR	Elektronenspinresonanz	HSQC	<i>heteronuclear single quantum correlation</i>
Et-	Ethyl	HX	Halogenwasserstoffe
EVA	Ethylenvinylacetat	Hz	Hertz
F	Einbuchstaben-Code für Phenylalanin		
FAB	<i>fast atom bombardment</i>		
FAD, FADH <sub>2</sub>	Flavinadeninucleotid (oxidierte bzw. reduzierte Form)		

I	Einbuchstaben-Code für Isoleucin	mg	Milligramm
ICR-Zelle	Ionen-Zyklotron-Resonanz-Zelle	mL	Milliliter
I-Effekt	induktiver Effekt	MMA	Methacrylsäuremethylester / Methylmethacrylat
IEP	isoelektrischer Punkt		
IIR	<i>isobutylene isoprene rubber</i>	MMH	Monomethylhydrazin
IMP	Inosin-5'-monophosphat	mmol	Millimol
INEPT	<i>insensitive nuclei enhancement by polarization transfer</i>	MO	Molekülorbital
INH	Isonicotinsäurehydrazid	MOM	Methoxymethylether
IPR	<i>isolated pentagon rule</i>	MPLC	<i>middle pressure liquid chromatography</i>
IR	<i>cis</i> -1,4-Polyisopren	MPS	multiple Peptidsynthese
IR	Infrarot	MRT	Magnetresonanztomographie
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>	MS	Massenspektrometrie
		MSG	Mononatriumglutamat
		MTBE	Methyl- <i>tert</i> -butylether
		MTPA	$\alpha$ -Methoxy- $\alpha$ -trifluormethyl- phenylessigsäure
K	Einbuchstaben-Code für Lysin	Mur	Muraminsäure
KIE	Isotopeneffekt, kinetischer		
kJ	Kilojoule		
KKK	KKK-Regel („Kälte, Katalysator, Kern“)	N	Einbuchstaben-Code für Asparagin
KRE	konstitutionelle Repetiereinheit	nACh-Rezeptor	Acetylcholin-Rezeptor
K-S	Kopf-Schwanz-Verknüpfungen	NAD <sup>+</sup> / NADH	Nicotinamidadenindinukleotid
		NBS	<i>N</i> -Bromsuccinimid
		NDB-Cl	7-Chloro-4-nitrobenzo-2-oxa-1,3- diazol
L	Einbuchstaben-Code für Leucin	NDB-F	7-Fluoro-4-nitrobenzo-2-oxa-1,3- diazol
LAL	Lysinoalanin	NDELA	<i>N</i> -Nitrosodiethanolamin
LCAO	Linearkombination von Atom- orbitalen	NIH	<i>National Institutes of Health</i>
LDA	Lithiumdiisopropylamid	NHS	<i>N</i> -Hydroxysuccinimid
LDL	<i>low density lipoprotein</i>	nm	Nanometer
LDPE	<i>low density polyethylene</i>	NMA	<i>N</i> -Methylanilin
LFER	lineare freie Energiebeziehung	NMDA	<i>N</i> -Methyl-D-asparaginsäure
LH	luteinisierendes Hormon	NM(M)O	<i>N</i> -Methylmorpholin- <i>N</i> -oxid
LIS	<i>lanthanide induced shift</i>	NMOC	<i>non methane organic compounds</i>
LNA	<i>locked nucleic acid</i>	NMP	<i>N</i> -Methyl-2-pyrrolidon
LNG	<i>liquified natural gas</i> (Flüssiggas)	NMR	<i>nuclear magnetic resonance</i> (kernmagnetische Resonanz)
LOX	Lipoxygenase	NOE	Kern- <i>Overhauser</i> -Effekt
LSD	(+)-Lysergsäurediethylamid	NOS	NO-Synthase
LTBA	Lithium-tri- <i>tert</i> -butyloxyaluminium- hydrid	NRTI	nucleosidische Reverse-Transkriptase- Inhibitoren
LUMO	<i>lowest unoccupied molecular orbital</i>	NSAID	<i>nonsteroidal anti-inflammatory drug</i>
<i>m</i> -	chemischer Deskriptor: <i>meta</i>	NSAR	nichtsteroidales Antirheumatikum
M	Einbuchstaben-Code für Methionin	NTA	Trilon A / Nitriлотriessigsäure
mM	Millimolar	NTP	Nucleosidtriphosphat
MAB	<i>monoclonal antibody</i>	<i>o</i> -	chemischer Deskriptor: <i>ortho</i>
mACh	Muscarinrezeptor	OMEGA-	<i>Only Mono Ethylen Glycol Advanced</i>
MALDI	<i>matrix assisted laser desorption ionization</i>	Prozess	Process
MAO	Methylaluminioxan	OMP	Orotidin-5'-monophosphat
MAO-B	Monoaminoxidase B		
MCPBA	<i>m</i> -Chlorperbenzoesäure	<i>p</i> -	chemischer Deskriptor: <i>para</i>
MDI	Diphenylmethandiisocyanat	P	Einbuchstaben-Code für Prolin
MDMA	3,4-Methylendioxyderivat des Methamphetamins	PABA	<i>p</i> -Aminobenzoesäure
M-Effekt	mesomerer Effekt	PAGE	Polyacrylamid-Gelelektrophorese
Me-	Methyl	PAH	Phenylalaninhydroxylase

PAK	polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe	QCN	quartäres Phosphoniumcyanid
PAN	Polyacrylnitril	QqQ	Tripelquad
PAPS	3'-Phosphoadenosin-5'-phosphosulfat	R	Einbuchstaben-Code für Arginin
PAS	<i>p</i> -Aminosalicylsäure	R	Rest
PBG	Porphobilogen	RAAS	Renin-Angiotensin-Aldosteron-System
PC	Polycarbonate	RAF	<i>radical adduct formation</i>
PCB	Polychlorbiphenyl	RAMP	( <i>R</i> )-(+)-1-Amino-2-methoxymethylpyrrolidin
PCC	Pyridiniumchlorochromat	RDX	1,3,5-Trinitro-1,3,5-triazinan
PCDD	polychlorierte Dibenzodioxine	RNA	Ribonucleinsäure
PCDF	polychlorierte Dibenzofurane	ROMP	ringöffnende Metathese-Polymerisation
PCR	<i>polymerase chain reaction</i>	ROS	reaktive Sauerstoffspezies
PDE	Phosphodiesterase	RP	<i>reversed phase</i>
PDT	photodynamische Therapie	RT	Raumtemperatur
PE	Polyethen	S	Einbuchstaben-Code für Serin
PEA	$\beta$ -Phenylethylamin	SAMP	( <i>S</i> )-(-)-1-Amino-2-methoxymethylpyrrolidin
PEG	Polyethylenglycol	SBR	Styren-Butadien-Kautschuk
PEG-MME	Polyethylenglycolmonomethylether	SBS	Styren-Butadien-Styren-Dreiblockpolymere
PER	Perchlorethylen	SC	Säulenchromatographie
PET	Polyethylenterephthalat	scCO <sub>2</sub>	überkritisches Kohlendioxid
PETN	Pentaerythritetranitrat	SDS	<i>sodium dodecyl sulfate</i>
PFOS	Perfluorooctansäure	SDS-PAGE	<i>sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis</i>
PFT	perfluorierte Tenside	<i>sec</i> -	chemischer Deskriptor: sekundär
PGE <sub>2</sub>	Dinoproston	SELEX	Systematische Evolution von Liganden durch exponentielle Anreicherung
Ph-	Phenyl	SET	<i>single electron transfer</i>
pH	<i>pondus hydrogenii</i>	siRNAs	<i>small interfering RNAs</i>
PHB	Polyhydroxybuttersäure	SMILES	<i>simplified molecular input line entry specification</i>
PHV	Polyhydroxyvaleriansäure	SMR	<i>standard malaysian rubber</i>
PICI	<i>positive ion chemical ionization</i>	SNARE	<i>soluble N-ethylmaleimide-sensitive-factor attachment receptor</i>
PKU	Phenylketonurie	SOMO	<i>single occupied molecular orbital</i>
PLMF 1	<i>periodic leaf movement factor 1</i>	SSS	SSS-Regel („Siedehitze, Sonnenlicht, Seitenkette“)
PMA	Phorbol-12-myristat-13-acetat	S-S	Schwanz-Schwanz-Verknüpfungen
PMMA	Polymethacrylsäuremethylester	T	Einbuchstaben-Code für Threonin
PP	Polypropylen	TADDOL	$\alpha, \alpha, \alpha, \alpha'$ -Tetraaryl-1,2-dioxolan-4,5-dimethanol
PPA	Polyphosphorsäure	TAH	Thrombozytenaggregationshemmer
ppm	<i>parts per million</i>	TBAH	Tetrabutylammoniumhydroxid
PPP	Poly- <i>p</i> -phenylen	TBHP	<i>tert</i> -Butylhydroperoxid
PPS	Poly- <i>p</i> -phenylensulfid	TBT	Tributylzinnhydrid
PPV	Poly- <i>p</i> -phenylenvinyle	TBTO	Tributylzinnoxid
PRPP	Phosphoribosylpyrophosphat	TCA	Trichloressigsäure
PSC	polare Stratosphärenwolken	TCDD	2,3,7,8-Tetrachlordibenzo- <i>p</i> -dioxin (Dioxin)
PTAD	4-Phenyl-3 <i>H</i> -1,2,4-triazolin-3,5-dion		
PTC	Phasentransferkatalyse		
PTFE	Polytetrafluorethylen		
PUFA	<i>polyunsaturated fatty acid</i>		
PUR	Polyurethane		
PVAm	Polyvinylamin		
PVAP	Polyvinylacetatphthalat		
PVC	Polyvinylchlorid		
PyBOP	Benzotriazol-1-yl-oxyltripyrrolidino-phosphoniumhexafluorophosphat		
Q	Einbuchstaben-Code für Glutamin		
Qcl	Hexadecyltributylphosphoniumchlorid		

TCE	Trichlorethen	Ts-	Tosyl
TCM	traditionelle chinesische Medizin	TTC	Triphenyltetrazoliumchlorid
TCNE	Tetracyanoethylen	TT-Kautschuk	Tieftemperaturkautschuk
TDI	Toluylendiisocyanat		
TEDA	Triethylendiamin	U	Einbuchstaben-Code für Selenocystein
<i>tert-</i>	chemischer Deskriptor: tertiär	UDMH	unsymmetrisches Dimethylhydrazin
TFA	Trifluoressigsäure	UV	Ultraviolett
TFE	Tetrafluorethen	UMP	Uridin-5'-monophosphat
THC	Tetrahydrocannabinol	UVA	nahes UV
THF	Tetrahydrofuran	UVB	mittleres UV
THP-Ether	Tetrahydropyranylether		
TMEDA	Tetraethylmethyldiamin	V	Einbuchstaben-Code für Valin
TMS-Cl	Chlortrimethylsilan	Vis	sichtbares Licht, UV/Vis
TMS-	Trimethylsilyl	VLDL	<i>very low density lipoprotein</i>
TMSOTf	Trimethylsilyltrifluormethansulfonat	VX	<i>Tammelin</i> scher Ester
TNB	1,3,5-Trinitrobenzen		
TNP	Pikrinsäure	W	Einbuchstaben-Code für Tryptophan
TNR	Styphninsäure		
TNT	2,4,6-Trinitrotoluen	Y	Einbuchstaben-Code für Tyrosin
ToF	<i>time of flight</i>		
TOS	Toluensulfonsäure	(Z)-	chemischer Deskriptor: zusammen
TPAP	Tetrapropylammoniumperruthenat	ZNS	Zentralnervensystem
TRI	Trichlorethen		

# 1 Stoffe und ihre Zusammensetzung

Organische Chemie und organische Stoffe ... 1 | Zusammensetzung und Reinheit  
organischer Stoffe ... 3 | Trennung von homogenen Stoffgemischen ... 4

## 1.1 Organische Chemie und organische Stoffe

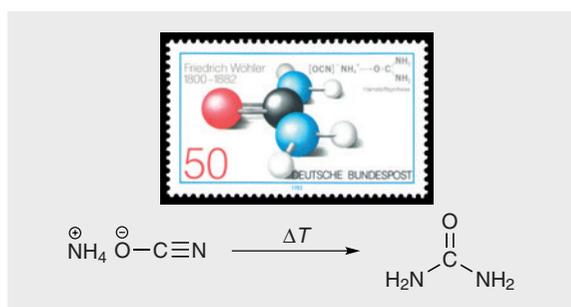
Die Zeit des Übergangs von der Alchemie als Naturphilosophie zur Chemie als Naturwissenschaft im 17./18. Jahrhundert ging einher mit einer zunehmenden Aufteilung der Chemie in verschiedene Teilbereiche wie die Anorganische und die Organische Chemie. Neben Mineralien wurden nun auch Stoffe des Pflanzen- und Tierreichs in naturwissenschaftliche Experimente mit einbezogen. Die enge chemische Verwandtschaft der Stoffe aus Tieren und Pflanzen einerseits und das im Vergleich dazu auf den ersten Blick scheinbar andere Verhalten anorganischer Substanzen wie Metalle und Erze führte im Laufe der Zeit zu einer immer stärkeren Abgrenzung organischer von anorganischen Verbindungen.

Anfangs wurden vor allem von *Scheele* seit der Mitte des 18. Jahrhunderts aus pflanzlichen oder tierischen Produkten isolierte Säuren analysiert, wie Oxalsäure, Äpfelsäure, Weinsäure, Citronensäure, Milchsäure, Harnsäure sowie die aus Fetten oder Ölen gewonnenen Fettsäuren. Einblicke in die elementaren Zusammensetzungen organischer Stoffe waren jedoch erst möglich, nachdem *Lavoisier* (1779), fußend auf den Erkenntnissen von *Scheele* (1771, publiziert 1777) und *Priestley* (1774), die Bedeutung des Sauerstoffs bei Verbrennungsprozessen erkannte. Er widerlegte die damals weit verbreitete **Phlogiston**-Lehre (zurückgehend auf *Becher* 1667), die eine hypothetische Substanz namens Phlogiston postulierte, welche in allen brennbaren Stoffen enthalten sei und bei einer Verbrennung frei werden sollte. *Lavoisier* stellte hingegen fest, dass jede Verbrennung mit der Aufnahme von Sauerstoff verbunden ist. Die Entstehung von Kohlendioxid, Wasser, Stickstoff oder Stickoxiden bei der Verbrennung von pflanzlichen oder tierischen Stoffen zeigte damit die Anwesenheit der Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff in der verbrannten Substanz an. Entstanden Kohlendioxid und Wasser auch bei Verbrennung unter Luftausschluss,

bewies dies die Anwesenheit von Sauerstoff in den untersuchten Substanzen.

Die Bezeichnung „Organische Chemie“ wurde als eigenständiger Begriff erstmalig 1784 von *Bergman* geprägt. Sie geht auf die Vorstellung zurück, dass es sich dabei um die Chemie der belebten Natur handelt. Die damalige Auffassung war, dass sich diese Organische Chemie grundsätzlich von der Anorganischen Chemie unterscheidet und nur in lebenden Organismen möglich sei, die über eine besondere Lebenskraft (*vis vitalis*) verfügen. Diese als Vitalismus bezeichnete Auffassung wurde durch Experimente wie die im Jahre 1828 von *Wöhler* durchgeführte **Harnstoffsynthese** widerlegt. *Wöhler* gelang es, Ammoniumcyanat,  $\text{NH}_4\text{OCN}$ , ein typisch anorganisches Salz, durch Erhitzen in **Harnstoff** zu überführen (● Abb. 1.1). Harnstoff ist eine typisch organische, körpereigene Substanz, die *Rouelle* als wichtiges Stoffwechselprodukt bereits 1773 aus dem Harn isoliert hatte (daher stammt auch der Name).

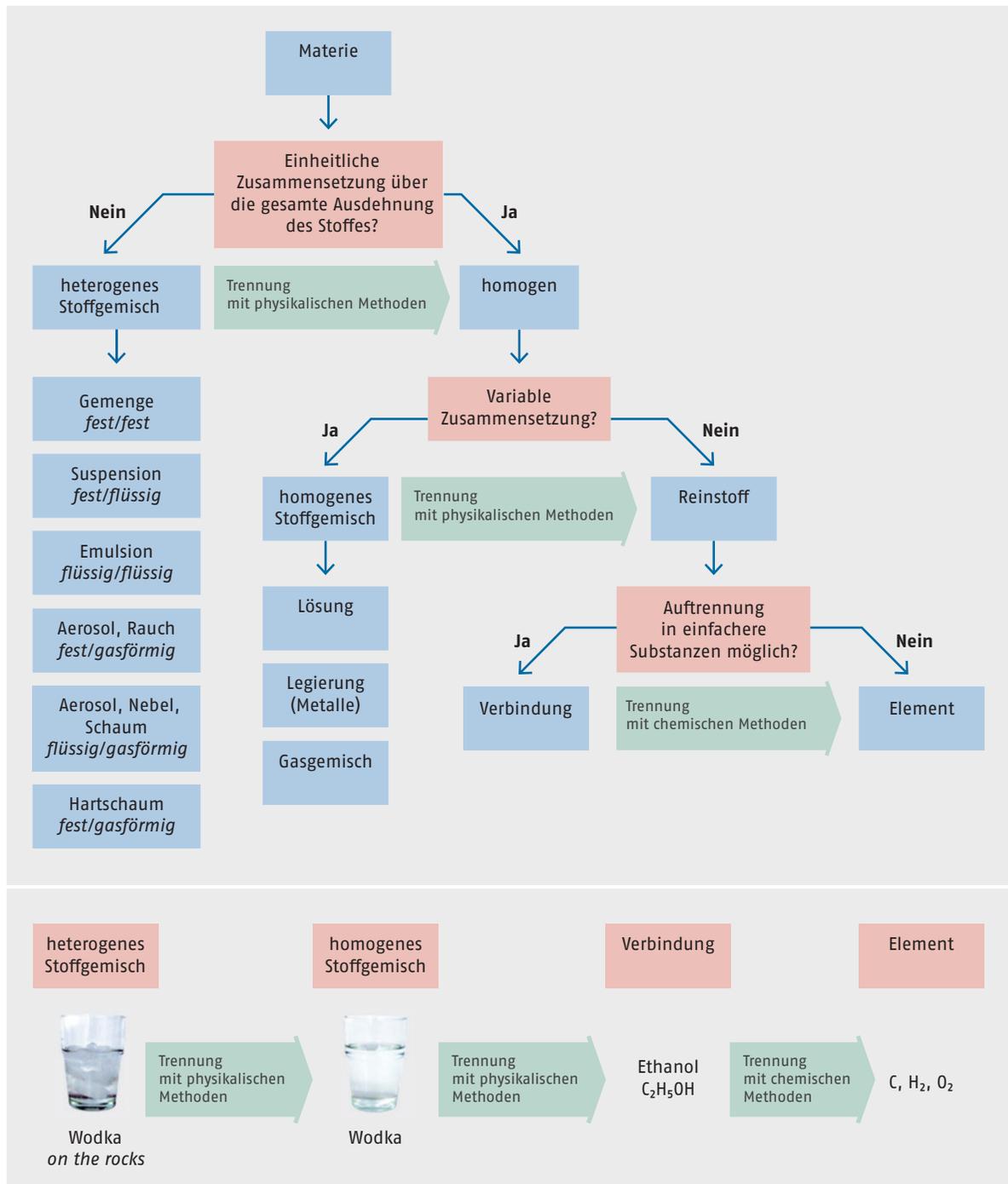
Trotz dieses und ähnlicher Experimente hielt sich die vorherrschende Vitalismus-Theorie noch eine erstaunlich lange Zeit. Erst als in der Folgezeit nicht nur bereits bekannte, aus der belebten Natur isolierte Stoffe, sondern auch neuartige, nicht natürlich vorkommende organische Substanzen synthetisiert wurden, erkannte man, dass auch die Organische Chemie einer breiten präparativen Bearbeitung im Labor zugänglich ist und sich nicht grundsätzlich von der Chemie der unbelebten Natur unterscheidet.



● Abb. 1.1 Harnstoffsynthese aus Ammoniumcyanat

In der Mitte des 19. Jahrhunderts setzte sich letztlich die Erkenntnis durch, dass die Gegenwart von **Kohlenstoff** die Grundvoraussetzung für eine organische Substanz ist. Dies führte dazu, die organischen Substanzen als Kohlenstoffverbindungen (*Gmelin, Kolbe, Kekulé*) oder als **Carbogene** (*Corey 1989*) zu bezeichnen. So werden laut IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry, Compendium of Chemical Terminology*, [www.goldbook.iupac.org](http://www.goldbook.iupac.org)), die Begriffe „organo-“ oder „organyl-“ allgemein für Verbindungen verwendet, die Kohlenstoffatome beinhalten. Die IUPAC ist eine internationale Institution, die in der Chemie alle Empfehlungen, z. B. die Terminologie und Nomenklatur betreffend, festlegt. Die meisten organischen Verbindungen enthalten außer Kohlenstoff nur wenige andere Elemente, vor allem Wasserstoff und die Hetero-

logy, [www.goldbook.iupac.org](http://www.goldbook.iupac.org)), die Begriffe „organo-“ oder „organyl-“ allgemein für Verbindungen verwendet, die Kohlenstoffatome beinhalten. Die IUPAC ist eine internationale Institution, die in der Chemie alle Empfehlungen, z. B. die Terminologie und Nomenklatur betreffend, festlegt. Die meisten organischen Verbindungen enthalten außer Kohlenstoff nur wenige andere Elemente, vor allem Wasserstoff und die Hetero-



• **Abb. 1.2** Materie ist letztlich aus Verbindungen aufgebaut, die aus Molekülen bestehen, die wiederum aus Elementen aufgebaut sind.

atome (so nennt man alle anderen Elemente außer C und H) Sauerstoff und Stickstoff. Ferner treten als weitere Heteroatome häufig u. a. Schwefel, Phosphor und Halogene auf. Grundsätzlich lässt sich fast jedes Element des Periodensystems in organische Verbindungen einbauen, so auch Metalle. Man spricht dann von organometallischen Verbindungen. Dazu werden auch Verbindungen gezählt, die neben den traditionellen Metallen und Halbmetallen auch Bor, Silicium, Arsen oder z. B. Selen enthalten. Von den weit über 70 Millionen derzeit bekannten chemischen Verbindungen leiten sich mehr als 80 % vom Kohlenstoff ab.

## 1.2 Zusammensetzung und Reinheit organischer Stoffe

### 1.2.1 Reinsubstanzen und Stoffgemische

Die Chemie beschäftigt sich mit den Eigenschaften von Materie und ihrem Aufbau aus Molekülen bzw. Atomen. Unter Materie versteht man alles Stoffliche, also alles, was **Masse** besitzt und **Raum** einnimmt. Während die meisten Stoffe, mit denen man täglich in Berührung kommt, **Stoffgemische** sind, ist das Ziel organisch-präparativer Arbeiten normalerweise die Herstellung und Isolierung reiner Substanzen, die aus Molekülen gleicher Art bestehen. Stoffgemische mit einheitlicher Zusammensetzung und einheitlichem Erscheinungsbild über die gesamte Ausdehnung des Stoffes (die also nur aus einer Phase bestehen) werden als **homogene Gemische** (Lösungen, Legierungen, Gasmische) bezeichnet. Sie können durch physikalische Trennmethoden (►Kap. 1.3) in **Reinsubstanzen** getrennt werden (◉Abb. 1.2). Bei diesen wiederum kann es sich entweder um Elemente handeln, die nicht weiter in einfachere

Substanzen zerlegt werden können, oder um **Verbindungen**, bestehend aus zwei oder mehreren **Elementen**. Verbindungen können zwar nicht durch physikalische, aber prinzipiell durch chemische Methoden in die in ihnen enthaltenen Elemente zerlegt werden. **Heterogene Stoffgemische** bestehen aus mindestens zwei Phasen und werden entsprechend der Aggregatzustände ihrer Phasen in Gemenge, Suspensionen, Emulsionen, Aerosole (Nebel, Rauch) und Schäume unterteilt. Eine Emulsion ist z. B. eine heterogene Mischung zweier nichtmischbarer flüssiger Phasen.

### 1.2.2 Charakterisierung organischer Verbindungen

Wird eine neue, bis dato unbekannte Verbindung synthetisiert, durch biotechnologische Methoden hergestellt oder durch Isolierung aus in der Natur vorkommendem Material (z. B. Pflanzen, marine Schwämme, Bakterien- oder Pilzkulturen) gewonnen, muss ihre Struktur analysiert und bewiesen werden. Die elementare Zusammensetzung wird mithilfe der **quantitativen Elementaranalyse** (►Exkurs: Quantitative Elementaranalyse; ►Exkurs: Ermittlung chemischer Formeln) bestimmt, die oft auch als Reinheitskriterium herangezogen wird. Die genaue Identifizierung und Strukturklärung einer neuen organischen Substanz erfolgt dann normalerweise mithilfe spektroskopischer Methoden (◉Abb. 1.3; ►Kap. 2). Neben den NMR-, IR-, MS- und UV/Vis-Daten werden bei Feststoffen der Schmelzpunkt (Smp., Festpunkt, Fp.), bei Flüssigkeiten der Siedepunkt (Sdp., Kochpunkt, Kp.) und seltener Brechungsindex oder Dichte genutzt. Chirale Verbindungen erfordern Angaben zur optischen Aktivität und zur absoluten Konfiguration, sei es durch Polarimetrie, durch Messung der ORD (optische Rotationsdispersion)

Compound Characterization Checklist		Corresponding Author _____																	
Compound	Identity										Purity		Computational Data in Si*						
Compound, structure, or table-entry number	New	Known	Melting point range	IR	UV-VIS	<sup>1</sup> H NMR	<sup>13</sup> C NMR	MS	HRMS	Optical rotation/ORD/CD	Enantiomeric/diastereomeric ratio	X-ray (ORTEP and CIF in Si*)	Copy of <sup>1</sup> H/ <sup>13</sup> C NMR spectrum in Si*	Copy of chromatogram in Si*	Quant. GC, HPLC, or electrophoresis	Elemental analysis	Cartesian coordinates or Z-matrix	# of imaginary frequencies	Total energy

Si\* = Supporting information

◉ Abb. 1.3 Checkliste physikalischer und spektroskopischer Daten für eine neue organische Verbindung, entsprechend den Anforderungen des *Journal of Organic Chemistry* der *American Chemical Society* an Identität und Reinheit

### Exkurs: Quantitative Elementaranalyse

Zur Ermittlung der **Verhältnisformel** (empirische Summenformel) ist eine quantitative Bestimmung der Massenanteile der chemisch gebundenen Elemente in einer Verbindung notwendig. Die Grundlagen solcher Analysen wurden u. a. von *Liebig* (1803–1873) erarbeitet. Man unterwirft eine genau eingewogene Menge (in der Mikroelementaranalyse werden wenige Milligramm, in der Ultramikroanalyse nur 10–100 µg Substanz benötigt) der Analysesubstanz einer Verbrennung mit Sauerstoff bei hohen Temperaturen (bis zu 1800 °C). Kohlenstoff, Wasserstoff, Schwefel und Stickstoff werden dabei zu CO<sub>2</sub>, Wasser, SO<sub>2</sub> und einem Gemisch aus N<sub>2</sub> und Stickoxiden NO<sub>x</sub> umgesetzt. Im Labor kann die Oxidation auch durch Verbrennung in Anwesenheit von CuO durchgeführt werden.

Die **Verbrennung (Oxidation) organischer Stoffe zu Nichtmetalloxiden** verläuft nach folgendem Schema:



Die Stickoxide werden anschließend an einem 600–900 °C heißen Kupfer-Kontakt zu N<sub>2</sub> reduziert. Die Gase werden gaschromatographisch (als Trägergas wird Helium verwendet) durch Adsorption/Desorption an geeigneten Adsorptionssäulen (► Kap. 1.3.5) getrennt und in Wärmeleitfähigkeitsdetektoren identifiziert und quantifiziert. Die Detektion und Quantifizierung von CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und SO<sub>2</sub> kann auch mittels IR-Spektroskopie (NDIR, nichtdispersive Infrarot-Spektroskopie) erfolgen; weitere Detektionsmöglichkeiten für Stickstoff und Schwefel sind die Chemolumineszenz bzw. UV-Fluoreszenz. Der Sauerstoffgehalt ergibt sich aus

sion) oder mittels CD-Spektroskopie (Circulardichroismus, ► Kap. 2). Hochauflösende Massenspektrometrie (HRMS; ► Kap. 2), quantitative HPLC bzw. GC oder auch die NMR-Spektroskopie (► Kap. 2), seltener die Elektrophorese oder kapillarelektrophoretische Verfahren werden für die Analytik der Reinheit einer organischen Verbindung herangezogen.

Die klassische **Röntgenstrukturanalyse** liefert neben der exakten Konstitution (die Reihenfolge und Art der Verknüpfung der einzelnen Atome miteinander) auch die Konformation (die dreidimensionale Gestalt) (► Kap. 3), die das Molekül im Kristall einnimmt (◉ Abb. 1.4). Die Konformation in Lösung, die sich allerdings deutlich von der im Kristall unterscheiden kann, kann z. B. mithilfe NMR-spektroskopischer Methoden analysiert werden.

Durch experimentelle Elektronendichtebestimmungen, die durch hochaufgelöste Einkristall-Röntgen-, -Synchrotron- oder Neutronenbeugungsdaten aus Experimenten bei tiefen Temperaturen möglich sind,

der Differenz der Summe der Gehalte der anderen Elemente und 100 %. Die Sauerstoffbestimmung kann auch separat in einem Pyrolyseofen erfolgen. Der in der zu analysierenden Substanz gebundene Sauerstoff wird hier bei 1350 °C am Kohlekontakt zuerst zu CO und anschließend weiter zu CO<sub>2</sub> oxidiert. Halogene werden nach Aufschluss der Verbindung und Überführung in anorganisches Halogenid titrimetrisch bestimmt. In modernen Elementaranalysatoren kann der Chlorgehalt (als HCl) auch direkt zusammen mit den anderen Elementen bestimmt werden, die Detektion erfolgt dann in einer Coulometerzelle. Phosphor wird nach Aufschluss als Phosphat quantifiziert.

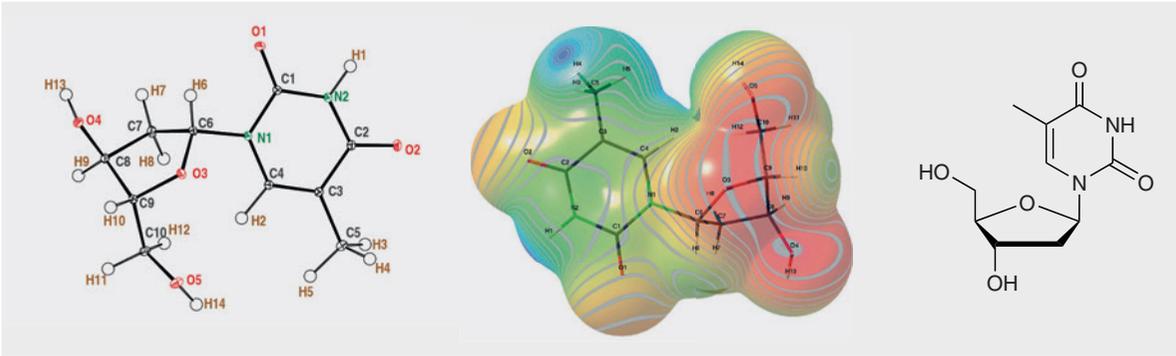


Letztendlich lassen sich mit diesen Verfahren die prozentualen Anteile aller in einer chemischen Verbindung enthaltenen Elemente quantitativ angeben. Daraus kann dann durch die zusätzliche Bestimmung der molaren Masse auch die exakte Summenformel der Verbindung berechnet werden (► Exkurs: Ermittlung chemischer Formeln).

können – in Kombination mit Methoden der Computerchemie – auch quantitative Aussagen über die vorliegenden Bindungstypen und -stärken, die intermolekularen Wechselwirkungen zu Nachbarmolekülen sowie über die topologischen und elektronischen Eigenschaften der Verbindungen (z. B. elektrostatisches Oberflächenpotenzial, reaktive Oberfläche, räumliche Verteilung freier Elektronenpaare) gemacht werden (◉ Abb. 1.4).

### 1.3 Trennung von homogenen Stoffgemischen

Um die stöchiometrische Zusammensetzung einer Substanz, ihre Struktur und ihre Eigenschaften ermitteln zu können, muss die Substanz in möglichst reiner Form vorliegen. Dafür ist nach ihrer Synthese oder Gewinnung aus einer natürlichen Quelle meist die Abtrennung aus mehr oder weniger komplexen Stoffgemischen



• **Abb. 1.4** Links: Struktur und Gestalt des Desoxyribonucleosids Thymidin (besser: Desoxythymidin, Strukturformel rechts), einem Baustein der DNA (► Kap. 38), erhalten aus der Röntgenstrukturanalyse, dargestellt als sogenannter ORTEP-Plot (*Oak Ridge Thermal Ellipsoid Plot*); Mitte: elektrostatisches Oberflächenpotenzial von Thymidin, erhalten aus experimentellen Elektronendichtebestimmungen bei 20 K. Die Farben symbolisieren Bereiche hoher (rot) und niedriger Elektronendichte (blau). Das elektrostatische Oberflächenpotenzial ist auch durch quantenchemische Rechnungen zugänglich.

1

### Exkurs: Ermittlung chemischer Formeln

Grundlage zur Aufstellung der **Summenformel** einer unbekannt organischen Substanz sind die aus der quantitativen **Elementaranalyse** (► Exkurs: Quantitative Elementaranalyse) ermittelten prozentualen Massenanteile der Elemente, aus denen die Substanz aufgebaut ist. Dividiert man diese durch die relative Atommasse  $A_r$  des betreffenden Elementes (vereinfacht C: 12; H: 1; N: 14; O: 16), erhält man das **Atomzahlenverhältnis** der Verbindung. Die einfachste **Verhältnissformel** (**empirische Summenformel**) ergibt sich dann durch Division dieser Werte durch den kleinsten der Werte (im nachfolgenden Beispiel der Wert für Sauerstoff oder Stickstoff: 1,69). Um die tatsächliche **Summenformel** (**Molekularformel**, **Molekülformel**) der Verbindung zu erhalten, muss zudem noch die relative Molekülmasse  $M_r$  der Verbindung ermittelt werden (► Kap. 2). Die quantitative Elementaranalyse einer unbekannt Substanz liefert z. B.:

C: 40,67 %; H: 8,53 %; N: 23,71 %

Daraus ergibt sich für Sauerstoff ein prozentualer Massenanteil von 27,09 %:

O:  $100\% - (40,67\% + 8,53\% + 23,71\%) = 27,09\%$

Diese Massenanteile, dividiert durch die relativen Atommassen der jeweiligen Elemente, liefern das **Atomzahlenverhältnis**:

C; H; N; O = 3,38; 8,53; 1,69; 1,69

Nach Division durch den kleinsten Wert erhält man die empirische Formel:  $C_2H_5N_1O_1$  (empirische Formelmassse:  $2 \cdot 12 + 5 \cdot 1 + 1 \cdot 14 + 1 \cdot 16 = 59$ ).

Man beachte, dass die quantitative Elementaranalyse aufgrund experimenteller Fehler meist nicht solche exakten Werte liefert!

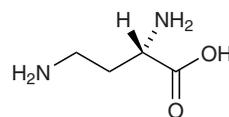
Bei einer experimentell bestimmten relativen Molekülmasse  $M_r$  von hier z. B. 118,07 ergibt sich die tatsächliche Summenformel folgendermaßen:

Man ermittelt den ganzzahligen Faktor, mit dem die empirische Formel multipliziert werden muss. Der Faktor ergibt sich durch Division der relativen Molekülmasse durch die empirische Formelmassse:

$$\text{Faktor} = \frac{\text{tatsächliche relative Molekülmasse}}{\text{empirische Formelmassse}} = \frac{118,07}{59} \cong 2$$

Damit erhält man die Summenformel:  $C_4H_{10}N_2O_2$

Die **Strukturaufklärung** mit verschiedenen spektroskopischen Methoden (► Kap. 2) könnte hier nun z. B. zu folgender Molekülstruktur führen:

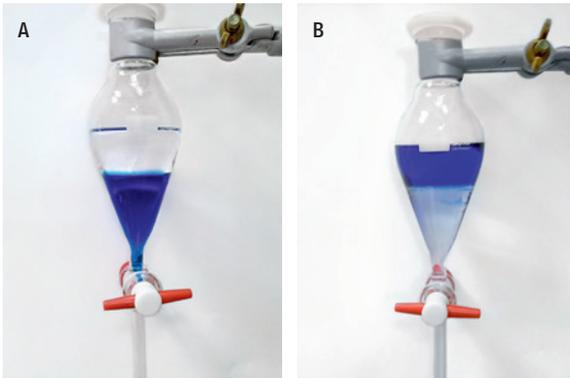


Es handelt sich um (*S*)-2,4-Diaminobutansäure (L-DAB, (*S*)-2,4-Diaminobuttersäure), eine Aminosäure, die z. B. in Peptidantibiotika wie den Polymyxinen auftritt.

schen notwendig. Hierzu bedient man sich physikalischer Trennmethode wie Extraktion, Kristallisation, Destillation, Sublimation oder chromatographischer Verfahren.

#### 1.3.1 Extraktion

Eine Methode zur Reinigung und Isolierung organischer Verbindungen ist die Extraktion, bei der aus einem Gemisch fester oder flüssiger Substanzen durch ein Lösemittel eine Substanz aufgrund besserer **Löslichkeit** in diesem Lösemittel extrahiert wird. Auf diese



● **Abb. 1.5** Extraktion eines blauen, in Wasser (untere Phase) gelösten Farbstoffs mit *n*-Octanol (obere Phase). Vor der Extraktion (A), nach einmaliger Extraktion mit dem gleichen Volumen *n*-Octanol (B)

Weise lassen sich z. B. aus wässrigen Lösungen mit leicht flüchtigen Lösemitteln, die nicht mit Wasser mischbar sind (● Abb. 1.5), organische Substanzen herauslösen und durch Entfernen des Lösemittels am Rotationsverdampfer wieder gewinnen. Als hochwirksame und schonende Extraktionsmittel können auch hochverdichtete, überkritische Fluide (z. B. überkritisches CO<sub>2</sub>) verwendet werden.

### 1.3.2 Kristallisation

Diese Trennmethode beruht auf der unterschiedlichen Löslichkeit fester organischer Verbindungen in den einzelnen Lösemitteln. Sind die Begleitsubstanzen in dem gewählten Lösemittel leichter löslich als das Hauptprodukt, so bereitet dessen Isolierung keine besonderen Schwierigkeiten. Es kristallisiert aus der heiß gesättigten Lösung aus (● Abb. 1.6) und kann durch Filtration abgetrennt und anschließend getrocknet werden, während die Verunreinigungen in der erkalteten Lösung, der sogenannten „Mutterlauge“, gelöst bleiben. Infolge der unterschiedlichen Kristallisationsgeschwindigkeit tritt eine fast vollständige Abscheidung der relativ reinen Substanz häufig erst nach Stunden oder Tagen ein. Aus übersättigten Lösungen lässt sich die erwartete organische Verbindung oft durch Eintragen von **Impfkristallen** als Kristallisationskeime ausfällen.



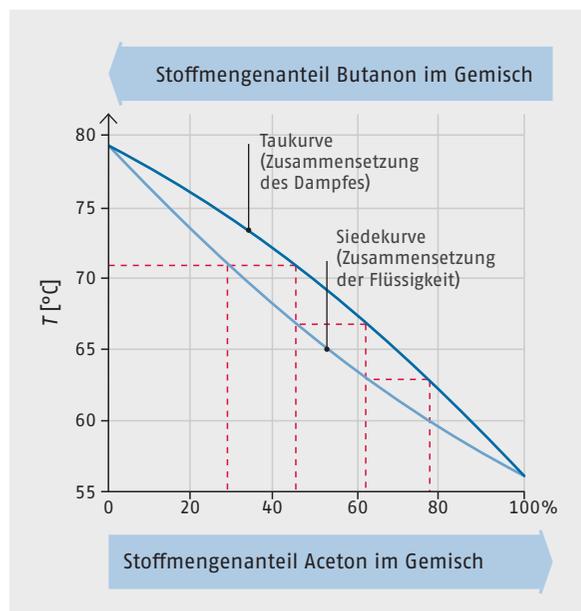
● **Abb. 1.6** Umkristallisation einer organischen Substanz

### 1.3.3 Destillation

Die Trennung von flüssigen Gemischen durch Destillation basiert auf den unterschiedlichen **Siedepunkten** der einzelnen Flüssigkeiten, genauer gesagt auf ihren unterschiedlichen **Dampfdrücken** bei gleicher Temperatur. Eine Trennung gelingt umso leichter, je größer die Differenz der Siedepunkte ist. Die Trennwirkung beruht auf der unterschiedlichen Zusammensetzung der siedenden Flüssigkeit und des Dampfes; im Dampf wird die leichter siedende Komponente angereichert (● Abb. 1.7).

Bei der **fraktionierenden Destillation** wird das Gemisch in einzelne Fraktionen zerlegt, deren immer wieder erneute Destillation letztendlich zu dem erwünschten Reinheitsgrad führt (● Abb. 1.7). Die Methode versagt bei **Azeotropen**, d. h. bei flüssigen Gemischen aus zwei oder mehr Komponenten, deren Dampf die gleiche Zusammensetzung wie die flüssige Phase aufweist.

Während man bei einfachen Destillationen im Gleichstrom arbeitet, erfordert die Trennung von Gemischen mit nahe beieinander liegenden Siedepunkten die Anwendung des Gegenstromprinzips. Diese Methode bezeichnet man als **Rektifikation**. Hierbei wird zwischen Destillierblase und Kondensator als Zwischenstück eine Kolonne eingeschaltet (● Abb. 1.8). In dieser langen Säule steigen die heißen Dämpfe nach oben, und zugleich fließt eine kältere Flüssigkeit zurück,



● **Abb. 1.7** Siedediagramm eines binären Gemischs (Sdp. ca. 71 °C) aus Aceton (Sdp. 56 °C) und Butanon (Sdp. 80 °C, ca. 29 % Aceton) bei 1013 mbar (1013 hPa). Beispielhaft ist die Anreicherung von Aceton auf ca. 78 % im Gemisch durch dreimalige Destillation gezeigt. Der Trennvorgang in Destillationskolonnen lässt sich als Folge vieler wiederholter, einzelner Destillationschritte auffassen.

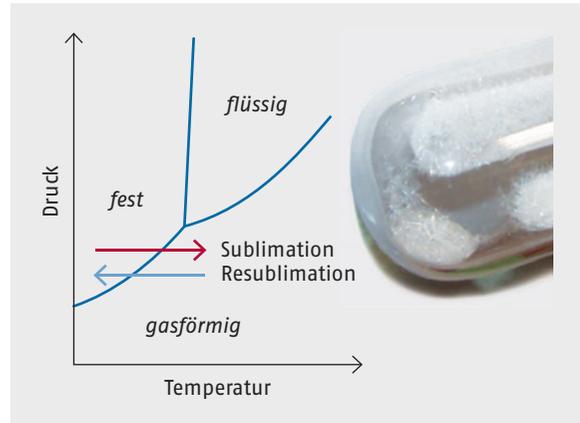


● **Abb. 1.8** Mikrodestillationsanlage zur fraktionierenden Destillation über eine Destillationskolonne (Vigreux-Kolonne)

wobei zwischen Gas- und Flüssigphase ein Stoff- und Wärmeaustausch erfolgt. Die Dämpfe kühlen sich ab und höher siedende Anteile werden kondensiert. Durch die frei werdende Kondensationswärme werden umgekehrt niedriger siedende Anteile aus der Flüssigkeit verdampft. Es kommt somit innerhalb der Kolonne zu einer stufenweisen Anreicherung der niedriger siedenden Komponenten in den aufsteigenden Dämpfen und der höher siedenden Komponenten im flüssigen Rücklauf (● Abb. 1.7).

Aus den Gleichgewichtskurven (sie stellen über den gesamten Konzentrationsbereich die Zusammensetzung der Dampfphase als Funktion der Zusammensetzung der Flüssigphase einer Komponente dar) der zu trennenden Gemische lässt sich die Anzahl der „**theoretischen Böden**“ (► Kap. 1.3.5) einer Kolonne errechnen, die für den gewünschten Trenneffekt erforderlich sind. Bei hochsiedenden oder leicht zersetzlichen Flüssigkeiten führt man die Destillation im Vakuum bei etwa 16 mbar (16 hPa, klassische im Labor verwendete Membranpumpe), im Fein- (1 bis  $10^{-3}$  hPa) oder Hochvakuum ( $10^{-3}$  bis  $10^{-6}$  hPa) durch.

Die **Wasserdampfdestillation** beruht darauf, dass viele Substanzen, deren Siedepunkte wesentlich höher liegen als der des Wassers, durch eingeblasenen Wasserdampf in Abhängigkeit von ihrem Dampfdruck verflüchtigt und anschließend im absteigenden Kühler zusammen mit dem Wasserdampf wieder kondensiert werden. Ist die zu reinigende Substanz in Wasser praktisch unlöslich, so werden sich die beiden Dampfdrücke gegenseitig kaum beeinflussen. Sobald jedoch beim Erhitzen die Summe der Partialdampfdrücke beider Substanzen dem jeweiligen Atmosphärendruck entspricht, tritt Sieden ein. Die zu isolierende Substanz ist so schon bei sehr viel niedrigeren Temperaturen flüchtig als es ihrem eigenen Siedepunkt entspricht. Die Wasserdampfdestillation stellt eine besonders schonende Methode zur Isolierung von Naturstoffen z. B. aus Pflanzenextrakten dar.



● **Abb. 1.9** Phasendiagramm (Abhängigkeit des Aggregatzustands von Druck und Temperatur) einer Substanz und deren Reinigung (hier: Benzoesäure) durch Sublimation und Resublimation an einem Kühlfinger. Benzoesäure sublimiert bei Normaldruck ab ca. 100 °C.

1

#### 1.3.4 Sublimation – Resublimation

Unter **Sublimation – Resublimation** versteht man das Verdampfen einer festen Substanz und ihre Abscheidung ohne vorherige Verflüssigung nach dem Schema: fest  $\rightarrow$  gasförmig  $\rightarrow$  fest (● Abb. 1.9). Diese Art der Reinigung kommt vor allem für Substanzen in Frage, die sich sehr schwer lösen oder die auch durch wiederholtes Umkristallisieren nicht rein isolierbar sind. Die Sublimation wird zweckmäßig im Fein- oder Hochvakuum ausgeführt. Voraussetzung für diese Art der Reinigung ist, dass bei einem entsprechend niedrigen Druck gearbeitet werden kann, bei dem die Substanz entsprechend ihres Phasendiagramms (● Abb. 1.9) direkt und ohne Zersetzung vom festen in den gasförmigen Zustand übergeht.

Die **Gefriertrocknung** (Lyophilisation) ist ein Verfahren zur schonenden Evaporation verschiedenster Lösemittel. Sie wird insbesondere für wässrige Proben verwendet. Diese werden eingefroren und im Vakuum bei niedrigen Temperaturen direkt sublimiert, sodass das Wasser der Probe entzogen wird und das gelöste Probenmaterial zurück bleibt. Da das Probenmaterial zudem thermisch nicht belastet wird, handelt es sich wiederum um eine sehr schonende Trennmethode.

#### 1.3.5 Chromatographie

Bei chromatographischen Methoden erfolgt die Trennung durch **Verteilungs- und/oder Adsorptionsvorgänge** oder auch durch andere physikalisch-chemische Vorgänge wie Ionenaustausch, Ionenpaarbildung, Siebeffekte (Größenausschluss) oder Affinität zu bestimmten Makromolekülen. Es sind zwei nicht miteinander mischbare Phasen notwendig, wovon sich eine stationär im Trennsystem befindet (**stationäre Phase**, Sor-

bens). Mithilfe der **mobilen Phase** (Eluent, Elutionsmittel, Trägergas) wird das Substanzgemisch über die stationäre Phase transportiert und dabei in seine Bestandteile getrennt (►Exkurs: Verteilung und Adsorption). Durch Kombination verschiedener stationärer (fest, flüssig) und mobiler Phasen (flüssig, überkritisches Fluid, Gas) ergeben sich verschiedene Techniken.

Als wichtigste Methode zur **präparativen Trennung** von Substanzgemischen hat sich die **Säulenchromatographie** (SC) in Form der hydrostatischen SC, Flash-Chromatographie (Arbeiten unter mäßigem Überdruck), der Vakuumflüssigchromatographie (*dry column vacuum chromatography*, Arbeiten unter Unterdruck), MPLC (*middle pressure liquid chromatography*) oder HPLC (*high pressure LC, high performance LC*) etabliert. Die Trenneffizienz ist dabei unter anderem von der Größe der Partikel der stationären Phase und der Füllqualität der Säule abhängig. Dicht und gleichmäßig gepackte Säulen mit Partikeln kleiner Teilchendurchmesser besitzen eine höhere Trennleistung, erfordern aber auch erhöhten Druck (daher *high pressure*), um die mobile Phase über die stationäre Phase zu transportieren.

Bei der SC werden als stationäre Phasen meist polares Kieselgel (**Normalphase**), Aluminiumoxid, unpo-

lare Umkehrphasen (**RP-Phasen**, *reversed phase*, meist RP-8, Octylsilyl-, und RP-18, Octadecylsilyl-Gruppen) oder Cellulose verwendet. Sowohl Normal- als auch RP-Phasen sind heute in vielen verschiedenen modifizierten Varianten erhältlich (z. B. Einführung von Dihydroxypropyl, Aminopropyl-, Cyanopropyl-Gruppen), die die Trennung von Substanzen verschiedenster Polaritäten erlauben.

Aber auch die **Dünnschichtchromatographie** (DC, in Form der HPTLC, *high performance thin layer chromatography*) oder die **Gaschromatographie** können für präparative Trennungen eingesetzt werden.

Die Wahl des Elutionsmittelgemischs, **isokratisch** (also mit fester, sich während der Trennung nicht verändernder Zusammensetzung) oder als **Gradient**, richtet sich nach den Polaritäten der stationären Phase und der zu trennenden Substanzen. Bei RP-Phasen werden als Elutionsmittel meist Wasser oder wässrige Puffer im Gemisch mit Methanol, Acetonitril oder Tetrahydrofuran, bei Normalphasen und Aluminiumoxid eher unpolare Lösungsmittel (Hexan, Cyclohexan, im Gemisch mit Ethylacetat, Toluol, o.Ä.) eingesetzt. Bezogen auf Kieselgel besitzt Hexan die niedrigste, Wasser die größte Elutionskraft. An RP-Phasen, an denen unpolare Substanzen eher zurückgehalten wer-

### Exkurs: Verteilung und Adsorption

Bei verteilungschromatographischen Verfahren beruht die Trennung auf der unterschiedlichen Verteilung der zu trennenden Substanzen in zwei nicht miteinander mischbaren Phasen (vgl. auch ►Kap.1.3.1). Der Grad der Verteilung zwischen den beiden Phasen wird durch den **Nernstschen Verteilungskoeffizienten**  $K$ , eine bei gegebener Temperatur für das Trennsystem (Substanz, mobile Phase, stationäre Phase) stofftypische Konstante, beschrieben.

$$K = \frac{[A]_{\text{Phase 2}}}{[A]_{\text{Phase 1}}} \quad \text{Gleichung 1.1}$$

[A] Konzentration des Stoffes A in den nicht miteinander mischbaren Phasen 1 und 2

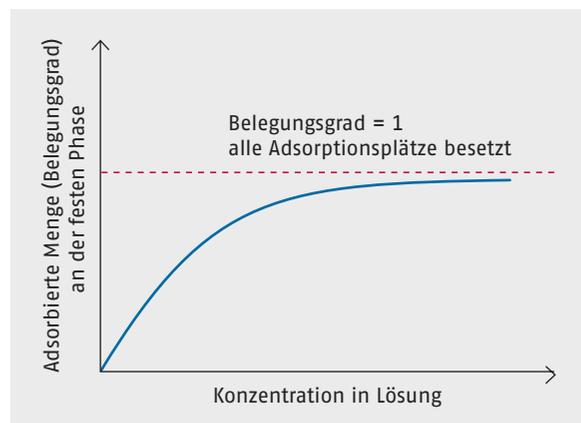
$K$  Nernstscher Verteilungskoeffizient

Typische Beispiele für Trennungen, die hauptsächlich auf Verteilungschromatographie beruhen, sind die Papier- und die Gas-Flüssig-Chromatographie.

Bei adsorptionschromatographischen Trennungen reichern sich die zu trennenden Substanzen durch spezifische Wechselwirkungen der polaren/unpolaren Gruppen der Substanz an der polaren/unpolaren Oberfläche des Sorbens (stationäre Phase) an (Adsorption). Je größer die Oberfläche, desto mehr Substanz kann adsorbiert werden. Die Konzentration des Stoffes im Sorbens und seine Konzentration in der angrenzenden Phase hängen bei konstanter Temperatur über die **Adsorptionsisotherme** (►Abb. 1.10) zusammen.

Mithilfe der mobilen Phase wird die adsorbierte Substanz wieder von der Oberfläche des Sorbens abgelöst (Desorption). Eine Trennung wird umso besser sein, je mehr sich die zu trennenden Substanzen in ihrer **Polarität** und in der **Löslichkeit** in der mobilen Phase unterscheiden.

Bei den meisten säulenchromatographischen Trennungen finden sowohl Adsorptions- als auch Verteilungsvorgänge statt.



► **Abb. 1.10** Die Adsorptionsisotherme beschreibt den Zusammenhang zwischen der Konzentration eines Stoffes in Lösung (mobile Phase) und seiner adsorbierten Menge an der festen Phase.