

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 Molekülmasse bzw. der Molekularformel	15
1.2.2 Destillation und Rektifikation ...	4	1.5.3 Struktur- und Konstitutionsformel	17
1.2.3 Destillation und Sublimation im Fein- und Hochvakuum	5	1.6 Arten der chemischen Bindungen	18
1.2.4 Wasserdampfdestillation	6	1.6.1 Atombau	19
1.2.5 Extraktion	6	1.6.2 Ionenbindung (Ionenbeziehung) ..	23
1.2.6 Adsorptionschromatographie	6	1.6.3 Atombindung	24
1.2.7 Gel-Chromatographie	7	1.6.4 C—H- und C—C-Bindung	25
1.2.8 Verteilungschromatographie	7	1.6.5 Oniumkomplexe	27
1.2.9 Dünnschichtchromatographie (DC)	8	1.6.6 Polare Atombindung	28
1.2.10 Gaschromatographie (GC)	9	1.7 Funktionelle Gruppen und induktiver Effekt	32
1.2.11 Kriterien der reinen Substanz	10	1.8 Physikalische Methoden der Strukturaufklärung	33
1.3 Qualitative organische Elementaranalyse	11	1.8.1 Massenspektrometrie	34
1.3.1 Kohlenstoff	11	1.8.2 IR-Spektroskopie	37
1.3.2 Wasserstoff	11	1.8.3 UV-Sichtbar-Spektroskopie (Elektronenspektren)	38
1.3.3 Stickstoff	12	1.8.4 Photoelektronenspektroskopie (PE-Spektroskopie)	40
1.3.4 Schwefel	12	1.8.5 Kernmagnetische Resonanzspektroskopie	41
1.3.5 Halogene	12	1.8.6 Elektronenspinresonanz	48
1.3.6 Übrige Elemente	13	1.8.7 Ionen-Cyclotron-Resonanz (ICR) .	50
1.4 Quantitative organische Elementaranalyse	13	1.8.8 Kristallstrukturanalyse	51
1.4.1 Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff	13	1.9 Einteilung des Stoffgebiets der organischen Chemie	52
1.4.2 Schwefel	14		
1.4.3 Halogene (Chlor, Brom, Iod)	14		

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 Pentanole, Pentyl- oder	
2.1.4 Pentane und höhere Homologe ...	60	Amylalkohole	125
2.1.5 Konformationen des Ethans	61	2.8.8 Optische Isomerie, Chiralität	126
2.2 Alkene (Olefine), C_nH_{2n}	64	2.8.9 Höhere Alkohole, $C_nH_{2n+1}OH$...	129
2.2.1 Ethylen (Ethen) und Propen	65	2.8.10 Ungesättigte Alkohole (Alkenole	
2.2.2 Butene, Isobuten und Homologe ..	66	und Alkinole)	130
2.2.3 Die C=C-Doppelbindung	68	2.9 Halogenderivate der Alkane ...	131
2.2.4 Die <i>cis-trans</i> -Isomerie der		2.9.1 Alkylhalogenide (Halogenalkane)	132
Ethylene	70	2.9.2 Mechanismen der nucleophilen	
2.2.5 Additionsreaktionen	72	Substitution am gesättigten	
2.2.6 Substitutionsreaktionen	78	C-Atom	135
2.3 Polymerisation der Alkene und		2.9.3 Eliminierungsreaktionen	140
Vinylderviate	79	2.9.4 Phasentransfer-Katalyse (PTC) ..	141
2.3.1 Radikalkettenpolymerisation	80	2.9.5 Fragmentierungsreaktionen	142
2.3.2 Ionenkettenpolymerisation	80	2.9.6 Höher halogenierte Alkane	143
2.3.3 Koordinative Ketten-		2.9.7 Fluorierte Kohlenwasserstoffe ...	145
polymerisation	81	2.10 Ester anorganischer Säuren ...	147
2.3.4 Polymerisation der Alkene	82	2.10.1 Ester der Schwefelsäure	
2.3.5 Polymerisation der		(Alkylsulfate)	147
Vinylverbindungen	86	2.10.2 Ester der Salpetersäure	148
2.4 Erdölchemie	88	2.10.3 Ester der salpetrigen Säure	148
2.4.1 Erdöl, Erdgas und Ölschiefer ...	89	2.10.4 Ester der Phosphorsäure	149
2.4.2 Kraftstoffe aus Erdöl	91	2.10.5 Ester der Borsäure	150
2.4.3 Kraftstoffe aus Kohle	94	2.11 Ether	150
2.5 Petrolchemie	94	2.11.1 Darstellung	151
2.6 Alkine (Acetylene), C_nH_{2n-2}	96	2.11.2 Eigenschaften	152
2.6.1 Darstellung	96	2.12 Alkanthiole (Mercaptane)	154
2.6.2 Die C \equiv C-Dreifachbindung	98	2.12.1 Darstellung	154
2.6.3 Additionsreaktionen	101	2.12.2 Eigenschaften und Verwendung ..	155
2.6.4 Reppe-Synthesen	103	2.13 Dialkylsulfide (Thioether)	155
2.7 Kohlenwasserstoffe mit zwei		2.13.1 Darstellung	156
oder mehr C=C-Doppel-		2.13.2 Eigenschaften	156
bindungen (Polyene)	106	2.13.3 Sulfoxide und Sulfone	157
2.7.1 Allene	106	2.14 Aliphatische Sulfonsäuren,	
2.7.2 Diene	107	Sulfonylchloride, Sulfon- und	
2.7.3 1,2- und 1,4-Addition; Mesomerie	108	Sulfensäuren	158
2.7.4 Woodward-Hoffmann-Regeln	111	2.14.1 Alkansulfonsäuren	159
2.7.5 Diolefine	116	2.14.2 Alkansulfonylchloride,	
2.8 Einwertige Alkohole (Alkanole)	116	Alkansulfon- und Alkansulfen-	
2.8.1 Die Wasserstoffbindung		säuren	159
(Wasserstoffbrücke)	118	2.15 Nitroalkane (Nitroparaffine) ...	161
2.8.2 Oxidationsprodukte der Alkohole ..	119	2.15.1 Darstellung	162
2.8.3 Methanol, Methylalkohol		2.15.2 Eigenschaften	163
(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 Kondensations- reaktionen	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</i> -Umlagerung ..	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 Carbonyl- verbindungen	235
2.19 Organische Verbindungen einiger Nichtmetalle	182	2.23 Tabellarische Gegenüberstellung der Aldehyde und Ketone	240
2.19.1 Organische Phosphorverbindungen	182	2.24 Gesättigte aliphatische Monocarbonsäuren (Alkansäuren, Fettsäuren)	243
2.19.2 Organische Arsenverbindungen ..	187	2.24.1 Allgemeine Darstellungsweisen ..	243
2.19.3 Organische Siliciumverbindungen	188	2.24.2 Acidität der Carboxylgruppe	245
2.19.4 Organische Borverbindungen	190	2.24.3 Ameisensäure, Methansäure	247
2.20 Metallorganische Verbindungen	193	2.24.4 Essigsäure, Ethansäure	249
2.20.1 Alkalimetallorganische Ver- bindungen (Alkalimetall- organyle)	194	2.24.5 Propionsäure, Propansäure	250
2.20.2 Organische Magnesium- verbindungen	195	2.24.6 Buttersäuren, Butansäuren	250
2.20.3 Organische Zinkverbindungen ...	198	2.24.7 Valeriansäuren, Pentansäuren	251
2.20.4 Organische Titanverbindungen ..	199	2.24.8 Höhere Fettsäuren	251
2.20.5 Organische Quecksilber- verbindungen	200	2.25 Ungesättigte aliphatische Monocarbonsäuren, Alkensäuren	252
2.20.6 Organische Aluminium- verbindungen	201	2.25.1 Allgemeine Darstellungsweisen ..	252
2.20.7 Organische Zinnverbindungen ...	202	2.25.2 Acrylsäure, Propensäure	253
2.20.8 Organische Bleiverbindungen ...	203	2.25.3 Acrylnitril	254
2.21 Aliphatische Aldehyde (Alkanale)	203	2.25.4 Ungesättigte Carbonsäuren mit vier C-Atomen	256
2.21.1 Allgemeine Darstellungsweisen ..	204	2.25.5 Ölsäure (9-Octadecensäure)	257
2.21.2 Nachweisreaktionen der Aldehyde	205	2.25.6 Mehrfach ungesättigte Monocarbonsäuren	258
2.21.3 Die C=O-Doppelbindung	205	2.26 Fette, Öle und Wachse	259
2.21.4 Additionsreaktionen der Aldehyde	206	2.26.1 Fette und Öle	259
2.21.5 Enantiotopie und Prochiralität ...	208	2.26.2 Gewinnung der Fette	261
2.21.6 Additions- und Substitutions- reaktionen der Aldehyde	209	2.26.3 Wachse	261
2.21.7 Kondensationsreaktionen der Aldehyde	209	2.27 Seifen und synthetische Waschmittel (Detergenzien)	262
2.21.8 Formaldehyd (Methanal)	215	2.27.1 Anionaktive Verbindungen	262
2.21.9 Acetaldehyd (Ethanal)	216	2.27.2 Kationaktive Verbindungen	265
2.21.10 Propionaldehyd (Propanal)	217	2.27.3 Nichtionogene Verbindungen	266
2.21.11 Halogenaldehyde	218	2.28 Derivate aliphatischer Monocarbonsäuren	266
2.21.12 Ungesättigte Aldehyde (Alkenale und Alkinale)	219	2.28.1 Carbonsäurehalogenide	266
2.21.13 Gezielte Aldolreaktion	220	2.28.2 Carbonsäureanhydride	269
		2.28.3 Ketene	270
		2.28.4 Carbonsäureester	272

2.28.5	Orthocarbonsäureester	276	2.34	Gesättigte aliphatische	
2.28.6	Carbonsäureamide	276		Dicarbonsäuren	344
2.28.7	Thiocarbonsäureamide	280	2.34.1	Oxalsäure	346
2.28.8	Blausäure und Nitrile (oder Carbonitrile)	281	2.34.2	Malonsäure	347
2.28.9	Hydroxamsäuren	284	2.34.3	Bernsteinsäure	351
2.28.10	Imidoester, Amidine und Amidrazone	284	2.34.4	Höhere Dicarbonsäuren	353
2.28.11	Säurehydrazide und Säureazide	285	2.35	Ungesättigte aliphatische	
2.29	Substitutionsprodukte ali-			Dicarbonsäuren	355
	phatischer Monocarbonsäuren	286	2.35.1	Ethylendicarbonsäuren (Malein- und Fumarsäure)	355
2.29.1	Halogencarbonsäuren	286	2.35.2	Diels-Alder-Reaktion	357
2.29.2	D- und L-Konfiguration am Chiralitätszentrum als stereogenem Element	289	2.35.3	Acetylendicarbonsäure	361
2.29.3	Absolute Konfiguration am Chiralitätszentrum (CIP-System)	290	2.36	Aliphatische Hydroxy-di- und	
2.29.4	Hydroxycarbonsäuren	294		-tricarbonsäuren	362
2.29.5	Lactone	296	2.36.1	Tartronsäure (Hydroxymalon- säure)	362
2.29.6	Die wichtigsten Hydroxysäuren	298	2.36.2	Äpfelsäure (Hydroxybernstein- säure)	362
2.29.7	Aminocarbonsäuren	301	2.36.3	Walden-Umkehr	363
2.29.8	Die wichtigsten aliphatischen Aminosäuren	307	2.36.4	Asymmetrische Synthese, Stereo selektive Synthese	365
2.30	Aliphatische Aldehyd- und		2.36.5	Weinsäure (Dihydroxybernstein- säure)	367
	Ketocarbonsäuren	309	2.36.6	Methoden der Spaltung von Racemformen	369
2.30.1	Aldehydcarbonsäuren	309	2.36.7	Citronensäure	371
2.30.2	α -Ketosäuren	310	2.37	Aliphatische	
2.30.3	β -Ketosäuren	311		Ketodicarbonsäuren	372
2.30.4	Keto-Enol-Tautomerie (Oxo-Enol-Tautomerie)	312	2.37.1	Mesoxalsäure	372
2.30.5	Darstellung des Acetessigesters	314	2.37.2	Oxalessigsäure	372
2.30.6	Synthesen mit Acetessigester	315	2.38	Derivate der Kohlensäure	373
2.30.7	γ -Ketosäuren	317	2.38.1	Halogenide der Kohlensäure	374
2.31	Mehrwertige Alkohole	319	2.38.2	Ester der Kohlensäure	374
2.31.1	Zweiwertige Alkohole (Glykole, 1,2-Diole)	319	2.38.3	Amide der Kohlensäure	375
2.31.2	Dreiwertige Alkohole	328	2.39	Thioderivate der Kohlensäure	382
2.31.3	Vierwertige Alkohole (Tetrine)	333	2.39.1	Schwefelkohlenstoff (Kohlendisulfid)	382
2.31.4	Fünfwertige Alkohole (Pentite)	334	2.39.2	Thioharnstoff (Thiocarbamid)	383
2.31.5	Sechswertige Alkohole (Hexite)	335	2.39.3	Thiosemicarbazid	384
2.32	Aliphatische Hydroxyaldehyde		2.39.4	Thiocarbonohydrazid	385
	und Hydroxyketone	336	2.40	Cyansäure und ihre	
2.32.1	Hydroxyaldehyde (Aldehydalkohole)	336		Derivate	385
2.32.2	Hydroxyketone (Ketonalkohole)	338	2.40.1	Cyanhalogenide	387
2.33	Aliphatische Dialdehyde,		2.40.2	Cyansäureester	387
	Ketoaldehyde und Diketone	339	2.40.3	Isocyansäureester	388
2.33.1	Dialdehyde	339	2.40.4	Cyanamide	389
2.33.2	Ketoaldehyde	341	2.40.5	Carbodiimide	391
2.33.3	Diketone	341	2.41	Thiocyansäure und ihre	
				Derivate	391
			2.41.1	Darstellung	391
			2.41.2	Thio- und Isothiocyansäureester	392

2.42 Dicyan und Dirhodan	393	2.44.2 Carbine	401
2.42.1 Dicyan	393	2.44.3 Nitrene	402
2.42.2 Dirhodan	394	2.45 Organische Übergangs-	
2.43 Kohlenmonoxid und seine		metallkomplexe	404
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	
2.44 Carbene, Carbine und		Eliminierung	406
Nitrene als instabile Zwischen-		2.45.4 Wacker-Hoechst-Verfahren	407
produkte	399	2.45.5 Heck-Reaktion	408
2.44.1 Carbene	399	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		3.4 Große Kohlenstoffringe	438
Verbindungen	415	3.4.1 Darstellung	438
3.1.3 Cyclopropan	415	3.5 Bi- und polycyclische	
3.1.4 Cyclobutan und seine Derivate ..	416	Kohlenwasserstoffe	440
3.2 Normale Kohlenstoffringe	420	3.5.1 Spirane	440
3.2.1 Cyclopentan 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	
3.3.1 Cyclooctatetraen	435	Systeme	446

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-		4.2.3 Pseudooligosaccharide	488
sacchariden	462	4.3 Polysaccharide (Glycane)	488
4.1.4 Nachweisreaktionen der		4.3.1 Stärke (Amylum)	489
Monosaccharide	462	4.3.2 Glykogen	492
4.1.5 Synthese, Auf- und Abbau von		4.3.3 Inulin	492
Monosacchariden	463	4.3.4 Chitin	492
4.1.6 Ringstruktur der Monosaccharide	466	4.3.5 Polyuronsäuren (Glycuronane) ...	493
4.1.7 Glykoside	470	4.3.6 Cellulose	493
4.1.8 Pentosen, $C_5H_{10}O_5$	473	4.3.7 Hemicellulosen	495
4.1.9 Hexosen, $C_6H_{12}O_6$	473	4.3.8 Celluloseether	495
4.1.10 Reaktionen der Hydroxylgruppen	474	4.3.9 Cellulosenitrate	496
4.1.11 Desoxyzucker	476	4.3.10 Cellulosische Chemiefasern	
4.1.12 Aminosucker	476	(Halbsynthetische Fasern)	496
4.1.13 Zuckermereaptale	478		
4.1.14 L(+)-Ascorbinsäure, Vitamin C ..	479		

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 Phenoether-aldehyde	575
5.1.4 Ethylbenzol	509	5.8.4 Vanillin	578
5.1.5 Xylol	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 mineralaurer 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 (Nitriline)	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 Färbetechnik	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	5.19	Phenylierte ungesättigte Kohlenwasserstoffe	659
5.14.4	Saure Azofarbstoffe	637	5.19.1	Arylalkene	659
5.14.5	Substantive Azofarbstoffe (Direktfarbstoffe)	637	5.19.2	Arylalkine	663
5.14.6	Naphthol-AS-Farbstoffe	638	5.19.3	Kumulene	664
5.14.7	Reaktivfarbstoffe	640	5.19.4	Die Allen-Isomerie (Molekülasymmetrie)	665
5.14.8	Dispersionsfarbstoffe	640	5.20	Kondensierte aromatische Ringsysteme	666
5.14.9	Metallkomplexazofarbstoffe	641	5.20.1	Inden	667
5.14.10	Diazotypie und verwandte Kopierverfahren	642	5.20.2	Fluoren	668
5.15	Biphenyl und Arylmethane	643	5.20.3	Naphthalin	669
5.15.1	Biphenyl (Diphenyl), Oligo- und Polyphenyle	643	5.20.4	Acenaphthen	678
5.15.2	Diphenylmethan (Ditan)	646	5.20.5	Anthracen	678
5.15.3	Triphenylmethan (Tritan)	647	5.20.6	Phenanthren, C ₁₄ H ₁₀	685
5.16	Triphenylmethanfarbstoffe	648	5.20.7	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	688
5.16.1	Aminotriphenylmethanfarbstoffe	648	5.20.8	Fullerene	690
5.16.2	Hydroxytriphenylmethanfarbstoffe	650	5.21	Nichtbenzoide Aromaten	694
5.16.3	Phthaleine	651	5.21.1	Cyclopentadienide	694
5.17	Arylethane	653	5.21.2	Aromatenkomplexe (Metallocene)	695
5.18	Freie Radikale	654	5.21.3	Tropylumsalze	697
5.18.1	Kohlenstoffradikale	654	5.21.4	Tropon	699
5.18.2	Stickstoffradikale	656	5.21.5	Tropolon und seine Derivate	699
5.18.3	Aroxyle, Phenoxyradikale	657	5.21.6	Azulene	701
5.18.4	Radikal-Ionen	658	5.21.7	Die Hückel-Regel	702

6 Isoprenoide (Terpene und Steroide)

711

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

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	Isoxazolgruppe	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 Tetrahydropyrrol-, Pyridin-, Piperidin-Typ	860
7.5.4	Sydnone, Mesoionische 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 Protein-			
bausteine	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	
8.1.4 Technische Gewinnung von		der Proteine	903
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 Nucleinsäure-		9.5.5 RNA-Enzyme (Ribozyme)	945
sequenzen	929	9.5.6 Kontrolle der Gen-Expression ...	946
9.3.1 Diester-Methode	929	9.5.7 Genanalyse (Gendiagnostik,	
9.3.2 Triester-Methode	930	DNA-Diagnostik)	947
9.3.3 Sticky-end-Methode,		9.6 Gentechnik und Biosynthese ...	951
Filling-in-Methode	932	9.6.1 Modifikation von Plasmiden	951
9.4 Viren	933	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 Zellhämone	964	10.4.1 C-C-Lyase	972
10.2 Transferasen	965	10.4.2 C-O-Lyase	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	11.2.2	Glykolyse (Zuckerabbau im Organismus)	984
11.2	Enzymatischer Abbau und Aufbau der Kohlenhydrate	980	11.2.3	Citronensäure-Zyklus	984
11.2.1	Alkoholische Gärung	981			

Anhang: Gefährliche Stoffe – Repetitorium

987

Gefährliche Stoffe	987
Repetitorium: Namensreaktionen und -begriffe	1016

Namenregister

1037

Sachregister

1051