

Joachim Buddrus

Grundlagen der Organischen Chemie

3., überarbeitete und aktualisierte Auflage



Walter de Gruyter
Berlin · New York 2003

Inhalt

Kapitel I

Elektronenstruktur und Reaktivität von Kohlenstoffverbindungen

1 Einleitung	1
2 Ionische und kovalente Bindung	2
3 Mesomerie (Resonanz)	4
4 Elektronegativität und Polarität	6
5 Induktive und mesomere Effekte	10
6 Elektronenpaarabstoßung und Molekülgeometrie	12
7 Hybridorbitale und Molekülgeometrie	16
8 Molekülorbitale	18
8.1 Lokalisierte Molekülorbitale	18
8.2 Delokalisierte Molekülorbitale	21
9 Bindungsenergie	24
10 Zum Ablauf chemischer Reaktionen	26
11 Lösung der Aufgaben zu Kapitel I	30

Kapitel II

Strukturaufklärung durch Spektroskopie

1 Einleitung	31
2 Massenspektrometrie	32
2.1 Grundlagen	32
2.2 Massenspektren einfacher Verbindungen	34
2.3 Massenspektrum und Summenformel	39
3 Ultraviolett-spektroskopie	41
3.1 Grundlagen	41
3.2 UV-Spektren ungesättigter Verbindungen	42
4 Infrarotspektroskopie	45
4.1 Grundlagen	45
4.2 Interpretation von IR-Spektren	48

VIII Inhalt

5	Kernmagnetische Resonanzspektroskopie	51
5.1	Grundlagen	52
5.2	Chemische Verschiebung von Protonen	53
5.3	Fläche eines ^1H -NMR-Signals	55
5.4	Kopplung zwischen Protonen	56
5.5	Kernmagnetische Resonanzspektroskopie von ^{13}C	58
6	Lösung der Aufgaben zu Kapitel II	62

Kapitel III

Alkane

1	Einteilung der Kohlenwasserstoffe	63
2	Konstitutionsisomerie	64
3	Nomenklatur	65
4	Homologe Reihe	68
5	Konformation von Alkanen	69
6	Löslichkeit, Siede- und Schmelzpunkte von Alkanen	72
7	NMR-Spektren von Alkanen	73
8	Vorkommen von Alkanen	74
9	Darstellung von Alkanen	74
10	Reaktionen von Alkanen	76
10.1	Halogenierung von Alkanen	77
10.2	Sulfochlorierung von Alkanen	83
10.3	Oxidation von Alkanen mit Sauerstoff	84
10.4	Pyrolyse von Alkanen	87
11	Lösung der Aufgaben zu Kapitel III	89

Kapitel IV

Cycloalkane

1	Einteilung der Cycloalkane	91
2	cis-trans-Isomerie bei Cycloalkanen	92
3	Konformation unsubstituierter Cycloalkane	93
4	Konformation substituierter Cycloalkane	95

5	Darstellung von Cycloalkanen	98
6	Reaktionen von Cycloalkanen	100
6.1	Verbrennung und Ringspannung	100
6.2	Ringöffnung kleiner Ringe	102
7	Polycyclische Alkane	103
8	Lösung der Aufgaben zu Kapitel IV	106

Kapitel V
Stereoisomerie

1	Einteilung von Isomeren	107
2	Enantiomerie als Folge von Chiralität	108
3	Moleküle mit einem Chiralitätszentrum	109
4	Moleküle mit mehreren Chiralitätszentren	112
4.1	meso-Verbindungen	113
5	Moleküle mit einer Chiralitätsachse	115
6	Symmetrieeigenschaften von Enantiomeren	116
7	Optische Aktivität von Enantiomeren	119
8	Trennung von Enantiomeren (Racematspaltung)	121
9	Chemie und Biochemie von Enantiomeren	123
10	Prostereoisomerie	125
10.1	Topizität von Substituenten	125
10.2	Topizität von Molekülseiten	128
10.3	Prochiralität	130
11	Lösung der Aufgaben zu Kapitel V	133

Kapitel VI
Alkene

1	Übersicht	135
2	Nomenklatur von Alkenen	135
3	cis-trans-Isomerie von Alkenen	137
4	Unterscheidung von cis- und trans-Alken durch NMR	138

X	Inhalt	
5	Darstellung von Alkenen	140
6	Zur Reaktivität von Alkenen	142
7	Hydrierung von Alkenen und Dehydrierung von Alkanen	144
7.1	Hydrierungswärme und relative Stabilität von Alkenen	146
8	Elektrophile Additionen an Alkene	147
8.1	Erzeugung und Stabilität von Carbenium-Ionen	147
8.2	Addition von Halogen und unterhalogeniger Säure an Alkene	149
8.3	Addition von Säuren oder Wasser an Alkene	152
8.4	Hydroborierung von Alkenen	156
8.5	Chemie der Trialkylborane	158
8.6	Addition von Carbenen und Carbenoiden an Alkene	161
8.7	Epoxidierung von Alkenen. Asymmetrische Epoxidierung	166
8.8	Hydroxylierung von Alkenen	168
8.9	Ozonolyse von Alkenen	169
8.10	Zusammenfassung elektrophiler Additionen an Alkene	171
9	Radikalische Additionen an Alkene	173
10	Substitution in Allylstellung	176
11	Exkurs: Ein Pentahalogenalkan mit Antitumorwirkung	179
12	Lösung der Aufgaben zu Kapitel VI	180

Kapitel VII
Halogenkohlenwasserstoffe

1	Übersicht	183
1.1	Perfluoralkane	185
2	Darstellung	186
3	Reaktionen – ein Überblick	188
4	Technische Bedeutung mehrfach halogener Kohlenwasserstoffe	188
5	Lösung der Aufgaben zu Kapitel VII	192

Kapitel VIII
Nucleophile Substitutionen

1	Übersicht	193
2	Das Nucleophil	193

3 Die Abgangsgruppe	195
4 Zum Ablauf nucleophiler Substitutionen	196
5 Die S _N 2-Reaktion	196
5.1 Stereochemie der S _N 2-Reaktion	197
6 Die S _N 1-Reaktion	198
6.1 Stereochemie der S _N 1-Reaktion	200
7 Einfluß des Kohlenwasserstoffrests auf die Substitution	202
7.1 Gesättigte Alkylhalogenide	202
7.2 Allyl- und Benzylhalogenide	204
7.3 Vinyl- und Arylhalogenide	205
8 Einfluß des Lösungsmittels	207
8.1 Lösungsmittel und S _N 2-Reaktionen	208
8.2 Lösungsmittel und S _N 1-Reaktionen	210
9 Vergleich von S _N 1- und S _N 2-Reaktionen	211
10 Nucleophile Substitution im Zweiphasensystem	211
11 Synthetische Bedeutung nucleophiler Substitutionen	213
12 Asymmetrische Synthese eines Pflanzenschutzmittels	214
13 Exkurs: Nucleophile Methylierung in der Zelle	216
14 Lösung der Aufgaben zu Kapitel VIII	219

Kapitel IX

Eliminierungen

1 Einteilung von Eliminierungen	221
2 E2-Eliminierung	223
2.1 Richtung der E2-Eliminierung	224
2.2 Stereochemie der E2-Eliminierung	225
3 E1-Eliminierung	228
4 Sonderfall: Die E1cB-Eliminierung	229
5 Konkurrenz von Eliminierung und Substitution	230
6 Exkurs: Kinetische Isotopeneffekte in Chemie und Biochemie	232
7 Lösung der Aufgaben zu Kapitel IX	234

Kapitel X

Alkohole

1	Übersicht und Nomenklatur von Alkoholen	235
2	Wasserstoffbrücken und IR-Spektren von Alkoholen	236
3	NMR-Unterscheidung von alkoholischen Gruppen	238
4	Eigenschaft und Verwendung von Alkoholen	240
5	Darstellung von Alkoholen	241
5.1	Darstellung von Alkoholen in der Technik	242
6	Reaktionen von Alkoholen	244
6.1	Acidität von Alkoholen. Alkoholate	244
6.2	Umwandlung von Alkoholen in Alkylhalogenide	246
6.3	Umwandlung von Alkoholen in Sulfonsäureester	248
6.4	Dehydratisierung von Alkoholen zu Alkenen	249
6.5	Dehydratisierung von Alkoholen zu Ethern	250
6.6	Oxidation von Alkoholen	252
6.7	Exkurs: Dehydrierung von Alkoholen in der Zelle	254
7	Mehrwertige Alkohole	256
7.1	Darstellung mehrwertiger Alkohole	257
7.2	Dynamit und die Nobelstiftung	258
7.3	Glykolspaltung von 1,2-Diolen	258
8	Lösung der Aufgaben zu Kapitel X	261

Kapitel XI

Ether

1	Übersicht und Nomenklatur	263
2	Darstellung von Ethern	265
3	Reaktionen von Ethern	267
3.1	Autoxidation von Ethern	268
3.2	Bildung von Oxoniumsalzen	268
3.3	Etherspaltung durch starke Säuren	269
4	Kronenether	270
5	Exkurs: Cyclische Ether als Ionophore	272
6	Epoxide	273
6.1	Darstellung von Epoxiden	273
6.2	Reaktionen von Epoxiden	275

7 Exkurs: Asymmetrische Synthese eines β -Blockers	278
8 Schwefelanaloga von Alkoholen und Ethern	279
9 Lösung der Aufgaben zu Kapitel XI	284

Kapitel XII

Alkine

1 Übersicht und Nomenklatur	287
2 Struktur und IR-Spektren von Alkinen	288
3 Darstellung von Alkinen	290
4 Reaktionen von Alkinen	292
4.1 1-Alkine und Acetylide	293
4.2 Addition von Wasserstoff an Alkine	295
4.3 Elektrophile Additionen an Alkine	297
4.4 Nucleophile Additionen an Alkine	299
4.5 Acetylen als industrielle Ausgangsverbindung	300
5 Zusammenfassung der Reaktionen von Alkinen	302
6 Exkurs: Pheromone statt Insektizide	303
7 Lösung der Aufgaben zu Kapitel XII	305

Kapitel XIII

Mehrfach ungesättigte Kohlenwasserstoffe

1 Einteilung	307
2 Stabilität konjugierter Diene	309
3 Konformere des Butadiens	310
4 UV-Spektren ungesättigter Kohlenwasserstoffe	310
5 Konstitution und Farbe	311
6 Darstellung konjugierter Olefine	313
7 Reaktionen mehrfach ungesättigter Kohlenwasserstoffe	316
7.1 Addition von Bromwasserstoff an 1,3-Diene	316
7.2 Kinetische und thermodynamische Steuerung der HBr-Addition	317
7.3 Weitere Additionen an 1,3-Diene	319
7.4 Diels-Alder-Reaktion	320

XIV Inhalt

8 Kumulene	326
9 Exkurs: Die Photochemie des Sehvorgangs	328
10 Lösung der Aufgaben zu Kapitel XIII	330

Kapitel XIV
Benzoide Aromaten

1 Sonderstellung des Benzols	333
2 Benzoide Aromaten im Überblick	334
3 Nomenklatur substituierter Aromaten	335
4 Bindungslängen in Aromaten	337
5 Bindung in Benzol	337
6 Hydrierungswärme von Benzol	339
7 Krebserrigende Eigenschaft von Aromaten	339
8 Gewinnung von Aromaten	340
9 Reaktionen von Aromaten – ein Überblick	341
10 Elektrophile Substitution an Benzol	342
10.1 Nitrierung von Benzol	344
10.2 Halogenierung von Benzol	345
10.3 Sulfonierung von Benzol	346
10.4 Acylierung von Benzol nach Friedel-Crafts	348
10.5 Alkylierung von Benzol nach Friedel-Crafts	352
10.6 Zusammenfassung elektrophiler Substitutionen	357
11 Elektrophile Zweitsubstitution	358
11.1 Mechanismus der Zweitsubstitution	361
11.2 Quantifizierung der Geschwindigkeit der Zweitsubstitution	364
12 Elektrophile Substitution an mehrkernigen Aromaten	366
13 Nucleophile aromatische Substitution	369
14 Eliminierung am Benzolring: Arine	372
15 Exkurs: Herstellung des Gewürzes Vanillin	375
16 Additionen an Aromaten	377
17 Reaktionen der Seitenkette von Alkylaromaten	381
18 Lösung der Aufgaben zu Kapitel XIV	384

Kapitel XV**Nichtbenzoide Aromaten**

1	Benzoide und nichtbenzoide Aromaten. Hückel-Regel	389
2	Antiaromaten	392
3	NMR-Spektren: Olefine, Aromaten und Antiaromaten	395
4	Darstellung nichtbenzoider Aromaten	397
5	Reaktionen nichtbenzoider Aromaten	402
6	Vergleich: Olefine, Aromaten und Antiaromaten	403
7	Lösung der Aufgaben zu Kapitel XV	404

Kapitel XVI**Metallorganische Verbindungen**

1	Einleitung	407
2	Bindung in metallorganischen Verbindungen	407
2.1	Moleküle mit kovalenter Bindung	408
2.2	Moleküle mit ionischer Bindung	408
2.3	Moleküle mit Mehrzentrenbindung	409
2.4	π -Komplexe und 18-Elektronenregel	410
3	Eigenschaften metallorganischer Verbindungen	412
4	Darstellung metallorganischer Verbindungen	413
4.1	Metallorganische Verbindungen aus C—H-aciden Verbindungen	413
4.2	Metallorganische Verbindungen aus Halogenalkanen	415
4.3	Metallorganische Verbindungen aus weiteren Vorstufen	417
5	Reaktionen metallorganischer Verbindungen	419
5.1	Wasser- und Luftempfindlichkeit	419
5.2	Lithium- und magnesiumorganische Verbindungen	420
5.3	Kupferorganische Verbindungen	421
5.4	Bororganische und aluminiumorganische Verbindungen	422
6	Übergangsmetallverbindungen und homogene Katalyse	424
6.1	Homogene Hydrierung von Alkenen	425
6.2	Hydroformylierung von Alkenen zu Aldehyden	427
6.3	Metathese von Olefinen. Der Riechstoff Exaltolid	429
6.4	Polymerisation von Alkenen	431
7	Lösung der Aufgaben zu Kapitel XVI	433

Kapitel XVII

Aldehyde und Ketone I: Reaktionen an der Carbonylgruppe

1	Aldehyde und Ketone im Alltag	435
2	π -Bindung in Aldehyden und Ketonen	438
3	IR- und NMR-Spektren von Aldehyden und Ketonen	438
4	Darstellung von Aldehyden und Ketonen	439
4.1	Technische Herstellung von Aldehyden und Ketonen	441
5	Nucleophile Additionen an die Carbonylgruppe	442
5.1	Zur Reaktivität von Aldehyden und Ketonen	442
5.2	Addition von Wasser: gem-Diole	444
5.3	Addition von Alkoholen: Halbacetale und Acetale	446
5.4	Addition von Thiolen: Thioacetale	448
5.5	Addition von Aminoverbindungen	450
5.6	Addition von CH-aciden Verbindungen	453
5.7	Addition von metallorganischen Verbindungen. Grignard-Reaktion ...	455
5.8	Reaktion mit Yliden: Wittig-Reaktion	461
5.9	Exkurs: Technische Synthese von Vitamin A	464
6	Oxidation von Aldehyden und Ketonen	466
7	Reduktion von Aldehyden und Ketonen zu Alkoholen	469
8	Reduktion von Aldehyden und Ketonen zu Kohlenwasserstoffen	470
8.1	Reduktion mit Zink: Clemmensen-Reduktion	470
8.2	Reduktion mit Hydrazin: Wolff-Kishner-Reduktion	471
9	Lösung der Aufgaben zu Kapitel XVII	473

Kapitel XVIII

Aldehyde und Ketone II: Reaktionen am α -C-Atom

1	Keto-Enol-Gleichgewicht	477
2	Lithiumenolate	481
3	Racemisierung chiraler Aldehyde und Ketone	482
4	Halogenierung von Aldehyden und Ketonen	483
5	Alkylierung von Ketonen	487
6	Aldoladdition und Aldolkondensation	488
6.1	Gemischte Aldoladdition	490
6.2	Cyclische Aldoladdition	493
6.3	Reaktionen der Aldole	494

7 Exkurs: Aldoladditionen in der Zelle	495
8 Aminomethylierung von Ketonen: die Mannich-Reaktion	497
9 Lösung der Aufgaben zu Kapitel XVIII	499

Kapitel XIX
Carbonsäuren

1 Übersicht und Nomenklatur	501
2 Vorkommen und Geruch von Carbonsäuren	504
3 Wasserstoffbrücken in Carbonsäuren	505
4 Darstellung von Carbonsäuren	505
5 Reaktionen von Carbonsäuren	507
5.1 Acidität von Carbonsäuren	509
5.2 Salze von Carbonsäuren. Seifen und Tenside	511
5.3 Veresterung von Carbonsäuren mit Alkohol	514
5.4 Veresterung von Carbonsäuren mit Diazomethan	515
5.5 Umwandlung von Carbonsäuren in Säurehalogenide	516
5.6 Reduktion von Carbonsäuren zu primären Alkoholen	517
5.7 Decarboxylierung von Carbonsäuren	518
5.8 Halogenierung von Carbonsäuren in α -Stellung	519
6 Peroxycarbonsäuren	520
7 Dicarbonsäuren	522
7.1 Darstellung von Dicarbonsäuren	524
7.2 Reaktionen von Dicarbonsäuren	525
8 Exkurs: der Konservierungsstoff Sorbinsäure	528
9 Lösung der Aufgaben zu Kapitel XIX	529

Kapitel XX
Derivate von Carbonsäuren

1 Zur Reaktivität von Carbonsäurederivaten	531
2 Carbonsäurehalogenide	534
2.1 Darstellung von Carbonsäurechloriden	534
2.2 Reaktionen von Carbonsäurechloriden	535

XVIII Inhalt

3 Carbonsäureanhydride	539
3.1 Darstellung von Carbonsäureanhydriden	539
3.2 Reaktionen von Carbonsäureanhydriden	541
4 Carbonsäureamide	541
4.1 Einteilung und Vorkommen	541
4.2 Bindung und Wasserstoffbrücken bei Carbonsäureamiden	543
4.3 ¹ H-NMR-Spektren von Carbonsäureamiden	544
4.4 Darstellung von Carbonsäureamiden	545
4.5 Reaktionen von Carbonsäureamiden	546
5 Nitrile	551
5.1 Darstellung von Nitrilen	551
5.2 Reaktionen von Nitrilen	552
6 Carbonsäureester	554
6.1 Nomenklatur und Vorkommen	554
6.2 Darstellung von Estern	555
6.3 Reaktionen an der Estergruppe	556
6.4 Reaktionen am α -Kohlenstoffatom von Estern	561
6.5 Synthesen mit Malonester- und Acetessigester	566
7 Lactone und Lactame	569
7.1 Lactone	569
7.2 Lactame	571
8 Thiocarbonsäurederivate	573
9 Kohlensäurederivate	574
10 Exkurs: der Süßstoff Saccharin	575
11 Lösung der Aufgaben zu Kapitel XX	577

Kapitel XXI

α , β -Ungesättigte Carbonylverbindungen

1 Übersicht und Darstellung	583
2 Reaktionen – ein Überblick	584
3 Elektrophile Additionen	585
4 Nucleophile Additionen	587
4.1 Addition von Aminen, Thiolen, Alkoholen etc.	587
4.2 Addition CH-acider Verbindungen (Michael-Addition)	589
4.3 Addition von Aldehyden (Stetter-Reaktion)	593
4.4 Addition metallorganischer Verbindungen	594

5	Lösung der Aufgaben zu Kapitel XXI	595
---	--	-----

Kapitel XXII

Amine

1	Einteilung und Nomenklatur	597
2	Struktur von Aminen und Inversion am Stickstoff	599
3	Pharmakologische Wirkung von Aminen	601
4	Darstellung von Aminen	602
5	Reaktionen von Aminen	608
5.1	Amine als schwache Säuren	609
5.2	Amine als schwache Basen	609
5.3	Reaktion von Aminen mit Alkylhalogeniden	612
5.4	Reaktion von Aminen mit Carbonsäurechloriden	615
5.5	Reaktion von Aminen mit Arensulfonsäurechlorid. Sulfonamide	616
5.6	Reaktion von Aminen mit salpetriger Säure	618
6	Aromatische Diazoniumsalze	621
6.1	Reduktion der Diazoniumgruppe	621
6.2	Substitution der Diazoniumgruppe. Sandmeyer-Reaktion	621
6.3	Azofarbstoffe	625
7	Elektrophile Substitutionen an aromatischen Aminen	627
8	Enamine	629
9	Lösung der Aufgaben zu Kapitel XXII	633

Kapitel XXIII

Phenole

1	Einführung und Nomenklatur	637
2	Darstellung von Phenolen	639
3	Reaktionen von Phenolen	642
3.1	Acidität	642
3.2	Reaktionen der phenolischen OH-Gruppe	644
3.3	Claisen-Umlagerung von Allylethern	646
3.4	Elektrophile Substitution am Benzolring von Phenolen	648
3.5	Oxidation von Phenolen. Chinone	652
3.6	Zusammenfassung der Chemie der Phenole	656

XX Inhalt

4 Exkurs: Synthese des Aromastoffs Menthol aus Kresol	657
5 Lösung der Aufgaben zu Kapitel XXIII	660

Kapitel XXIV
Heterocyclische Verbindungen

1 Übersicht	665
2 Furan, Thiophen und Pyrrol	666
2.1 Bindung	666
2.2 Darstellung von Furan-, Thiophen- und Pyrrolverbindungen	667
2.3 Zur Reaktivität von Furan, Thiophen und Pyrrol	670
2.4 Reaktionen des Furans	672
2.5 Reaktionen des Thiophens	673
2.6 Reaktionen des Pyrrols	673
3 Pyridin	675
3.1 Bindung	675
3.2 Gewinnung von Pyridinverbindungen	675
3.3 Reaktionen von Pyridinverbindungen	677
4 Chinolin und Isochinolin	682
5 Benzodiazepine und kombinatorische Synthese	683
6 Exkurs: der Farbstoff Indigo	686
7 Lösung der Aufgaben zu Kapitel XXIV	688

Kapitel XXV
Kohlenhydrate

1 Einteilung der Kohlenhydrate	691
2 Konfiguration von Monosacchariden	691
3 Ring-Ketten-Tautomerie. Mutarotation	696
4 Wichtige Monosaccharide	699
5 Reaktionen von Monosacchariden	700
5.1 Reduktion von Monosacchariden	700
5.2 Oxidation von Monosacchariden	701
5.3 Veresterung von Monosacchariden	702
5.4 Glykosidierung von Monosacchariden	702
6 Disaccharide	704

7 Cyclische Saccharide: Cyclodextrine	706
8 Polysaccharide	706
8.1 Sekundärstruktur und Hydrolyse von Polysacchariden	709
9 Exkurs: Ascorbinsäure aus dem chiralen Reservoir	711
10 Nucleinsäuren	712
11 Lösung der Aufgaben zu Kapitel XXV	716

Kapitel XXVI

Lipide

1 Übersicht	717
2 Fette und Öle	717
2.1 Reaktionen an der Estergruppe	720
2.2 Reaktionen an der ungesättigten Seitenkette. Fetthärtung	721
3 Wachse	722
4 Phospholipide und Zellmembrane	722
5 Exkurs: Nachwachsende Rohstoffe	724

Kapitel XXVII

Aminosäuren, Peptide, Proteine

1 Aminosäuren	727
1.1 Struktur von Aminosäuren	727
1.2 Konfiguration von Aminosäuren	728
1.3 Verwendung von Aminosäuren	731
1.4 Darstellung racemischer Aminosäuren	731
1.5 Darstellung enantiomerenreiner Aminosäuren	734
1.6 Reaktionen von Aminosäuren	737
1.7 Nachweis von Aminosäuren: Ninhydrin-Reaktion	739
2 Peptide	740
2.1 Struktur und Nomenklatur	740
2.2 Bedeutung von Peptiden	742
2.3 Sequenzanalyse von Peptiden	743
2.4 Darstellung von Peptiden in Lösung	745
2.5 Darstellung von Peptiden an fester Phase	751

XXII Inhalt

3	Proteine	753
3.1	Primärstruktur von Proteinen	753
3.2	Sekundärstruktur von Proteinen	754
3.3	Tertiärstruktur von Proteinen	756
3.4	Quartärstruktur von Proteinen	757
3.5	Funktion von Proteinen	758
3.6	Proteine mit Fremdmolekülen	759
4	Lösung der Aufgaben zu Kapitel XXVII	760

Kapitel XXVIII

Weitere Naturstoffe

1	Einteilung der Naturstoffe	763
2	Terpene	764
3	Steroide	769
4	Hormone	770
4.1	Steroidhormone	771
4.2	Amin- und Peptidhormone	773
4.3	Prostaglandinhormone	774
5	Stickstoffheterocyclen	775
5.1	Alkaloide	775
5.2	Porphyrinfarbstoffe	778
6	Antibiotika	781
7	Vitamine	782
8	Lösung der Aufgaben zu Kapitel XXVIII	786

Kapitel XXIX

Synthetische Polymere

1	Einteilung von Polymeren	789
2	Olefinpolymere	790
2.1	Kationische Polymerisation	791
2.2	Anionische Polymerisation	792
2.3	Radikalische Polymerisation	793
2.4	Koordinative Polymerisation	795
3	Diolefinpolymere	796

4 Verwendung von Olefinpolymeren	798
5 Copolymere	799
6 Polymere von Epoxiden	800
7 Polyester und Polyamide	801
7.1 Polyester	801
7.2 Polyamide	802
7.3 Ausgangsverbindungen für Polyester und Polyamide	803
8 Polyurethane	805
9 Phenol-Formaldehyd-Harze	805
10 Harnstoff-Formaldehyd-Harze	807
11 Lösung der Aufgaben zu Kapitel XXIX	808

Kapitel XXX

Pericyclische Reaktionen

1 Definition	811
2 Elektrocyclische Reaktionen	812
2.1 Stereochemie elektrocyclischer Reaktionen	813
2.2 Orbitalsymmetrie und Drehrichtung	814
2.3 Regeln für elektrocyclische Reaktionen	815
3 Synchrone Cycloadditionen	817
3.1 Stereochemie synchroner Cycloadditionen	818
3.2 Orbitalsymmetrie bei Cycloadditionen	820
3.3 Regeln für synchrone Cycloadditionen	822
3.4 Synchrone und stufenweise Cycloadditionen	822
4 Sigmatrope Umlagerungen	823
4.1 Stereochemie sigmatroper Umlagerungen	823
4.2 Orbitalsymmetrie bei Umlagerungen	824
4.3 Regeln für sigmatrope Umlagerungen	827
5 Exkurs: Pericyclische Reaktionen in der Biochemie	827
6 Lösung der Aufgaben zu Kapitel XXX	829
 Sachregister	 831