

Beyer · Walter

Lehrbuch der

Organischen Chemie

**Von Prof. em. Dr. Wolfgang Walter
und Prof. Dr. Dr. h.c. Wittko Francke**
Institut für Organische Chemie der Universität Hamburg

24., überarbeitete Auflage
Mit 155 Abbildungen und 24 Tabellen



S. Hirzel Verlag Stuttgart · Leipzig

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Aus dem Vorwort zur ersten Auflage	VIII
Der Weg eines Lehrbuches durch fünf Jahrzehnte	IX

1 Allgemeiner Teil

1

1.1 Einleitung	1	1.5 Ermittlung chemischer Formeln	14
1.2 Die reine Substanz	3	1.5.1 Verhältnisformel	14
1.2.1 Kristallisation	4	1.5.2 Bestimmung der relativen	
1.2.2 Destillation und Rektifikation	4	Molekülmasse bzw. der	
1.2.3 Destillation und Sublimation im		Molekularformel	15
Fein- und Hochvakuum	5	Struktur- und Konstitutionsformel	17
1.2.4 Wasserdampfdestillation	6	1.6 Arten der chemischen	
1.2.5 Extraktion	6	Bindungen	18
1.2.6 Adsorptionschromatographie	6	Atombau	19
1.2.7 Gel-Chromatographie	7	Ionenbindung (Ionenbeziehung) ..	23
1.2.8 Verteilungschromatographie	7	Atombindung	24
1.2.9 Dünnsschichtchromatographie		1.6.4 C–H- und C–C-Bindung	25
(DC)	8	1.6.5 Oniumkomplexe	27
1.2.10 Gaschromatographie (GC)	9	1.6.6 Polare Atombindung	28
1.2.11 Kriterien der reinen Substanz	10	1.7 Funktionelle Gruppen und	
1.3 Qualitative organische		induktiver Effekt	32
Elementaranalyse	11	1.8 Physikalische Methoden der	
1.3.1 Kohlenstoff	11	Strukturaufklärung	33
1.3.2 Wasserstoff	11	Massenspektrometrie	34
1.3.3 Stickstoff	12	IR-Spektroskopie	37
1.3.4 Schwefel	12	UV-Sichtbar-Spektroskopie	
1.3.5 Halogene	12	(Elektronenspektren)	38
1.3.6 Übrige Elemente	13	Photoelektronenspektroskopie	
1.4 Quantitative organische		(PE-Spektroskopie)	40
Elementaranalyse	13	Kernmagnetische	
1.4.1 Kohlenstoff, Wasserstoff und		Resonanzspektroskopie	41
Stickstoff	13	Elektronenspinresonanz	48
1.4.2 Schwefel	14	Ionen-Cyclotron-Resonanz (ICR) ..	50
1.4.3 Halogene (Chlor, Brom, Iod)	14	Kristallstrukturanalyse	51
1.9 Einteilung des Stoffgebiets der		organischen Chemie	52

2 Aliphatische Verbindungen

55

2.1	Alkane (Paraffine), C_nH_{2n+2}	55	2.8.4	Ethanol, Ethylalkohol	122
2.1.1	Methan	57	2.8.5	Propanole, Propylalkohole	124
2.1.2	Ethan	59	2.8.6	Butanole, Butylalkohole	124
2.1.3	Propan und Butane	60	2.8.7	Pantanole, Pentyl- oder Amylalkohole	125
2.1.4	Pentane und höhere Homologe	60	2.8.8	Optische Isomerie, Chiralität	126
2.1.5	Konformationen des Ethans	61	2.8.9	Höhere Alkohole, $C_nH_{2n+1}OH$	129
2.2	Alkene (Olefine), C_nH_{2n}	64	2.8.10	Ungesättigte Alkohole (Alkenole und Alkinole)	130
2.2.1	Ethylen (Ethen) und Propen	65	2.9	Halogenderivate der Alkane	131
2.2.2	Butene, Isobuten und Homologe	66	2.9.1	Alkylhalogenide (Halogenalkane)	132
2.2.3	Die $C=C$ -Doppelbindung	68	2.9.2	Mechanismen der nucleophilen Substitution am gesättigten C-Atom	135
2.2.4	Die <i>cis-trans</i> -Isomerie der Ethylene	70	2.9.3	Eliminierungsreaktionen	140
2.2.5	Additionsreaktionen	72	2.9.4	Phasentransfer-Katalyse (PTC)	141
2.2.6	Substitutionsreaktionen	78	2.9.5	Fragmentierungsreaktionen	142
2.3	Polymerisation der Alkene und Vinylerviate	79	2.9.6	Höher halogenierte Alkane	143
2.3.1	Radikalkettenpolymerisation	80	2.9.7	Fluorierte Kohlenwasserstoffe	145
2.3.2	Ionenkettenpolymerisation	80	2.10	Ester anorganischer Säuren	147
2.3.3	Koordinative Kettenpolymerisation	81	2.10.1	Ester der Schwefelsäure (Alkylsulfate)	147
2.3.4	Polymerisation der Alkene	82	2.10.2	Ester der Salpetersäure	148
2.3.5	Polymerisation der Vinylverbindungen	86	2.10.3	Ester der salpetrigen Säure	148
2.4	Erdölchemie	88	2.10.4	Ester der Phosphorsäure	149
2.4.1	Erdöl, Erdgas und Ölschiefer	89	2.10.5	Ester der Borsäure	150
2.4.2	Kraftstoffe aus Erdöl	91	2.11	Ether	150
2.4.3	Kraftstoffe aus Kohle	94	2.11.1	Darstellung	151
2.5	Petrolchemie	94	2.11.2	Eigenschaften	152
2.6	Alkine (Acetylene), C_nH_{2n-2}	96	2.12	Alkanthiole (Mercaptane)	154
2.6.1	Darstellung	96	2.12.1	Darstellung	154
2.6.2	Die $C\equiv C$ -Dreifachbindung	98	2.12.2	Eigenschaften und Verwendung	155
2.6.3	Additionsreaktionen	101	2.13	Dialkylsulfide (Thioether)	155
2.6.4	Reppe-Synthesen	103	2.13.1	Darstellung	156
2.7	Kohlenwasserstoffe mit zwei oder mehr $C=C$-Doppelbindungen (Polyene)	106	2.13.2	Eigenschaften	156
2.7.1	Allene	106	2.13.3	Sulfoxide und Sulfone	157
2.7.2	Diene	107	2.14	Aliphatische Sulfonsäuren, Sulfonylchloride, Sulfin- und Sulfensäuren	158
2.7.3	1,2- und 1,4-Addition; Mesomerie	108	2.14.1	Alkansulfonsäuren	159
2.7.4	Woodward-Hoffmann-Regeln	111	2.14.2	Alkansulfonylchloride, Alkansulfin- und Alkansulfensäuren	159
2.7.5	Diolefine	116	2.15	Nitroalkane (Nitroparaffine)	161
2.8	Einwertige Alkohole (Alkanole)	116	2.15.1	Darstellung	162
2.8.1	Die Wasserstoffbindung (Wasserstoffbrücke)	118	2.15.2	Eigenschaften	163
2.8.2	Oxidationsprodukte der Alkohole	119			
2.8.3	Methanol, Methylalkohol (Carbinol)	121			

2.16 Aliphatische Amine	165	2.22 Aliphatische Ketone (Alkanone)	221
2.16.1 Monoamine	165	2.22.1 Allgemeine Darstellungsweisen	222
2.16.2 Optische Aktivität am 3- und 4-bindigen N-Atom	174	2.22.2 Additions- und Kondensationsreaktionen	224
2.16.3 Ungesättigte Amine (Enamine)	176	2.22.3 Reduktionsprodukte der Ketone	228
2.16.4 Diamine	176	2.22.4 Pinakol-Pinakolon-Umlagerung	230
2.17 Aliphatische Diazo-verbindungen, Diazirine und Diaziridine	177	2.22.5 <i>Wagner-Meerwein-Umlagerung</i>	231
2.17.1 Diazoverbindungen	177	2.22.6 Aceton (Propanon)	232
2.17.2 Diazirine und Diaziridine	178	2.22.7 Butanon (Ethylmethylketon)	233
2.18 Aliphatische Hydrazine und Azide	180	2.22.8 Halogenketone	234
2.18.1 Hydrazine	180	2.22.9 Ungesättigte Ketone	234
2.18.2 Azide	181	2.22.10 Photochemie der Carbonylverbindungen	235
2.19 Organische Verbindungen einiger Nichtmetalle	182	2.23 Tabellarische Gegenüberstellung der Aldehyde und Ketone	240
2.19.1 Organische Phosphorverbindungen	182		
2.19.2 Organische Arsenverbindungen	187		
2.19.3 Organische Siliciumverbindungen	188		
2.19.4 Organische Borverbindungen	190		
2.20 Metallorganische Verbindungen	193	2.24 Gesättigte aliphatische Monocarbonsäuren (Alkansäuren, Fettsäuren)	243
2.20.1 Alkalimetallorganische Verbindungen (Alkalimetall-organyle)	194	2.24.1 Allgemeine Darstellungsweisen	243
2.20.2 Organische Magnesiumverbindungen	195	2.24.2 Acidität der Carboxylgruppe	245
2.20.3 Organische Zinkverbindungen	198	2.24.3 Ameisensäure, Methansäure	247
2.20.4 Organische Titanverbindungen	199	2.24.4 Essigsäure, Ethansäure	249
2.20.5 Organische Quecksilberverbindungen	200	2.24.5 Propionsäure, Propansäure	250
2.20.6 Organische Aluminiumverbindungen	201	2.24.6 Buttersäuren, Butansäuren	250
2.20.7 Organische Zinnverbindungen	202	2.24.7 Valeriansäuren, Pentansäuren	251
2.20.8 Organische Bleiverbindungen	203	2.24.8 Höhere Fettsäuren	251
2.21 Aliphatische Aldehyde (Alkanale)	203	2.25 Ungesättigte aliphatische Monocarbonsäuren, Alkensäuren	252
2.21.1 Allgemeine Darstellungsweisen	204	2.25.1 Allgemeine Darstellungsweisen	252
2.21.2 Nachweisreaktionen der Aldehyde	205	2.25.2 Acrylsäure, Propensäure	253
2.21.3 Die C=O-Doppelbindung	205	2.25.3 Acrylnitril	254
2.21.4 Additionsreaktionen der Aldehyde	206	2.25.4 Ungesättigte Carbonsäuren mit vier C-Atomen	256
2.21.5 Enantiotopie und Prochiralität	208	2.25.5 Ölsäure (9-Octadecensäure)	257
2.21.6 Additions- und Substitutionsreaktionen der Aldehyde	209	2.25.6 Mehrfach ungesättigte Monocarbonsäuren	258
2.21.7 Kondensationsreaktionen der Aldehyde	209	2.26 Fette, Öle und Wachse	259
2.21.8 Formaldehyd (Methanal)	215	2.26.1 Fette und Öle	259
2.21.9 Acetaldehyd (Ethanal)	216	2.26.2 Gewinnung der Fette	261
2.21.10 Propionaldehyd (Propanal)	217	2.26.3 Wachse	261
2.21.11 Halogenaldehyde	218	2.27 Seifen und synthetische Waschmittel (Detergenzien)	262
2.21.12 Ungesättigte Aldehyde (Alkenale und Alkinale)	219	2.27.1 Anionaktive Verbindungen	262
2.21.13 Gezielte Aldolreaktion	220	2.27.2 Kationaktive Verbindungen	265
		2.27.3 Nichtionogene Verbindungen	266
		2.28 Derivate aliphatischer Monocarbonsäuren	266
		2.28.1 Carbonsäurehalogenide	266
		2.28.2 Carbonsäureanhydride	269
		2.28.3 Ketene	270
		2.28.4 Carbonsäureester	272

2.28.5	Orthocarbonsäureester	276	2.34	Gesättigte aliphatische Dicarbonsäuren	344
2.28.6	Carbonsäureamide	276	2.34.1	Oxalsäure	346
2.28.7	Thiocarbonsäureamide	280	2.34.2	Malonsäure	347
2.28.8	Blausäure und Nitrile (oder Carbonitrile)	281	2.34.3	Bernsteinsäure	351
2.28.9	Hydroxamsäuren	284	2.34.4	Höhere Dicarbonsäuren	353
2.28.10	Imidoester, Amidine und Amidrazone	284	2.35	Ungesättigte aliphatische Dicarbonsäuren	355
2.28.11	Säurehydrazide und Säureazide ..	285	2.35.1	EthylenDICarbonsäuren (Malein- und Fumarsäure)	355
2.29	Substitutionsprodukte aliphatischer Monocarbonsäuren ..	286	2.35.2	Diels-Alder-Reaktion	357
2.29.1	Halogencarbonsäuren	286	2.35.3	Acetylendicarbonsäure	361
2.29.2	d- und L-Konfiguration am Chiralitätszentrum als stereogenem Element	289	2.36	Aliphatische Hydroxy-di- und -tricarbonsäuren	362
2.29.3	Absolute Konfiguration am Chiralitätszentrum (<i>CIP</i> -System) ..	290	2.36.1	Tartronsäure (Hydroxymalonsäure)	362
2.29.4	Hydroxycarbonsäuren	294	2.36.2	Äpfelsäure (Hydroxybernsteinsäure)	362
2.29.5	Lactone	296	2.36.3	Walden-Umkehr	363
2.29.6	Die wichtigsten Hydroxysäuren ..	298	2.36.4	Asymmetrische Synthese, Stereoselektive Synthese	365
2.29.7	Aminocarbonsäuren	301	2.36.5	Weinsäure (Dihydroxybernsteinsäure)	367
2.29.8	Die wichtigsten aliphatischen Aminosäuren	307	2.36.6	Methoden der Spaltung von Racemformen	369
2.30	Aliphatische Aldehyd- und Ketocarbonsäuren	309	2.36.7	Citronensäure	371
2.30.1	Aldehydcarbonsäuren	309	2.37	Aliphatische Ketodicarbonsäuren	372
2.30.2	α -Ketosäuren	310	2.37.1	Mesoxalsäure	372
2.30.3	β -Ketosäuren	311	2.37.2	Oxalessigsäure	372
2.30.4	Keto-Enol-Tautomerie (Oxo-Enol-Tautomerie)	312	2.38	Derivate der Kohlensäure	373
2.30.5	Darstellung des Acetessigesters ..	314	2.38.1	Halogenide der Kohlensäure	374
2.30.6	Synthesen mit Acetessigester ..	315	2.38.2	Ester der Kohlensäure	374
2.30.7	γ -Ketosäuren	317	2.38.3	Amide der Kohlensäure	375
2.31	Mehrwertige Alkohole	319	2.39	Thioderivate der Kohlensäure	382
2.31.1	Zweiwertige Alkohole (Glykole, 1,2-Diole)	319	2.39.1	Schwefelkohlenstoff (Kohlendisulfid)	382
2.31.2	Dreiwertige Alkohole	328	2.39.2	Thioharnstoff (Thiocarbamid) ..	383
2.31.3	Vierwertige Alkohole (Tetrile) ..	333	2.39.3	Thiosemicarbazid	384
2.31.4	Fünfwertige Alkohole (Pentite)	334	2.39.4	Thiocarbonohydrazid	385
2.31.5	Sechswertige Alkohole (Hexite)	335	2.40	Cyansäure und ihre Derivate	385
2.32	Aliphatische Hydroxyaldehyde und Hydroxyketone	336	2.40.1	Cyanhalogenide	387
2.32.1	Hydroxyaldehyde (Aldehydkohole)	336	2.40.2	Cyansäureester	387
2.32.2	Hydroxyketone (Ketonalkohole)	338	2.40.3	Isocyansäureester	388
2.33	Aliphatische Dialdehyde, Ketoaldehyde und Diketone	339	2.40.4	Cyanamide	389
2.33.1	Dialdehyde	339	2.40.5	Carbodiimide	391
2.33.2	Ketoaldehyde	341	2.41	Thiocyanösäure und ihre Derivate	391
2.33.3	Diketone	341	2.41.1	Darstellung	391

2.42	Dicyan und Dirhodan	393	2.44.2	Carbene	401
2.42.1	Dicyan	393	2.44.3	Nitrene	402
2.42.2	Dirhodan	394	2.45	Organische Übergangs- metallkomplexe	404
2.43	Kohlenmonoxid und seine Derivate	395	2.45.1	Die Achtzehn-Elektronen-Regel	404
2.43.1	Kohlenmonoxid	395	2.45.2	Rückbindung	405
2.43.2	Alkylisocyanide (Isonitrile)	396	2.45.3	Oxidative Addition und Reduktive Eliminierung	406
2.44	Carbene, Carbene und Nitrene als instabile Zwischen- produkte	399	2.45.4	Wacker-Hoechst-Verfahren	407
2.44.1	Carbene	399	2.45.5	Heck-Reaktion	408
			2.45.6	Oxosynthese (Hydroformylierung)	409
			2.45.7	Stille-Reaktion	410

3 Alicyclische Verbindungen

411

3.1	Kleine Kohlenstoffringe	413	3.3.2	Cyclooctan, Cycloocten	437
3.1.1	Cyclopropan	413	3.3.3	Cyclododecatrien	438
3.1.2	Stereoisomerie carbocyclischer Verbindungen	415	3.4	Große Kohlenstoffringe	438
3.1.3	Cyclopropen	415	3.4.1	Darstellung	438
3.1.4	Cyclobutan und seine Derivate	416	3.5	Bi- und polycyclische Kohlenwasserstoffe	440
3.2	Normale Kohlenstoffringe	420	3.5.1	Spirane	440
3.2.1	Cyclopantan und seine Derivate	420	3.5.2	Kondensierte Ringsysteme	441
3.2.2	Cyclohexan und seine Derivate	426	3.5.3	Brücken-Ringsysteme	443
3.2.3	Cycloheptan und seine Derivate	433	3.5.4	Diamantoide Ringsysteme	445
3.3	Mittlere Kohlenstoffringe	435	3.5.5	Kleine bi- und polycyclische Systeme	446
3.3.1	Cyclooctatetraen	435			

4 Kohlenhydrate

453

4.1	Monosaccharide	454	4.2	Oligosaccharide	481
4.1.1	Konfiguration der Zucker	454	4.2.1	Disaccharide, $C_{12}H_{22}O_{11}$	481
4.1.2	Reaktionen der Monosaccharide	458	4.2.2	Trisaccharide, $C_{18}H_{32}O_{16}$	487
4.1.3	Umwandlung von Mono- sacchariden	462	4.2.3	Pseudoooligosaccharide	488
4.1.4	Nachweisreaktionen der Monosaccharide	462	4.3	Polysaccharide (Glycane)	488
4.1.5	Synthese, Auf- und Abbau von Monosacchariden	463	4.3.1	Stärke (Amylum)	489
4.1.6	Ringstruktur der Monosaccharide	466	4.3.2	Glykogen	492
4.1.7	Glykoside	470	4.3.3	Inulin	492
4.1.8	Pentosen, $C_5H_{10}O_5$	473	4.3.4	Chitin	492
4.1.9	Hexosen, $C_6H_{12}O_6$	473	4.3.5	Polyuronsäuren (Glycuronane)	493
4.1.10	Reaktionen der Hydroxylgruppen	474	4.3.6	Cellulose	493
4.1.11	Desoxyzucker	476	4.3.7	Hemicellulosen	495
4.1.12	Aminozucker	476	4.3.8	Celluloseether	495
4.1.13	Zuckermercaptale	478	4.3.9	Cellulosenitrate	496
4.1.14	L(+)-Ascorbinsäure, Vitamin C	479	4.3.10	Cellulosische Chemiefasern (Halbsynthetische Fasern)	496

5 Aromatische Verbindungen

499

5.1 Aromatische Kohlenwasserstoffe (Arene)	504	5.8 Aromatische Aldehyde und Ketone	567
5.1.1 Benzol	505	5.8.1 Benzaldehyd	567
5.1.2 Homologe des Benzols (Alkylbenzole)	507	5.8.2 Homologe des Benzaldehyds	574
5.1.3 Toluol	508	5.8.3 Phenol- und Phenolether-aldehyde	575
5.1.4 Ethylbenzol	509	5.8.4 Vanillin	578
5.1.5 Xylole	509	5.8.5 Aromatische Ketone	579
5.1.6 Trimethylbenzole	510	5.9 Aromatische Carbonsäuren (Arencarbonsäuren)	585
5.1.7 Cumol	510	5.9.1 Aromatische Monocarbonsäuren	585
5.2 Halogenderivate der aromatischen Kohlenwasserstoffe	510	5.9.2 Araliphatische Monocarbonsäuren	593
5.2.1 Addition von Halogenen an den Benzolkern	511	5.9.3 Ungesättigte araliphatische Monocarbonsäuren	595
5.2.2 Halogenbenzole	511	5.9.4 Aromatische Dicarbonsäuren	597
5.2.3 Mechanismen der mehrfachen elektrophilen Substitution am Benzolkern	514	5.10 Reduktionsprodukte der aromatischen Nitroverbindungen	603
5.2.4 Seitenkettenhalogenierung der Alkylbenzole	518	5.10.1 Reduktion in mineralsaurer Lösung	604
5.3 Aromatische Nitroverbindungen 519		5.10.2 Reduktion in neutraler oder schwach saurer Lösung	604
5.3.1 Nitrobenzole	520	5.10.3 Reduktion in alkalischer Lösung	606
5.3.2 Nitrotoluole	522	5.11 Aromatische Amine	610
5.4 Aromatische Sulfonsäuren (Arensulfonsäuren)	523	5.11.1 Anilin	611
5.4.1 Darstellung	523	5.11.2 Derivate des Anilins	612
5.4.2 Derivate der aromatischen Sulfonsäuren	525	5.11.3 Nitroaniline (Nitraniline)	614
5.5 Phenole	528	5.11.4 Anilinsulfonsäuren	615
5.5.1 Einwertige Phenole	528	5.11.5 Arsenverbindungen des Anilins	617
5.5.2 Alkylphenylether (Phenoether)	530	5.11.6 N-Alkylierte Aniline (Aliphatisch-aromatische Amine)	618
5.5.3 Halogenierte Phenole	533	5.11.7 Rein aromatische Amine	619
5.5.4 Phenolsulfonsäuren	534	5.11.8 Phenylendiamine	620
5.5.5 Nitrophenole	534	5.12 Aromatische Diazoverbindungen	621
5.5.6 Nitrosophenole	537	5.12.1 Diazoniumsalze	621
5.5.7 Homologe des Phenols	537	5.12.2 Diazotate	623
5.5.8 Zweiwertige Phenole	540	5.13 Reaktionen aromatischer Diazoverbindungen	623
5.5.9 Cyclophane und Catenane	543	5.13.1 Reaktionen, die unter Abspaltung der Diazogruppe verlaufen (Diazospaltung)	624
5.5.10 Dreiwertige Phenole	547	5.13.2 Reaktionen, bei denen der Diazostickstoff im Molekül verbleibt	627
5.6 Benzochinone	548	5.13.3 Kupplungsreaktionen	628
5.6.1 Die wichtigsten Benzochinone	549	5.14 Azofarbstoffe	631
5.6.2 Redoxreaktionen der <i>p</i> -Chinone	551	5.14.1 Konstitution und Farbe	631
5.6.3 1,4-Additionen der <i>p</i> -Chinone	553	5.14.2 Färbeotechnik	635
5.6.4 Chinoide Farbstoffe	553		
5.7 Aromatische Alkohole und Arylalkylamine	555		
5.7.1 Aromatische Alkohole	555		
5.7.2 Dendrimere	557		
5.7.3 Arylalkylamine	562		

5.14.3	Basische Azofarbstoffe	636
5.14.4	Saure Azofarbstoffe	637
5.14.5	Substantive Azofarbstoffe (Direktfarbstoffe)	637
5.14.6	Naphthol-AS-Farbstoffe	638
5.14.7	Reaktivfarbstoffe	640
5.14.8	Dispersionsfarbstoffe	640
5.14.9	Metallkomplexazofarbstoffe	641
5.14.10	Diazotypie und verwandte Kopierverfahren	642
5.15	Biphenyl und Arylmethane	643
5.15.1	Biphenyl (Diphenyl), Oligo- und Polyphenyle	643
5.15.2	Diphenylmethan (Ditan)	646
5.15.3	Triphenylmethan (Tritan)	647
5.16	Triphenylmethanfarbstoffe	648
5.16.1	Aminotriphenylmethanfarbstoffe ..	648
5.16.2	Hydroxytriphenylmethanfarbstoffe	650
5.16.3	Phthaleine	651
5.17	Arylethane	653
5.18	Freie Radikale	654
5.18.1	Kohlenstoffradikale	654
5.18.2	Stickstoffradikale	656
5.18.3	Aroxyle, Phenoxyradikale	657
5.18.4	Radikal-Ionen	658
5.19	Phenylierte ungesättigte Kohlenwasserstoffe	659
5.19.1	Arylalkene	659
5.19.2	Arylkine	663
5.19.3	Kumulene	664
5.19.4	Die Allen-Isomerie (Molekülasymmetrie)	665
5.20	Kondensierte aromatische Ringsysteme	666
5.20.1	Inden	667
5.20.2	Fluoren	668
5.20.3	Naphthalin	669
5.20.4	Acenaphthen	678
5.20.5	Anthracen	678
5.20.6	Phenanthren, C ₁₄ H ₁₀	685
5.20.7	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	688
5.20.8	Fullerene	690
5.21	Nichtbenzoide Aromaten	694
5.21.1	Cyclopentadienide	694
5.21.2	Aromatenkomplexe (Metallocene)	695
5.21.3	Tropyliumsalze	697
5.21.4	Tropon	699
5.21.5	Tropolon und seine Derivate	699
5.21.6	Azulene	701
5.21.7	Die Hückel-Regel	702

6 Isoprenoide (Terpene und Steroide)

711

6.1	Acyclische Terpene	712
6.1.1	Terpenkohlenwasserstoffe	712
6.1.2	Terpenalkohole	712
6.1.3	Terpenaldehyde und Terpenketone	713
6.2	Monocyclische Terpene	714
6.2.1	p-Menthan	714
6.2.2	Terpenkohlenwasserstoffe	714
6.2.3	Terpenalkohole und Terpentholle	715
6.2.4	Terpenketone	716
6.3	Bicyclische Terpene	717
6.3.1	Carangruppe	718
6.3.2	Pinangruppe	719
6.3.3	Bornangruppe	720
6.4	Sesquiterpene	722
6.4.1	Acyclische Sesquiterpene	723
6.4.2	Monocyclische Sesquiterpene	723
6.4.3	Bicyclische Sesquiterpene	724
6.4.4	Tricyclische Sesquiterpene	724
6.5	Diterpene	725
6.5.1	Acyclische Diterpene	725
6.5.2	Monocyclische Diterpene	725
6.5.3	Tri- und tetracyclische Diterpene	726
6.6	Triterpene (Squalenoide)	728
6.7	Tetraterpene	729
6.7.1	Carotinoide (Polyenfarbstoffe)	730
6.8	Polyprene	732
6.8.1	Polyprenole	732
6.8.2	Naturkautschuk	732
6.8.3	Synthetische Elastomere	733
6.8.4	Guttapercha	735
6.9	Sterine (Sterole)	738
6.10	Gallensäuren	740
6.11	Steroid-Vitamine	741
6.12	Steroid-Hormone (Sexual- und Nebennierenrindenhormone)	742
6.12.1	Männliche Sexualhormone (Androgene)	743

6.12.2	Weibliche Sexualhormone (Östrogene und Gestagene)	744	6.14	Steroid-Sapogenine	750
6.12.3	Corticoide	747	6.15	Steroid-Alkaloide	751
6.13	Herzaktive Steroide	749			
6.13.1	Cardenolide	749			
6.13.2	Bufadienolide	750			

7 Heterocyclische Verbindungen

753

7.1	Fünfringe mit einem Heteroatom	756	7.7.2	Benzochinolingruppe	831
7.1.1	Pyrrolgruppe	756	7.7.3	Isochinolingruppe	833
7.1.2	Porphinfarbstoffe	760	7.7.4	Chromangruppe	834
7.1.3	Furangruppe	768	7.8	Sechsringe mit zwei Heteroatomen	837
7.1.4	Thiophengruppe	772	7.8.1	Pyridazingruppe	838
7.2	Benzoanellierte Ringsysteme der Pyrrol-, Furan- und Thiophengruppe	774	7.8.2	Pyrimidingruppe	838
7.2.1	Indolgruppe	775	7.8.3	Pyrazingruppe	841
7.2.2	Indolizingruppe	782	7.8.4	Benzodiazine	843
7.2.3	Cumarongruppe	782	7.8.5	Phenazine, Phenoxazine, Dibenzo- <i>p</i> -dioxine und Phenothiazine	844
7.2.4	Thionaphthengruppe	784	7.9	Sechsringe mit drei Heteroatomen	848
7.2.5	Kondensierte tricyclische Systeme	785	7.9.1	Triazine	848
7.3	Fünfringe mit zwei Stickstoff- atomen	786	7.9.2	Oxathiazin	850
7.3.1	Pyrazolgruppe	787	7.10	Benzoanellierte Siebenringe mit einem oder zwei Heteroatomen	850
7.3.2	Imidazolgruppe	792	7.10.1	Benzazepine	850
7.4	Fünfringe mit zwei verschiedenen Heteroatomen	799	7.10.2	Benzodiazepine	851
7.4.1	Oxazolgruppe	799	7.11	Bicyclische Heterosysteme	852
7.4.2	Isooxazolgruppe	801	7.11.1	Purine	852
7.4.3	Thiazolgruppe	802	7.11.2	Pterine	856
7.4.4	Isothiazolgruppe	807	7.11.3	Flavine (Isoalloxazine)	857
7.5	Fünfringe mit drei und mehr Heteroatomen	808	7.11.4	1,4-Diketo-pyrrolo(3,4- <i>c</i>)-pyrrole (DPP)	858
7.5.1	Triazolgruppe	809	7.11.5	Bicyclische Amidine	859
7.5.2	Tetrazolgruppe	811	7.12	Alkaloide	859
7.5.3	Pentazolgruppe	813	7.12.1	Alkaloide vom Tetrahydropyrrrol-, Pyridin-, Piperidin-Typ	860
7.5.4	Syndnone, Mesoinionische Verbindungen	814	7.12.2	Alkaloide vom Tropan-Typ	863
7.5.5	Thiadiazolgruppe	815	7.12.3	Alkaloide vom Chinolizidin-Typ	866
7.6	Sechsringe mit einem Heteroatom	815	7.12.4	Alkaloide vom Chinolin-Typ	867
7.6.1	Pyridingruppe	816	7.12.5	Alkaloide vom Isochinolin-Typ	869
7.6.2	Pyrangruppe	825	7.12.6	Alkaloide vom Indol-Typ	873
7.7	Benzoanellierte Ringsysteme des Pyridins und γ-Pyrons	828	7.13	Supramolekulare Chemie	877
7.7.1	Chinolingruppe	828	7.13.1	Nomenklatur	877
			7.13.2	Calixarene	879

8 Aminosäuren, Peptide und Proteine

881

8.1	Aminosäuren als Proteinbausteine	882	8.2.2	Bausteinanalyse der Peptide	896
8.1.1	Aliphatische Aminosäuren	882	8.2.3	Sequenzanalyse der Peptide	897
8.1.2	Aromatische Aminosäuren	886	8.2.4	Natürliche Peptide	898
8.1.3	Heterocyclische Aminosäuren ...	887	8.3	Eigenschaften und Struktur der Proteine	903
8.1.4	Technische Gewinnung von Aminosäuren	888	8.3.1	Strukturproteine (Skleroproteine)	904
8.2	Peptide	890	8.3.2	Sphäroproteine	907
8.2.1	Peptidsynthesen	890	8.3.3	Konjugierte Proteine	909

9 Chemie und Funktion der Nucleinsäuren

919

9.1	Bausteine der Nucleinsäuren ...	919	9.5	Funktion der Nucleinsäuren	935
9.1.1	Nucleoside	920	9.5.1	Der genetische Code	936
9.1.2	Nucleotide	921	9.5.2	Mutationen, Mutagenese	938
9.2	Struktur der Nucleinsäuren ...	923	9.5.3	Transkription der DNA	940
9.2.1	Sequenzanalyse der DNA	927	9.5.4	Translation	941
9.3	Synthesen von Nucleinsäuresequenzen	929	9.5.5	RNA-Enzyme (Ribozyme)	945
9.3.1	Diester-Methode	929	9.5.6	Kontrolle der Gen-Expression	946
9.3.2	Triester-Methode	930	9.5.7	Genanalyse (Gendiagnostik, DNA-Diagnostik)	947
9.3.3	Sticky-end-Methode, Filling-in-Methode	932	9.6	Gentechnik und Biosynthese ...	951
9.4	Viren	933	9.6.1	Modifikation von Plasmiden	951
			9.6.2	Klonierung	953
			9.6.3	Biosynthese von Hormonen	955

10 Enzyme

959

10.1	Oxidoreduktasen	960	10.3.2	Glykosidhydrolasen	970
10.1.1	Pyridinnucleotide	961	10.3.3	Peptidhydrolasen	971
10.1.2	Flavinenzyme	962	10.4	Lyasen	972
10.1.3	Zellhämme	964	10.4.1	C–C-Lyasen	972
10.2	Transferasen	965	10.4.2	C–O-Lyasen	974
10.2.1	Phosphotransferasen	965	10.5	Isomerasen	975
10.2.2	Acyltransferasen	966	10.6	Ligasen (Synthetasen)	975
10.2.3	Aminotransferasen	967			
10.2.4	Methyl- und Formyl-transferasen	968			
10.3	Hydrolasen	969			
10.3.1	Esterhydrolasen	970			

11 Stoffwechselvorgänge

977

11.1	Photosynthese-Zyklus	977
11.2	Enzymatischer Abbau und Aufbau der Kohlenhydrate	980
11.2.1	Alkoholische Gärung	981
11.2.2	Glykolyse (Zuckerabbau im Organismus)	984
11.2.3	Citronensäure-Zyklus	984

Anhang: Gefährliche Stoffe – Repetitorium

987

Gefährliche Stoffe	987
Repetitorium: Namensreaktionen und -begriffe	1016

Namenregister

1037

Sachregister

1051