

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 Aromatenherstellung 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 *m*-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 *o*-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)	
---	--

