

Inhaltsverzeichnis

1	Aspekte der Energie- und Rohstoffversorgung	1
1.1	Gegenwärtiger und absehbarer Energiebedarf	2
1.2	Verfügbarkeit einzelner Energieträger	3
1.2.1	Erdöl	3
1.2.2	Erdgas	4
1.2.3	Kohle	5
1.2.4	Kernbrennstoffe	6
1.3	Perspektiven künftiger Energieversorgung	7
1.4	Gegenwärtige und absehbare Rohstoffsituation	9
1.4.1	Petrochemische Primärprodukte	9
1.4.2	Kohleveredlungsprodukte	12
2	Basisprodukte der industriellen Synthese	15
2.1	Synthesegas	15
2.1.1	Synthesegas-Erzeugung	15
2.1.1.1	Synthesegas durch Kohlevergasung	16
2.1.1.2	Synthesegas durch Erdgas- und Erdölspaltung	19
2.1.2	Synthesegas-Reinigung und -Verwendung	21
2.2	Gewinnung der reinen Synthesegas-Komponenten	25
2.2.1	Kohlenmonoxid	25
2.2.2	Wasserstoff	27
2.3	C ₁ -Bausteine	31
2.3.1	Methanol	31
2.3.1.1	Herstellung von Methanol	31
2.3.1.2	Verwendung und Verwendungsmöglichkeiten für Methanol	34
2.3.2	Formaldehyd	40
2.3.2.1	Formaldehyd aus Methanol	41
2.3.2.2	Verwendung und Verwendungsmöglichkeiten für Formaldehyd	43
2.3.3	Ameisensäure	45
2.3.4	Blausäure	49
2.3.5	Methylamine	54
2.3.6	Halogenderivate des Methans	56
3	Olefine	63
3.1	Historische Entwicklung der Olefinchemie	63
3.2	Olefine durch Kohlenwasserstoff-Spaltung	63
3.3	Spezielle Herstellverfahren für Olefine	68

- 3.3.1 Ethylen, Propen 68
- 3.3.2 Butene und Isobuten 72
- 3.3.3 Höhere Olefine 80
- 3.3.3.1 Unverzweigte höhere Olefine 81
- 3.3.3.2 Verzweigte höhere Olefine 90
- 3.4 Olefin-Metathese 93

- 4 Acetylen 99**
- 4.1 Heutige Bedeutung des Acetylens 99
- 4.2 Herstellverfahren für Acetylen 101
- 4.2.1 Calciumcarbid als Basis 101
- 4.2.2 Thermische Verfahren 102
- 4.3 Verwendung von Acetylen 107

- 5 1,3-Diolefine 115**
- 5.1 1,3-Butadien 115
- 5.1.1 Historische Synthesen für 1,3-Butadien 116
- 5.1.2 1,3-Butadien aus C₄-Crackfraktionen 117
- 5.1.3 1,3-Butadien aus C₄-Alkanen und -Alkenen 119
- 5.1.4 Verwendung von 1,3-Butadien 122
- 5.2 Isopren 126
- 5.2.1 Isopren aus C₅-Crackfraktionen 126
- 5.2.2 Isopren durch Aufbaureaktionen 128
- 5.3 Chloropren 131
- 5.4 Cyclopentadien 134

- 6 Synthesen mit Kohlenmonoxid 137**
- 6.1 Hydroformylierung von Olefinen 137
- 6.1.1 Chemische Grundlagen der Hydroformylierung 138
- 6.1.2 Technische Durchführung der Hydroformylierung 141
- 6.1.3 Katalysevarianten der Hydroformylierung 144
- 6.1.4 Verwendung der Oxoprodukte 147
- 6.1.4.1 Oxoalkohole 147
- 6.1.4.2 Oxocarbonsäuren 149
- 6.1.4.3 Aldol- und Kondensationsprodukte der Oxoaldehyde 150
- 6.2 Carbonylierung von Olefinen 152
- 6.3 Carbonsäuresynthese nach Koch 154

- 7 Oxidationsprodukte des Ethylens 157**
- 7.1 Ethylenoxid 157
- 7.1.1 Ethylenoxid nach dem Chlorhydrin-Verfahren 158
- 7.1.2 Ethylenoxid durch Direktoxidation 158
- 7.1.2.1 Chemische Grundlagen 158
- 7.1.2.2 Verfahrensdurchführung 160

- 7.1.2.3 Entwicklungsmöglichkeiten der Ethylenoxid-Herstellung 162
- 7.2 Folgeprodukte des Ethylenoxids 163
- 7.2.1 Ethylenglykol und höhere Ethylenglykole 165
- 7.2.1.1 Entwicklungsmöglichkeiten der Ethylenglykol-Herstellung 166
- 7.2.1.2 Verwendung von Ethylenglykol 168
- 7.2.1.3 Folgeprodukte Glyoxal, Dioxolan, 1,4-Dioxan 169
- 7.2.2 Polyethoxylate 171
- 7.2.3 Ethanolamine und Folgeprodukte 172
- 7.2.4 Ethylenglykolether 176
- 7.2.5 Weitere Folgeprodukte des Ethylenoxids 178
- 7.3 Acetaldehyd 179
- 7.3.1 Acetaldehyd durch Ethylenoxidation 181
- 7.3.1.1 Chemische Grundlagen 181
- 7.3.1.2 Verfahrensdurchführung 182
- 7.3.2 Acetaldehyd aus Ethanol 183
- 7.3.3 Acetaldehyd durch C₃-/C₄-Alkanoxidation 185
- 7.4 Folgeprodukte des Acetaldehyds 185
- 7.4.1 Essigsäure 186
- 7.4.1.1 Essigsäure durch Acetaldehyd-Oxidation 188
- 7.4.1.2 Essigsäure durch Alkan- und Alkenoxidation 189
- 7.4.1.3 Carbonylierung von Methanol zu Essigsäure 192
- 7.4.1.4 Entwicklungsmöglichkeiten der Essigsäure-Herstellung 195
- 7.4.1.5 Verwendung von Essigsäure 197
- 7.4.2 Acetanhydrid und Keten 198
- 7.4.3 Aldolkondensation des Acetaldehyds und Folgeprodukte 202
- 7.4.4 Ethylacetat 206
- 7.4.5 Pyridin und Alkylpyridine 207
- 8 **Alkohole** 211**
- 8.1 Niedere Alkohole 211
- 8.1.1 Ethanol 211
- 8.1.2 Isopropanol 217
- 8.1.3 Butanole 220
- 8.1.4 Amylalkohole 225
- 8.2 Höhere Alkohole 225
- 8.2.1 Oxidation von Paraffinen zu Alkoholen 229
- 8.2.2 Alfolsynthese 230
- 8.3 Mehrwertige Alkohole 232
- 8.3.1 Pentaerythrit 232
- 8.3.2 Trimethylolpropan 233
- 8.3.3 Neopentylglykol 234

- 9 Vinyl-Halogen- und Vinyl-Sauerstoff-Verbindungen 237**
- 9.1 Vinyl-Halogen-Verbindungen 237
 - 9.1.1 Vinylchlorid 237
 - 9.1.1.1 Vinylchlorid aus Acetylen 238
 - 9.1.1.2 Vinylchlorid aus Ethylen 239
 - 9.1.1.3 Entwicklungsmöglichkeiten der Vinylchlorid-Herstellung 243
 - 9.1.1.4 Verwendung von Vinylchlorid und 1,2-Dichlorethan 244
 - 9.1.2 Vinylidenchlorid 245
 - 9.1.3 Vinylfluorid und Vinylidenfluorid 246
 - 9.1.4 Trichlor- und Tetrachlorethylen 248
 - 9.1.5 Tetrafluorethylen 250
 - 9.2 Vinylester und -ether 251
 - 9.2.1 Vinylacetat 251
 - 9.2.1.1 Vinylacetat auf Basis Acetylen oder Acetaldehyd 252
 - 9.2.1.2 Vinylacetat auf Basis Ethylen 253
 - 9.2.1.3 Entwicklungsmöglichkeiten der Vinylacetat-Herstellung 256
 - 9.2.2 Vinylester höherer Carbonsäuren 258
 - 9.2.3 Vinylether 259
- 10 Komponenten für Polyamide 261**
- 10.1 Dicarbonsäuren 263
 - 10.1.1 Adipinsäure 264
 - 10.1.2 1,12-Dodecandisäure 268
 - 10.2 Diamine und Aminocarbonsäuren 269
 - 10.2.1 Hexamethyldiamin 269
 - 10.2.1.1 Herstellung des Adiponitrils 270
 - 10.2.1.2 Hydrierung des Adiponitrils 275
 - 10.2.1.3 Entwicklungsmöglichkeiten der Adiponitril-Herstellung 276
 - 10.2.2 ω -Aminoundecansäure 276
 - 10.3 Lactame 278
 - 10.3.1 ϵ -Caprolactam 278
 - 10.3.1.1 ϵ -Caprolactam nach der Cyclohexanonoxim-Route 278
 - 10.3.1.2 Alternative Herstellverfahren für ϵ -Caprolactam 283
 - 10.3.1.3 Entwicklungsmöglichkeiten der ϵ -Caprolactam-Herstellung 286
 - 10.3.1.4 ϵ -Caprolactam-Verwendung 288
 - 10.3.2 Laurinlactam 290

11	Umsetzungsprodukte des Propens	293
11.1	Oxidationsprodukte des Propens	294
11.1.1	Propylenoxid	294
11.1.1.1	Propylenoxid nach dem Chlorhydrinverfahren	294
11.1.1.2	Indirekte Oxidationsverfahren zu Propylenoxid	295
11.1.1.3	Entwicklungsmöglichkeiten der Propylenoxid-Herstellung	299
11.1.2	Folgeprodukte des Propylenoxids	304
11.1.3	Aceton	306
11.1.3.1	Direktoxidation des Propens	307
11.1.3.2	Aceton aus Isopropanol	308
11.1.4	Folgeprodukte des Acetons	310
11.1.4.1	Acetonaldolisierung und Folgeprodukte	310
11.1.4.2	Methacrylsäure und -ester	312
11.1.5	Acrolein	317
11.1.6	Folgeprodukte des Acroleins	318
11.1.7	Acrylsäure und -ester	321
11.1.7.1	Historische Acrylsäure-Herstellung	321
11.1.7.2	Acrylsäure aus Propen	323
11.1.7.3	Entwicklungsmöglichkeiten der Acrylsäure-Herstellung	325
11.2	Allylverbindungen und Folgeprodukte	326
11.2.1	Allylchlorid	327
11.2.2	Allylalkohol und -ester	330
11.2.3	Glycerin aus Allylvorstufen	332
11.3	Acrylnitril	335
11.3.1	Historische Acrylnitril-Herstellung	336
11.3.2	Ammonoxidation von Propen	338
11.3.2.1	Sohio-Acrylnitril-Verfahren	339
11.3.2.2	Weitere Propen-(Propan-)Ammonoxidations-Verfahren	340
11.3.3	Entwicklungsmöglichkeiten der Acrylnitril-Herstellung	341
11.3.4	Acrylnitril-Verwendung und Folgeprodukte	342
12	Aromaten, Gewinnung und Umwandlung	345
12.1	Bedeutung der Aromaten	345
12.2	Rohstoffquellen für Aromaten	346
12.2.1	Aromaten aus der Steinkohlen-Verkokung	347
12.2.2	Aromaten aus Reformat- und Pyrolysebenzin	348
12.2.2.1	Aromatenisolierung	352
12.2.2.2	Spezielle Trennverfahren für Nichtaromaten/ Aromaten- und Aromatengemische	352
12.2.3	Entwicklungsmöglichkeiten der Aromaten-herstellung	358
12.2.4	Kondensierte Aromaten	360

12.2.4.1	Naphthalin	360
12.2.4.2	Anthracen	362
12.3	Umwandlungsverfahren für Aromaten	365
12.3.1	Hydrodealkylierung	366
12.3.2	<i>m</i> -Xylol-Isomerisierung	367
12.3.3	Disproportionierung, Transalkylierung und Methylierung	370
13	Umsetzungsprodukte des Benzols	373
13.1	Alkylierungs- und Hydrierungsprodukte des Benzols	373
13.1.1	Ethylbenzol	373
13.1.2	Styrol	377
13.1.3	Cumol	380
13.1.4	Höhere Alkylbenzole	382
13.1.5	Cyclohexan	384
13.2	Oxidations- und Folgeprodukte des Benzols	386
13.2.1	Phenol	386
13.2.1.1	Herstellverfahren für Phenol	387
13.2.1.2	Entwicklungsmöglichkeiten der Phenolherstellung	396
13.2.1.3	Phenol-Verwendung und -Folgeprodukte	399
13.2.2	Dihydroxybenzole	403
13.2.3	Maleinsäureanhydrid	407
13.2.3.1	Maleinsäureanhydrid durch Benzoloxidation	408
13.2.3.2	Maleinsäureanhydrid durch Butenoxidation	410
13.2.3.3	Maleinsäureanhydrid durch Butanoxidation	411
13.2.3.4	Maleinsäureanhydrid-Verwendung und -Folgeprodukte	412
13.3	Weitere Benzolderivate	415
13.3.1	Nitrobenzol	415
13.3.2	Anilin	417
13.3.3	Diisocyanate	420
14	Oxidationsprodukte des Xylols und Naphthalins	427
14.1	Phthalsäureanhydrid	427
14.1.1	Naphthalinoxidation zu Phthalsäureanhydrid	427
14.1.2	<i>o</i> -Xylol-Oxidation zu Phthalsäureanhydrid	429
14.1.3	Phthalsäureester	432
14.2	Terephthalsäure	435
14.2.1	Herstellung von Dimethylterephthalat und Terephthalsäure	436
14.2.2	Faserreine Terephthalsäure	438
14.2.3	Weitere Herstellwege für Terephthalsäure und Derivate	441
14.2.4	Verwendung von Terephthalsäure und Dimethylterephthalat	445

15	Anhang	449
15.1	Definitionen für reaktionskennzeichnende Größen	449
15.2	Firmenkurzbezeichnungen	452
15.3	Quellenhinweise	453

Stichwortverzeichnis 471

Verfahrens- und Produktschemata
(Ausschlagtafeln)