

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort zur 2. Auflage	<i>XIII</i>			
	Vorwort zur 1. Auflage	<i>XV</i>			
	Die Autoren	<i>XVII</i>			
	Enzyklopädien und Nachschlagewerke zur Technischen Chemie	<i>XIX</i>			
	Symbolverzeichnis	<i>XXI</i>			
Teil I	Einführung in die Technische Chemie	1			
	<i>Arno Behr, Ulfert Onken, Regina Palkovits</i>				
1	Chemische Prozesse und chemische Industrie	1			
1.1	Besonderheiten chemischer Prozesse	1			
1.2	Chemie und Umwelt	2			
1.3	Chemiewirtschaft	3			
1.3.1	Einteilung der Chemieprodukte	3			
1.3.2	Chemiefirmen werden Großunternehmen – ein historischer Rückblick	4			
1.3.3	Strukturwandel in der Chemieindustrie	5			
1.4	Struktur von Chemieunternehmen	6			
1.5	Bedeutung von Forschung und Entwicklung für die chemische Industrie	7			
1.5.1	Wissenschaft und chemische Technik	7			
1.5.2	Betriebsinterne Forschung	8			
1.6	Entwicklungstendenzen und Zukunftsaussichten der chemischen Industrie	10			
	<i>Literatur</i>	<i>11</i>			
2	Charakterisierung chemischer Produktionsverfahren	13			
2.1	Laborverfahren und technische Verfahren	13			
2.1.1	Chlorierung von Benzol	13			
2.1.2	Oxychlorierung von Benzol	14			
2.1.3	Herstellung von Azofarbstoffen	14			
2.1.4	Zusammenfassung	15			
2.2	Gliederung chemischer Produktionsverfahren	15			
2.3	Darstellung chemischer Verfahren und Anlagen durch Fließschemata	18			
2.3.1	Grundfließschema	19			
2.3.2	Verfahrensfließschema	21			
2.3.3	Rohrleitungs- und Instrumenten (RI)-Fließschema	21			
2.3.4	Mess- und Regelschema	22			
2.3.5	Spezielle Schemata	22			
	<i>Literatur</i>	<i>22</i>			
3	Katalyse als Schlüsseltechnologie der chemischen Industrie	23			
3.1	Was ist Katalyse?	23			
			3.2	Arten von Katalysatoren	25
			3.2.1	Heterogene Katalyse	25
			3.2.1.1	Grundprinzipien der heterogenen Katalyse	25
			3.2.1.2	Eigenschaften von Feststoffkatalysatoren	26
			3.2.2	Homogene Katalyse	27
			3.2.2.1	Grundprinzipien der homogenen Katalyse	27
			3.2.2.2	Technische Anwendungen homogener Katalysatoren	28
			3.2.3	Biokatalyse	30
			3.2.3.1	Grundprinzipien der Biokatalyse	30
			3.2.3.2	Biotransformationen	31
			3.2.3.3	Biotransformationen zur Herstellung von Wirkstoffen und Feinchemikalien	32
			3.3	Besondere Anwendungsformen in homogener und heterogener Katalyse	35
			3.3.1	Vergleich von homogener und heterogener Katalyse	35
			3.3.2	Heterogenisierung homogener Katalysatoren	35
			3.3.3	Enantioselektive Katalyse	35
			3.3.4	Elektrokatalyse	35
			3.3.5	Photokatalyse	36
				<i>Literatur</i>	<i>36</i>
			Teil II	Chemische Reaktionstechnik	37
				<i>Manfred Baerns, Kai-Olaf Hinrichsen, Hanns Hofmann, Albert Renken</i>	
			4	Grundlagen der Chemischen Reaktionstechnik	37
			4.1	Grundbegriffe und Grundphänomene	38
			4.1.1	Klassifizierung chemischer Reaktionen	38
			4.1.2	Grundbegriffe und Definitionen	38
			4.1.3	Stöchiometrie chemischer Reaktionen	41
			4.1.3.1	Zusammensetzung des Reaktionsgemisches	41
			4.1.3.2	Schlüsselkomponenten und Schlüsselreaktionen	42
			4.1.3.3	Reaktionsfortschritt	45
			4.1.3.4	Zusammenhang zwischen Stöchiometrie und Reaktionskinetik	46
			4.2	Chemische Thermodynamik	48
				<i>Jürgen Grmeling</i>	
			4.2.1	Reaktionsenthalpie	48
			4.2.2	Gleichgewichtsumsatz	49
			4.2.3	Simultangleichgewichte	53
			4.2.3.1	Relaxationsmethode	53
			4.2.3.2	Ermittlung der Gleichgewichtszusammensetzung durch Minimierung der Gibbs'schen Enthalpie	55
			4.3	Stoff- und Wärmetransportvorgänge	56
			4.3.1	Molekulare Transportvorgänge	56
			4.3.1.1	Diffusion	56
			4.3.1.2	Wärmeleitung	59
			4.3.2	Diffusion in porösen Medien	59

- 4.3.2.1 Molekulare Porendiffusion 60
- 4.3.2.2 Knudsen-Diffusion in Poren 60
- 4.3.2.3 Diffusiver Stofftransport im Übergangsbereich von molekularer zu Knudsen-Diffusion 61
- 4.3.2.4 Poiseuille-Strömung in Poren 62
- 4.3.2.5 Sonderfälle der Diffusion in porösen Feststoffen 62
- 4.3.3 Wärmeleitfähigkeit in porösen Feststoffen 64
- 4.3.4 Stoff- und Wärmetransport an Phasengrenzflächen 65
- 4.3.5 Wärmeübergang 66
- 4.3.6 Stoffübergang 69
- Literatur* 71

- 5 Kinetik chemischer Reaktionen 75**
- 5.1 Mikrokinetik chemischer Reaktionen 75
- 5.1.1 Einführung 75
- 5.1.2 Kinetik homogener Gas- und Flüssigkeitsreaktionen 77
- 5.1.3 Kinetik heterogen katalysierter Reaktionen 82
- 5.1.3.1 Katalytische Oberflächenreaktionen 82
- 5.1.3.2 Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von den Gasphasenkonzentrationen 82
- 5.1.3.3 Katalytische Oberflächenreaktion als geschwindigkeitsbestimmender Schritt 83
- 5.1.3.4 Komplexe Vorgänge bei einer einfachen Reaktion 84
- 5.1.4 Kinetik der Desaktivierung heterogener Katalysatoren 87
- 5.1.5 Kinetik von Gas-Feststoff-Reaktionen 88
- 5.1.6 Kinetik homogen und durch gelöste Enzyme katalysierter Reaktionen 88
- 5.1.7 Polymerisationskinetik 89
- 5.1.7.1 Kinetik radikalischer Polymerisationen 89
- 5.1.7.2 Kinetik der ionischen Polymerisation 90
- 5.1.7.3 Polykondensation, Polyaddition 90
- 5.2 Ermittlung der Kinetik chemischer Reaktionen 91
- 5.2.1 Zielsetzungen kinetischer Untersuchungen 91
- 5.2.2 Betriebsweise und Bauart von Laborreaktoren für kinetische Untersuchungen 92
- 5.2.2.1 Allgemeine apparative Gesichtspunkte 96
- 5.2.2.2 Spezielle Laborreaktoren 98
- 5.2.3 Planung und Auswertung kinetischer Messungen zur Ermittlung von Geschwindigkeitsgleichungen 108
- 5.2.3.1 Klassische Methoden 108
- 5.2.3.2 Statistisch begründete Methoden der Versuchsplanung und -auswertung 121
- 5.2.3.3 Versuchsplanung 125
- 5.2.3.4 Auswertesoftware für kinetische Daten 126
- 5.3 Makrokinetik chemischer Reaktionen – Zusammenwirken von chemischer Reaktion und Transportvorgängen 128
- 5.3.1 Heterogen katalysierte Gasreaktionen 128
- 5.3.1.1 Äußere Transportvorgänge 128
- 5.3.1.2 Innere Transportvorgänge und chemische Reaktion 132
- 5.3.1.3 Einfluss der Transportvorgänge auf die Selektivität 141
- 5.3.1.4 Kriterien zur Abschätzung des Einflusses von Stoff- und Wärmetransportvorgängen auf den Reaktionsablauf 145
- 5.3.2 Fluid-Fluid-Reaktionen 145
- 5.3.2.1 Einfluss des Stoffübergangs auf die effektive Reaktionsgeschwindigkeit 146
- 5.3.2.2 Einfluss des Stoffübergangs bei Fluid-Fluid-Reaktionen auf die Selektivität 151
- 5.3.3 Gas-Feststoff-Reaktionen 152
- 5.3.3.1 Nichtporöse Feststoffe 152
- 5.3.3.2 Poröse Feststoffe 157
- Literatur* 157

- 6 Chemische Reaktoren und deren reaktionstechnische Modellierung 161**
- 6.1 Allgemeine Stoff- und Energiebilanzen 161
- 6.2 Absatzweise betriebene Rührkesselreaktoren 162
- 6.2.1 Stoffbilanz 162
- 6.2.2 Wärmebilanz 165
- 6.2.2.1 Adiabate Reaktionsführung 166
- 6.2.2.2 Polytrope Reaktionsführung 167
- 6.3 Halbkontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren 169
- 6.4 Kontinuierlich betriebener idealer Rührkesselreaktor 170
- 6.4.1 Stoffbilanz des kontinuierlich betriebenen Rührkesselreaktors 170
- 6.4.1.1 Volumenbeständige Reaktionen 171
- 6.4.1.2 Nichtvolumenbeständige Reaktionen 172
- 6.4.2 Wärmebilanz des kontinuierlich betriebenen Rührkesselreaktors 173
- 6.5 Ideale Strömungsrohrreaktoren 177
- 6.5.1 Stoffbilanz 177
- 6.5.2 Wärmebilanz 178
- 6.5.2.1 Adiabate Reaktionsführung 178
- 6.5.2.2 Polytrope Reaktionsführung 178
- 6.6 Kombination idealer Reaktoren 180
- 6.6.1 Kaskade kontinuierlich betriebener Rührkesselreaktoren 180
- 6.6.2 Strömungsrohrreaktor mit Rückführung 181
- 6.7 Reale homogene und quasihomogene Reaktoren 183
- 6.7.1 Verweilzeitverteilung in chemischen Reaktoren 184
- 6.7.2 Experimentelle Bestimmung der Verweilzeitverteilung 185
- 6.7.2.1 Sprungfunktion 185
- 6.7.2.2 Pulsfunktion 186
- 6.7.2.3 Beliebige Eingangsfunktion 186

- 6.7.3 Verweilzeitverteilung in idealen Reaktoren 187
- 6.7.3.1 Idealer Strömungsrohrreaktor 187
- 6.7.3.2 Idealer kontinuierlich betriebener Rührkesselreaktor 187
- 6.7.3.3 Reaktorkaskade 188
- 6.7.3.4 Laminar durchströmtes Rohr 188
- 6.7.4 Verweilzeitmodelle realer Reaktoren 189
- 6.7.4.1 Dispersionsmodell 189
- 6.7.4.2 Zellenmodell 192
- 6.7.4.3 Mehrparametrische Modelle 192
- 6.7.5 Verweilzeitverhalten realer Reaktoren 192
- 6.7.5.1 Rührkesselreaktoren 192
- 6.7.5.2 Strömungsrohrreaktoren 193
- 6.7.6 Einfluss der Verweilzeitverteilung und der Vermischung auf die Leistung realer Reaktoren 195
- 6.7.6.1 Reaktionen 1. Ordnung 195
- 6.7.6.2 Reaktionen mit nichtlinearer Kinetik 197
- 6.7.7 Vermischung in realen Reaktoren 198
- 6.7.7.1 Segregation 198
- 6.7.7.2 Zeitpunkt der Vermischung 200
- 6.7.7.3 Einfluss der Segregation auf die Reaktorleistung und Produktverteilung 201
- 6.8 Reale Mehrphasenreaktoren 204
- 6.8.1 Fluid-Feststoff-Systeme 204
- 6.8.1.1 Festbettreaktoren 204
- 6.8.1.2 Wirbelschichtreaktoren 208
- 6.8.2 Fluid-Fluid-Systeme (vgl. Abschnitt 5.3.2) 210
- 6.8.2.1 Blasensäulen-Reaktor 211
- 6.8.2.2 Rührkessel für Fluid-Fluid-Reaktionen 213
- 6.8.2.3 Bodenkolonnen 213
- 6.8.2.4 Füllkörperkolonnen 213
- 6.8.2.5 Strahlwäscher 214
- 6.8.3 Gasförmig-flüssig-fest-Systeme 214
- 6.8.3.1 Mehrphasen-Festbettreaktoren 215
- 6.8.3.2 Dreiphasenblasensäule 216
- 6.8.3.3 Dreiphasen-Wirbelschichtreaktoren 216
- 6.8.3.4 Mehrphasen-Rührkesselreaktoren 216
- 6.8.3.5 Strukturierte Mehrphasenreaktoren 216
- Literatur* 217
- 7 Auswahl und Auslegung chemischer Reaktoren 219**
- 7.1 Reaktorauswahl und reaktionstechnische Optimierung 219
- 7.1.1 Einfache Reaktionen (Umsatzproblem) 219
- 7.1.1.1 Absatzweise betriebener Reaktor (RK) 219
- 7.1.1.2 Kontinuierlich betriebene Reaktoren 220
- 7.1.1.3 Temperaturführung 223
- 7.1.1.4 Isotherme Reaktionsführung 225
- 7.1.1.5 Adiabate Reaktionsführung 225
- 7.1.1.6 Adiabater Abschnittsreaktor 227
- 7.1.2 Komplexe Reaktionen (Ausbeuteproblem) 228
- 7.1.2.1 Parallelreaktionen 229
- 7.1.2.2 Folgereaktionen 231
- 7.1.2.3 Konkurrierende Folgereaktionen 232
- 7.1.2.4 Polymerisationsreaktionen 234
- 7.1.2.5 Temperaturführung 236
- 7.2 Thermische Prozesssicherheit 237
- 7.2.1 Theorie der Wärmeexplosion 237
- 7.2.2 Parametrische Sensitivität 240
- 7.2.3 Halbkontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren 242
- 7.2.4 Kontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren 243
- 7.2.5 Strömungsrohrreaktoren 243
- 7.3 Mikrostrukturierte Reaktoren 243
- 7.3.1 Homogene Reaktionen 244
- 7.3.1.1 Mikrofluidik 244
- 7.3.1.2 Verweilzeitverteilung 244
- 7.3.1.3 Mikrovermischung 246
- 7.3.1.4 Wärmeübergang 247
- 7.3.2 Feststoffkatalysierte Fluidreaktionen 250
- 7.3.2.1 Innerer Stofftransport 251
- 7.3.2.2 Äußerer Stofftransport 251
- 7.3.2.3 Temperaturkontrolle 252
- 7.3.3 Fluid-Fluid-Reaktionen 252
- Literatur* 253
- Teil III Grundoperationen 255**
Jürgen Gruehling, Axel Brehm
- 8 Thermodynamische Grundlagen für die Berechnung von Phasengleichgewichten 255**
- 8.1 Phasengleichgewichtsbeziehung 257
- 8.2 Dampf-Flüssig-Gleichgewicht 257
- 8.2.1 Anwendung von Zustandsgleichungen 258
- 8.2.2 Virialgleichung 260
- 8.2.3 Chemische Theorie 262
- 8.2.4 Anwendung von Aktivitätskoeffizienten-Modellen 262
- 8.2.5 Aktivitätskoeffizienten-Modelle 264
- 8.3 Vorausberechnung von Phasengleichgewichten 267
- 8.4 Konzentrationsabhängigkeit des Trennfaktors binärer Systeme 269
- 8.4.1 Bedingung für das Auftreten azeotroper Punkte 271
- 8.4.2 Rückstandslinien, Grenzdestillationslinien und Destillationsfelder 272
- 8.5 Flüssig-Flüssig-Gleichgewicht 275
- 8.6 Gaslöslichkeit 278
- 8.7 Fest-Flüssig-Gleichgewicht 280
- 8.8 Phasengleichgewicht für die überkritische Extraktion 284
- 8.9 Adsorptionsgleichgewichte 285
- 8.10 Osmotischer Druck 287
- Literatur* 289

- 9 Auslegung thermischer Trennverfahren 291**
- 9.1 Konzept der idealen Trennstufe 291
 - 9.2 Realisierung mehrerer Trennstufen 291
 - 9.3 Kontinuierliche Rektifikation 291
 - 9.3.1 Rektifikationskolonne 292
 - 9.3.2 Ermittlung der Zahl theoretischer Trennstufen 294
 - 9.3.2.1 Binäre Systeme 295
 - 9.3.2.2 Mehrkomponentensysteme 302
 - 9.3.3 Konzept der Übertragungseinheit 315
 - 9.4 Trennung azeotroper und eng siedender Systeme 316
 - 9.4.1 Rektifikative Trennung azeotroper und engsiedender Systeme ohne Zusatzstoff 317
 - 9.4.1.1 Trennung durch Rektifikation im Vakuum oder bei erhöhtem Druck 317
 - 9.4.1.2 Trennung binärer heteroazeotroper Systeme 319
 - 9.4.1.3 Zweidruckverfahren 320
 - 9.4.2 Rektifikation mit Hilfsstoffen 320
 - 9.4.2.1 Extraktive Rektifikation 320
 - 9.4.2.2 Azeotrope Rektifikation 323
 - 9.4.3 Wasserdampfdestillation 325
 - 9.5 Reaktive Rektifikation 325
 - 9.6 Zahl der Kolonnen und mögliche Trennsequenzen 327
 - 9.6.1 Energieeinsparung 328
 - 9.7 Diskontinuierliche Rektifikation 330
 - 9.7.1 Einfache diskontinuierliche Destillation 330
 - 9.7.2 Mehrstufige diskontinuierliche Rektifikation 331
 - 9.8 Auslegung von Rektifikationskolonnen 333
 - 9.8.1 Bodenkolonnen 333
 - 9.8.2 Packungskolonnen 335
 - 9.8.3 Wärmetauscher 341
 - 9.8.3.1 Verdampfer 341
 - 9.8.3.2 Kondensatoren 341
 - 9.9 Absorption 341
 - 9.9.1 Lösemittelauswahl 343
 - 9.9.2 McCabe-Thiele-Verfahren 344
 - 9.9.3 Kremser-Gleichung 346
 - 9.9.4 Chemische Absorption 348
 - 9.9.5 Absorberbauarten 349
 - 9.10 Flüssig-Flüssig-Extraktion 349
 - 9.10.1 Auswahl des Extraktionsmittels 351
 - 9.10.2 McCabe-Thiele-Verfahren 351
 - 9.10.2.1 Kremser-Gleichung 353
 - 9.10.3 Anwendung von Dreiecksdiagrammen 353
 - 9.10.4 Extraktoren 356
 - 9.10.4.1 Mixer-Settler 356
 - 9.10.4.2 Extraktionskolonnen 357
 - 9.10.4.3 Zentrifugalextraktoren 358
 - 9.11 Fest-Flüssig-Extraktion 358
 - 9.12 Extraktion mit überkritischen Fluiden 359
 - 9.13 Kristallisation 360
 - 9.13.1 Kristallisationsprozess 360
 - 9.13.2 Kristallisatoren 362
 - 9.14 Adsorption 363
 - 9.14.1 Adsorptionsmittel 364
 - 9.14.2 Adsorptions- und Desorptionsschritt 365
 - 9.14.3 Adsorberbauarten 366
 - 9.15 Entfernung der Restfeuchten, Entwässern und Trocknen 368
 - 9.15.1 Trocknungsgüter und Trocknungsarten 368
 - 9.15.2 Kriterien zur Auslegung von Trocknern 369
 - 9.15.3 Apparate zum technischen Trocknen 370
 - 9.15.3.1 Konvektionstrockner 370
 - 9.15.3.2 Kontaktrockner 371
 - 9.16 Membrantrennverfahren 371
 - 9.16.1 Trennprinzip und Arbeitsweise 371
 - 9.16.2 Arten von Membrantrennverfahren 373
 - 9.16.3 Membranmodule 375
- 10 Mechanische Grundoperationen 379**
- 10.1 Strömungslehre – Fluidodynamik in Reaktoren, Kolonnen und Rohrleitungen 379
 - 10.1.1 Strömungsarten, Reynoldssche Ähnlichkeit 379
 - 10.1.2 Strömungsgesetze 380
 - 10.1.2.1 Strömung „idealer Fluide“ 380
 - 10.1.2.2 Auftreten von Reibungskräften (Strömen von Flüssigkeiten) 380
 - 10.1.3 Strömungsbedingter Druckverlust 382
 - 10.1.3.1 Ungestörte Strömung – Durchströmen eines geraden Rohrs 382
 - 10.1.3.2 Gestörte Strömung – Auftreten örtlicher Druckverluste 383
 - 10.2 Erzeugen von Förderströmen – Pumpen, Komprimieren, Evakuieren 384
 - 10.2.1 Pumpencharakteristika und Pumpenwirkungsgrade 385
 - 10.2.2 Pumpen – Apparate zum Fördern von Flüssigkeiten 386
 - 10.2.2.1 Arbeitsweise von Hubkolbenpumpen 386
 - 10.2.2.2 Arbeitsweise von Kreiselpumpen 387
 - 10.2.2.3 Arbeitsweise von Umlaufkolbenpumpen 388
 - 10.2.3 Verdichten von Gasen 388
 - 10.2.3.1 Druck-Volumen-Diagramm, ein- und mehrstufiges Verdichten 389
 - 10.2.3.2 Bauarten von Kompressoren (Verdichtern) 391
 - 10.2.3.3 Einsatzbereiche von Kompressoren 392
 - 10.2.4 Vakuumerzeugung 393
 - 10.3 Mischen fluider Phasen 394
 - 10.3.1 Mischen in flüssiger Phase 394
 - 10.3.1.1 Aufbau von Rührbehältern; Rührorgane und ihre Förderwirkung 395
 - 10.3.1.2 Ermittlung des Leistungsbedarfs für das Homogenisieren durch Rühren 397
 - 10.3.1.3 Begasen von Flüssigkeiten, Emulgieren und Suspensieren 399

- 10.3.2 Flüssigkeitsverteilung in der Gasphase 401
- 10.3.2.1 Kriterien der Flüssigkeitsverteilung 401
- 10.3.2.2 Einflussgrößen und Auswahlkriterien beim Zerstäuben 402
- 10.4 Mechanische Trennverfahren 404
- 10.4.1 Partikelabtrennung aus Flüssigkeiten 404
- 10.4.1.1 Sedimentieren und Zentrifugieren 405
- 10.4.1.2 Filtern 408
- 10.4.2 Partikelabscheidung aus Gasströmen 413
- 10.4.2.1 Ausnutzung der Schwer- und der Zentrifugalkraft 413
- 10.4.2.2 Filterelemente, Elektrofilter, Nassentstaubung 413
- 10.4.3 Trennen weiterer disperser Systeme 415
- 10.4.3.1 Emulsionstrennen 415
- 10.4.3.2 Schaumbrechen und Schaumverhindern 416
- 10.5 Verarbeiten von Feststoffen 417
- 10.5.1 Zerkleinern von Feststoffen 417
- 10.5.1.1 Grundlagen des Zerkleinerns 417
- 10.5.1.2 Energiebedarf beim Zerkleinern 418
- 10.5.1.3 Zerkleinerungsapparate 420
- 10.5.2 Klassieren und Sortieren 422
- 10.5.2.1 Auftrennen des Mahlguts nach Kornklassen (Klassieren) 422
- 10.5.2.2 Auftrennen des Mahlguts unter Ausnutzung von Teilcheneigenschaften (Sortieren) 424
- 10.5.3 Formgebung 426
- Literatur* 428
- Teil IV Verfahrensentwicklung 429**
Arno Behr, Ulfert Onken, Regina Palkovits
- 11 Gesichtspunkte der Verfahrensauswahl 429**
- 11.1 Das Konzept der Nachhaltigkeit 429
- 11.2 Stoffliche Gesichtspunkte (Rohstoffauswahl und Syntheseroute) 431
- 11.2.1 Nachhaltigkeit am Beispiel des Phenols – sieben technische Synthesewege 431
- 11.2.1.1 Alkalischemelze von Natriumbenzolsulfonat 431
- 11.2.1.2 Wasserdampfhydrolyse von Chlorbenzol (Raschig-Hooker-Verfahren) 432
- 11.2.1.3 Alkalische Hydrolyse von Chlorbenzol 432
- 11.2.1.4 Cumolverfahren (Hock-Verfahren) 433
- 11.2.1.5 Toluoloxidation 434
- 11.2.1.6 Dehydrierung von Cyclohexanol/Cyclohexanon 434
- 11.2.1.7 Benzolhydroxylierung mit Distickstoffmonoxid 434
- 11.2.1.8 Phenol aus nachwachsenden Rohstoffen 434
- 11.2.1.9 Vergleich der Phenolverfahren 434
- 11.2.2 Zusammenfassung 435
- 11.3 Energieaufwand 436
- 11.3.1 Energiearten und Energienutzung 436
- 11.3.2 Wasserstoff 436
- 11.3.2.1 Wasserstofferzeugung aus fossilen Rohstoffen 437
- 11.3.2.2 Wasserstofferzeugung durch Wasserelektrolyse 439
- 11.3.2.3 Vergleich: Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen oder durch Wasserelektrolyse 439
- 11.3.2.4 Wasserstoff als Energieträger und Energiespeicher 440
- 11.3.2.5 Direktverstromung von Wasserstoff 440
- 11.4 Sicherheit 441
- 11.4.1 Exotherme Reaktionen 441
- 11.4.1.1 Ausfall der Kühlung am Beispiel der Blockpolymerisation von Styrol 441
- 11.4.1.2 Explosion eines Ethylenoxidbehälters als Beispiel einer Wärmeexplosion 442
- 11.4.1.3 Exotherme Sekundärreaktionen 443
- 11.4.2 Brennbare und explosive Stoffe und Stoffgemische 443
- 11.4.2.1 Explosionen 443
- 11.4.2.2 Explosionsbereich 444
- 11.4.2.3 Organische Peroxide 445
- 11.4.2.4 Maßnahmen zur Verhinderung von Explosionen 445
- 11.4.3 Toxische Stoffe 445
- 11.4.4 Zusammenfassung und Folgerungen 446
- 11.5 Umweltschutz im Sinne der Nachhaltigkeit 446
- 11.5.1 Luftverunreinigungen 447
- 11.5.2 Abwasserbelastungen 449
- 11.5.2.1 Alternativen zum Chlorhydrinverfahrens zur Herstellung von Ethylenoxid und Propylenoxid 450
- 11.5.2.2 Abwasserreinigung 451
- 11.5.3 Abfälle 454
- 11.5.4 Zusammenfassung und Folgerungen 456
- 11.6 Betriebsweise 456
- 11.6.1 Beispiel: Hydrierung von Doppelbindungen 456
- 11.6.1.1 Hydrierung im Suspensionsreaktor 457
- 11.6.1.2 Hydrierung im Rieselbettreaktor 457
- 11.6.2 Unterschiede zwischen diskontinuierlichen und kontinuierlichen Verfahren 458
- 11.6.3 Entscheidungskriterien 460
- Literatur* 461
- 12 Verfahrensgrundlagen 463**
- 12.1 Ausgangssituation und Ablauf 463
- 12.2 Verfahrensinformationen 464
- 12.2.1 Übersicht 464
- 12.2.2 Sicherheitstechnische Kenndaten 465
- 12.2.3 Toxikologische Daten 467
- 12.3 Stoff- und Energiebilanzen 469
- 12.3.1 Stoff- und Energiebilanzen – Werkzeug in Verfahrensentwicklung und Anlagenprojektierung 469
- 12.3.2 Stoffbilanzen 469
- 12.3.3 Energiebilanzen 474

12.4	Versuchsanlagen 474	15.2.2	Förderung und Transport 525
12.4.1	Notwendigkeit und Aufgaben 474	15.2.3	Weiterverarbeitung 526
12.4.2	Typen von Versuchsanlagen 475	15.3	Kohle 527
12.4.3	Planung einer Versuchsanlage 476	15.3.1	Zusammensetzung und Klassifizierung 527
12.5	Auswertung und Optimierung 476	15.3.2	Vorkommen 528
12.5.1	Versuchsplanung und Auswertung 477	15.3.3	Förderung 528
12.5.2	Prozess-Simulation und Prozessoptimierung 477	15.3.4	Verarbeitung 529
	<i>Literatur</i> 478	15.3.4.1	Verkokung 529
13	Wirtschaftlichkeit von Verfahren und Produktionsanlagen 481	15.3.4.2	Kohlevergasung 532
13.1	Erlöse, Kosten und Gewinn 481	15.3.4.3	Kohlehydrierung 535
13.2	Herstellkosten 482	15.4	Nachwachsende Rohstoffe 536
13.2.1	Vorkalkulation und Nachkalkulation 482	15.4.1	Bedeutung der nachwachsenden Rohstoffe 536
13.2.2	Ermittlung des Kapitalbedarfs 482	15.4.2	Fette und Öle 537
13.2.3	Ermittlung der Herstellkosten 485	15.4.3	Kohlenhydrate 542
13.3	Kapazitätsauslastung und Wirtschaftlichkeit 487	15.4.3.1	Cellulose 542
13.3.1	Erlöse und Gewinn 487	15.4.3.2	Stärke 547
13.3.2	Fixe Kosten und veränderliche Kosten 488	15.4.3.3	Zucker 547
13.3.3	Gewinn bzw. Verlust in Abhängigkeit von der Kapazitätsauslastung 489	15.4.4	Pflanzliche Sekrete und Extrakte 548
13.4	Wirtschaftlichkeit von Projekten 490		<i>Literatur</i> 549
13.4.1	Rentabilität als Maß für die Wirtschaftlichkeit 490	16	Organische Grundchemikalien 551
13.4.2	Kapitalrückflusszeit 491	16.1	Alkane 551
13.4.3	Andere Methoden der Rentabilitätsbewertung 491	16.1.1	Herstellung 551
13.4.4	Entscheidung zwischen Alternativen 492	16.1.1.1	Methan 551
	<i>Literatur</i> 494	16.1.1.2	Höhere <i>n</i> - und iso-Alkane 552
14	Planung und Bau von Anlagen 497	16.1.1.3	Cycloalkane 552
14.1	Projektablauf 497	16.1.2	Verwendung 552
14.2	Projektorganisation 498	16.1.2.1	Methan 552
14.3	Genehmigungsverfahren für Chemieanlagen 500	16.1.2.2	Höhere <i>n</i> -Alkane 553
14.4	Anlagenplanung 500	16.1.2.3	Cycloalkane 554
14.5	Projektabwicklung 503	16.2	Alkene 555
14.5.1	Ablaufplanung und -überwachung 503	16.2.1	Herstellung 555
14.5.2	Bau und Montage 505	16.2.2	Verwendung 562
	<i>Literatur</i> 507	16.3	Aromaten 564
Teil V	Chemische Prozesse 509	16.3.1	Herstellung 564
	<i>Arno Behr, Ulfert Onken</i>	16.3.2	Verwendung 567
15	Organische Rohstoffe 509	16.4	Acetylen 570
15.1	Erdöl 509	16.4.1	Herstellung 570
15.1.1	Zusammensetzung und Klassifizierung 509	16.4.1.1	Acetylen aus Kohle 571
15.1.2	Bildung und Vorkommen 510	16.4.1.2	Acetylen aus Kohlenwasserstoffen 571
15.1.3	Förderung und Transport 511	16.4.2	Verwendung 572
15.1.4	Erdölraffinerien 515	16.5	Synthesegas 573
15.1.5	Thermische Konversionsverfahren 519	16.5.1	Herstellung 573
15.1.6	Katalytische Konversionsverfahren 520	16.5.1.1	Steamreforming 573
15.2	Erdgas 525	16.5.1.2	Partielle Oxidation 575
15.2.1	Zusammensetzung und Klassifizierung 525	16.5.2	Verwendung 576
		16.5.3	Kohlenmonoxid 577
			<i>Literatur</i> 578
		17	Organische Zwischenprodukte 581
		17.1	Sauerstoffhaltige Verbindungen 581
		17.1.1	Alkohole 581
		17.1.1.1	Methanol 581
		17.1.1.2	Ethanol 585
		17.1.1.3	Propanole 588

- 17.1.1.4 Butanole 588
- 17.1.1.5 Längerkettige Alkohole 588
- 17.1.1.6 Cyclische Alkohole 588
- 17.1.1.7 Ungesättigte Alkohole 589
- 17.1.1.8 Mehrwertige Alkohole 589
- 17.1.2 Phenole 591
- 17.1.3 Ether 591
- 17.1.3.1 Aliphatische Ether 591
- 17.1.3.2 Cyclische Ether 591
- 17.1.4 Epoxide 592
- 17.1.4.1 Ethylenoxid 592
- 17.1.4.2 Propylenoxid 593
- 17.1.5 Aldehyde 594
- 17.1.5.1 Formaldehyd (Methanal) 594
- 17.1.5.2 Acetaldehyd (Ethanal) 595
- 17.1.5.3 Butyraldehyde (Butanale) 596
- 17.1.5.4 Ungesättigte Aldehyde 598
- 17.1.6 Ketone 599
- 17.1.6.1 Aceton und Methylisobutylketon 599
- 17.1.6.2 Methylethylketon 599
- 17.1.7 Carbonsäuren 599
- 17.1.7.1 Ameisensäure 599
- 17.1.7.2 Essigsäure 600
- 17.1.7.3 Ungesättigte Carbonsäuren 602
- 17.1.7.4 Aliphatische Dicarbonsäuren 603
- 17.1.7.5 Aromatische Carbonsäuren 603
- 17.2 Stickstoffhaltige Verbindungen 606
- 17.2.1 Amine 606
- 17.2.1.1 Niedere Amine 606
- 17.2.1.2 Fettamine 606
- 17.2.1.3 Diamine 607
- 17.2.1.4 Cyclische Amine 607
- 17.2.1.5 Aromatische Nitroverbindungen und Amine 607
- 17.2.2 Lactame 608
- 17.2.3 Nitrile 608
- 17.2.3.1 Acrylnitril 608
- 17.2.3.2 Adipodinitril 610
- 17.2.4 Isocyanate 611
- 17.2.4.1 Aliphatische Isocyanate 611
- 17.2.4.2 Aromatische Isocyanate 611
- 17.3 Halogenhaltige Verbindungen 612
- 17.3.1 Chlormethane 612
- 17.3.2 Chlorderivate höherer Aliphaten 613
- 17.3.3 Chloraromaten 615
- 17.3.4 Fluorverbindungen 616
- Literatur* 618
- 18 Anorganische Grund- und Massenprodukte 621**
- 18.1 Anorganische Schwefelverbindungen 621
- 18.1.1 Schwefel und Sulfide 621
- 18.1.2 Schwefeldioxid 621
- 18.1.3 Schwefeltrioxid und Schwefelsäure 622
- 18.2 Anorganische Stickstoffverbindungen 622
- 18.2.1 Ammoniak 622
- 18.2.2 Salpetersäure 626
- 18.2.3 Harnstoff und Melamin 627
- 18.3 Chlor und Alkalien 627
- 18.3.1 Chlor und Alkalilauge durch Alkalichlorid-elektrolyse 627
- 18.3.2 Natronlauge und Soda 629
- 18.4 Phosphorverbindungen 630
- 18.4.1 Elementarer Phosphor 630
- 18.4.2 Phosphorsäure und Phosphate 631
- 18.5 Technische Gase 632
- 18.5.1 Sauerstoff und Stickstoff 632
- 18.5.2 Edelgase 633
- 18.5.3 Kohlendioxid 634
- 18.6 Düngemittel 634
- 18.6.1 Bedeutung der Düngemittel 634
- 18.6.2 Stickstoffdüngemittel 635
- 18.6.3 Phosphordüngemittel 635
- 18.6.4 Kalidüngemittel 636
- 18.6.5 Mehrnährstoffdünger 636
- 18.6.6 Wirtschaftliche Betrachtung 636
- 18.7 Metalle 636
- 18.7.1 Stähle 636
- 18.7.2 Nichteisenmetalle und ihre Legierungen 637
- 18.7.3 Korrosion und Korrosionsschutz 637
- Literatur* 638
- 19 Chemische Endprodukte 641**
- 19.1 Polymere 641
- 19.1.1 Aufbau und Synthese von Polymeren 641
- 19.1.1.1 Stufenreaktionen 642
- 19.1.1.2 Kettenreaktionen 642
- 19.1.2 Polymerisationstechnik 645
- 19.1.3 Massenkunststoffe 648
- 19.1.4 Fasern 653
- 19.1.5 Klebstoffe 653
- 19.1.6 Hochtemperaturfeste Kunststoffe 654
- 19.1.7 Elektrisch leitfähige Polymere 654
- 19.1.8 Flüssigkristalline Polymere 655
- 19.1.9 Biologisch abbaubare Polymere 655
- 19.2 Tenside und Waschmittel 655
- 19.2.1 Aufbau und Eigenschaften 655
- 19.2.2 Anionische Tenside 656
- 19.2.3 Kationische Tenside 658
- 19.2.4 Nichtionische Tenside 658
- 19.2.5 Amphotere Tenside 661
- 19.2.6 Vergleich der Tensidklassen 661
- 19.2.7 Anwendungsgebiete 661
- 19.3 Farbstoffe 666
- 19.3.1 Übersicht 666
- 19.3.2 Azofarbstoffe 667
- 19.3.3 Carbonylfarbstoffe 668
- 19.3.4 Methinfarbstoffe 669
- 19.3.5 Phthalocyanine 669
- 19.3.6 Färbvorgänge 670
- 19.4 Pharmaka 672

- 19.4.1 Allgemeines 672
- 19.4.2 Arten pharmazeutischer Produkte 672
- 19.4.3 Wirkstoffherstellung durch chemische Synthese 676
- 19.4.4 Wirkstoffherstellung mit Biokatalysatoren 676
- 19.4.5 Wirkstoffherstellung durch Fermentationsverfahren 678
- 19.4.6 Sonstige Verfahren zur Wirkstoffherstellung 681
- 19.5 Pflanzenschutzmittel 681
- 19.5.1 Bedeutung des Pflanzenschutzes 681
- 19.5.2 Insektizide 681
- 19.5.3 Herbizide 683
- 19.5.4 Fungizide 684
- 19.5.5 Marktdaten und Entwicklungstrends 685
- 19.6 Metallorganische Verbindungen 685
- 19.7 Silicone 687
- 19.7.1 Struktur und Eigenschaften 687
- 19.7.2 Herstellung der Ausgangsverbindungen 688
- 19.7.3 Herstellung der Silicone 689
- 19.7.4 Technische Siliconerzeugnisse 691
- 19.8 Zeolithe 692
- Literatur* 693

- Anhang 1 Größen zur Charakterisierung von Reaktionen, Verfahren und Anlagen 697**

- Anhang 2 Tabellen zu Reinstoffdaten 699**

- Anhang 3 Graphische Symbole für Fließschemata nach EN ISO 10 628 703**

- Stichwortverzeichnis 709**