

*Manfred Baerns, Arno Behr, Axel Brehm,
Jürgen Gmehling, Hanns Hofmann, Ulfert Onken
und Albert Renken*

Technische Chemie



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Inhaltsverzeichnis

<p>Vorwort XIII</p> <p>Die Autoren XV</p> <p>Enzyklopädien und Nachschlagewerke zur Technischen Chemie XVII</p> <p>Symbolverzeichnis XIX</p> <p>Teil I Einführung in die Technische Chemie 1 <i>Arno Behr, Ulfert Onken</i></p> <p>1 Chemische Prozesse und chemische Industrie 1</p> <p>1.1 Besonderheiten chemischer Prozesse 1</p> <p>1.2 Chemie und Umwelt 2</p> <p>1.3 Chemiewirtschaft 3</p> <p>1.3.1 Einteilung der Chemieprodukte 3</p> <p>1.3.2 Chemiefirmen werden Großunternehmen – ein historischer Rückblick 4</p> <p>1.3.3 Strukturwandel in der Chemieindustrie 5</p> <p>1.4 Struktur von Chemieunternehmen 6</p> <p>1.5 Bedeutung von Forschung und Entwicklung für die chemische Industrie 7</p> <p>1.5.1 Wissenschaft und chemische Technik 7</p> <p>1.5.2 Betriebsinterne Forschung 8</p> <p>1.6 Entwicklungstendenzen und Zukunftsaussichten der chemischen Industrie 10 <i>Literatur</i> 11</p> <p>2 Charakterisierung chemischer Produktionsverfahren 13</p> <p>2.1 Laborverfahren und technische Verfahren 13</p> <p>2.1.1 Chlorierung von Benzol 13</p> <p>2.1.2 Oxychlorierung von Benzol 14</p> <p>2.1.3 Herstellung von Azofarbstoffen 14</p> <p>2.1.4 Zusammenfassung 15</p> <p>2.2 Gliederung chemischer Produktionsverfahren 15</p> <p>2.3 Darstellung chemischer Verfahren und Anlagen durch Fließschemata 18</p> <p>2.3.1 Grundfließschema 19</p> <p>2.3.2 Verfahrenfließschema 19</p> <p>2.3.3 Rohrleitungs- und Instrumenten (RI)-Fließschema 19</p> <p>2.3.4 Mess- und Regelschema 21</p> <p>2.3.5 Spezielle Schemata 21 <i>Literatur</i> 22</p>	<p>Teil II Chemische Reaktionstechnik 23</p> <p>Einführung 23</p> <p>3 Grundlagen der Chemischen Reaktionstechnik 23 <i>Manfred Baerns, Hanns Hofmann</i></p> <p>3.1 Grundbegriffe und Grundphänomene 23</p> <p>3.1.1 Klassifizierung chemischer Reaktionen 24</p> <p>3.1.2 Grundbegriffe und Definitionen 24</p> <p>3.1.3 Stöchiometrie chemischer Reaktionen 26</p> <p>3.1.3.1 Zusammensetzung des Reaktionsgemisches 26</p> <p>3.1.3.2 Schlüsselkomponenten und Schlüsselreaktionen 27</p> <p>3.1.3.3 Reaktionsfortschritt 30</p> <p>3.1.3.4 Zusammenhang zwischen Stöchiometrie und Reaktionskinetik 31</p> <p>3.2 Chemische Thermodynamik 33</p> <p>3.2.1 Reaktionsenthalpie 33</p> <p>3.2.2 Gleichgewichtsumsatz 35</p> <p>3.2.3 Simultangleichgewichte 38</p> <p>3.2.3.1 Relaxationsmethode 38</p> <p>3.2.3.2 Ermittlung der Gleichgewichtszusammensetzung durch Minimierung der Gibbs'schen Enthalpie 40</p> <p>3.3 Stoff- und Wärmetransportvorgänge 41</p> <p>3.3.1 Molekulare Transportvorgänge 41</p> <p>3.3.1.1 Diffusion 41</p> <p>3.3.1.2 Wärmeleitung 44</p> <p>3.3.2 Diffusion in porösen Medien 44</p> <p>3.3.2.1 Molekulare Porendiffusion 45</p> <p>3.3.2.2 Knudsen-Diffusion in Poren 45</p> <p>3.3.2.3 Diffusiver Stofftransport im Übergangsbereich von molekularer zu Knudsen-Diffusion 46</p> <p>3.3.2.4 Poiseuille-Strömung in Poren 47</p> <p>3.3.2.5 Sonderfälle der Diffusion in porösen Feststoffen 47</p> <p>3.3.3 Wärmeleitfähigkeit in porösen Feststoffen 48</p> <p>3.3.4 Stoff- und Wärmetransport an Phasengrenzflächen 49</p> <p>3.3.5 Wärmeübergang 51</p> <p>3.3.6 Stoffübergang 54 <i>Literatur</i> 56</p> <p>4 Kinetik chemischer Reaktionen 59</p> <p>4.1 Mikrokinetik chemischer Reaktionen 59</p> <p>4.1.1 Einführung 59</p> <p>4.1.2 Kinetik homogener Gas- und Flüssigkeitsreaktionen 61</p> <p>4.1.3 Kinetik heterogen katalysierter Reaktionen 65</p> <p>4.1.3.1 Katalytische Oberflächenreaktionen 65</p> <p>4.1.3.2 Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von den Gasphasenkonzentrationen 66</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

- 4.1.3.3 Katalytische Oberflächenreaktion als geschwindigkeitsbestimmender Schritt 66
 - 4.1.3.4 Komplexe Vorgänge bei einer einfachen Reaktion 67
 - 4.1.4 Kinetik der Desaktivierung heterogener Katalysatoren 70
 - 4.1.5 Kinetik von Gas-Feststoff-Reaktionen 71
 - 4.1.6 Kinetik homogen und durch gelöste Enzyme katalysierter Reaktionen 71
Literatur 72
 - 4.2 Ermittlung der Kinetik chemischer Reaktionen 73
 - 4.2.1 Zielsetzungen kinetischer Untersuchungen 73
 - 4.2.2 Betriebsweise und Bauart von Laborreaktoren für kinetische Untersuchungen 74
 - 4.2.2.1 Allgemeine apparative Gesichtspunkte 77
 - 4.2.2.2 Spezielle Laborreaktoren 79
 - 4.2.2.2.1 Laborreaktoren für homogene Reaktionen 79
 - 4.2.2.2.2 Laborreaktoren für heterogen katalysierte Gasreaktionen 80
 - 4.2.2.2.3 Laborreaktoren für Gas-Feststoff-Reaktionen 83
 - 4.2.2.2.4 Laborreaktoren für Gas-Flüssigkeit-Reaktionen 84
 - 4.2.2.2.5 Kalorimetrie 87
 - 4.2.3 Planung und Auswertung kinetischer Messungen zur Ermittlung von Geschwindigkeitsgleichungen 89
 - 4.2.3.1 Klassische Methoden 90
 - 4.2.3.1.1 Einfache Reaktionen 90
 - 4.2.3.1.2 Komplexe Reaktionen 97
 - 4.2.3.2 Statistisch begründete Methoden der Versuchsplanung und Auswertung 101
 - 4.2.3.2.1 Lineare Regression 102
 - 4.2.3.2.2 Normalgleichungen und Standardnormalgleichungen 103
 - 4.2.3.2.3 Beurteilung einer Regression 105
 - 4.2.3.2.4 Grenzen der „multiplen linearen Regression“ 106
 - 4.2.3.3 Versuchspläne für die lineare Regression 108
 - 4.2.3.3.1 Grundsätzliches zur Aufstellung von Versuchsplänen 108
 - 4.2.3.3.2 Ausgewählte Versuchspläne für lineare Regressionen 109
 - 4.2.3.3.3 Faktorielle Versuchspläne 109
 - 4.2.3.4 Auswertungssoftware für kinetische Daten 113
Literatur 114
 - 4.3 Makrokinetik chemischer Reaktionen – Zusammenwirken von chemischer Reaktion und Transportvorgängen 116
 - 4.3.1 Heterogen katalysierte Gasreaktionen 116
 - 4.3.1.1 Äußere Transportvorgänge 116
 - 4.3.1.1.1 Stoffübergang und katalytische Reaktion 116
 - 4.3.1.1.2 Stoff- und Wärmeübergang beim Ablauf einer heterogen katalysierten Reaktion 119
 - 4.3.1.2 Innere Transportvorgänge und chemische Reaktion 120
 - 4.3.1.2.1 Porendiffusion und katalytische Reaktion 121
 - 4.3.1.2.2 Zusammenwirken von katalytischer Reaktion, Diffusion und Wärmeleitung im porösen Katalysator 124
 - 4.3.1.2.3 Gleichzeitiges Auftreten äußerer und innerer Konzentrationsgradienten 125
 - 4.3.1.2.4 Beeinflussung der Temperaturabhängigkeit der Reaktion durch Stofftransportvorgänge 126
 - 4.3.1.3 Einfluss der Transportvorgänge auf die Selektivität 127
 - 4.3.1.3.1 Einfluss der äußeren Transportvorgänge auf die Selektivität 127
 - 4.3.1.3.2 Einfluss der inneren Transportvorgänge (Porendiffusion) auf die Selektivität 130
 - 4.3.1.4 Kriterien zur Abschätzung des Einflusses von Stoff- und Wärmetransportvorgängen auf den Reaktionsablauf 131
 - 4.3.2 Fluid-Fluid-Reaktionen 133
 - 4.3.2.1 Einfluss des Stoffübergangs auf die effektive Reaktionsgeschwindigkeit 133
 - 4.3.2.2 Einfluss des Stoffübergangs bei Fluid-Fluid-Reaktionen auf die Selektivität 138
 - 4.3.3 Gas-Feststoff-Reaktionen 138
 - 4.3.3.1 Nichtporöse Feststoffe 139
 - 4.3.3.2 Poröse Feststoffe 143
Literatur 144
- 5 **Chemische Reaktoren und deren reaktionstechnische Modellierung** 145
Albert Renken
 - 5.1 Allgemeine Stoff- und Energiebilanzen 145
 - 5.2 Absatzweise betriebene Rührkesselreaktoren 145
 - 5.2.1 Stoffbilanz 146
 - 5.2.2 Wärmebilanz 149
 - 5.2.2.1 Adiabate Reaktionsführung 149
 - 5.2.2.2 Polytrope Reaktionsführung 151
 - 5.3 Halbkontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren 152
 - 5.4 Kontinuierlich betriebener idealer Rührkesselreaktor 153
 - 5.4.1 Stoffbilanz des kontinuierlich betriebenen Rührkesselreaktors 153
 - 5.4.1.1 Volumenbeständige Reaktionen 154
 - 5.4.1.2 Nichtvolumenbeständige Reaktionen 155
 - 5.4.2 Wärmebilanz des kontinuierlich betriebenen Rührkesselreaktors 156
 - 5.5 Ideale Strömungsrohrreaktoren 160
 - 5.5.1 Stoffbilanz 160
 - 5.5.2 Wärmebilanz 161
 - 5.5.2.1 Adiabate Reaktionsführung 161
 - 5.5.2.2 Polytrope Reaktionsführung 162
 - 5.6 Kombination idealer Reaktoren 163

- 5.6.1 Kaskade kontinuierlich betriebener Rührkesselreaktoren 163
 - 5.6.2 Strömungsrohrreaktor mit Rückführung 164
 - 5.7 Reale homogene und quasihomogene Reaktoren 166
 - 5.7.1 Verweilzeitverteilung in chemischen Reaktoren 167
 - 5.7.2 Experimentelle Bestimmung der Verweilzeitverteilung 167
 - 5.7.2.1 Sprungfunktion 168
 - 5.7.2.2 Pulsfunktion 168
 - 5.7.2.3 Beliebige Eingangsfunktion 168
 - 5.7.3 Verweilzeitverteilung in idealen Reaktoren 169
 - 5.7.3.1 Idealer Strömungsrohrreaktor 169
 - 5.7.3.2 Idealer kontinuierlich betriebener Rührkesselreaktor 170
 - 5.7.3.3 Reaktorkaskade 170
 - 5.7.3.4 Laminar durchströmtes Rohr 171
 - 5.7.4 Verweilzeitmodelle realer Reaktoren 171
 - 5.7.4.1 Dispersionsmodell 172
 - 5.7.4.2 Zellenmodell 174
 - 5.7.4.3 Mehrparametrische Modelle 174
 - 5.7.5 Verweilzeitverhalten realer Reaktoren 174
 - 5.7.5.1 Rührkesselreaktoren 174
 - 5.7.5.2 Strömungsrohrreaktoren 175
 - 5.7.6 Einfluss der Verweilzeitverteilung und der Vermischung auf die Leistung realer Reaktoren 177
 - 5.7.6.1 Reaktionen 1. Ordnung 177
 - 5.7.6.2 Reaktionen mit nichtlinearer Kinetik 178
 - 5.7.7 Vermischung in realen Reaktoren 179
 - 5.7.7.1 Segregation 179
 - 5.7.7.2 Zeitpunkt der Vermischung 181
 - 5.7.7.3 Einfluss der Segregation auf die Reaktorleistung und Produktverteilung 182
 - 5.8 Reale Mehrphasenreaktoren 185
 - 5.8.1 Fluid-Feststoff-Systeme 185
 - 5.8.1.1 Festbettreaktoren 185
 - 5.8.1.2 Wirbelschichtreaktoren (vgl. Abschnitt 7.1.3.3) 187
 - 5.8.2 Fluid-Fluid-Systeme (vgl. Abschnitt 4.3.2) 188
 - 5.8.3 Gasförmig-flüssig-fest-Systeme (vgl. Abschnitt 3.3.6; Tabelle 3.3.6) 190
 - 5.8.3.1 Mehrphasen-Festbettreaktoren 191
 - 5.8.3.2 Dreiphasenblasensäule 192
 - 5.8.3.3 Mehrphasen-Rührkesselreaktoren 192
 - 5.8.3.4 Strukturierte Mehrphasenreaktoren 192
 - Literatur* 193
- 6 Auswahl und Auslegung chemischer Reaktoren 195**
- 6.1 Reaktorauswahl und reaktionstechnische Optimierung 195
 - 6.1.1 Einfache Reaktionen (Umsatzproblem) 195
 - 6.1.1.1 Absatzweise betriebener Reaktor (RK) 195
 - 6.1.1.2 Kontinuierlich betriebene Reaktoren 196
 - 6.1.1.3 Temperaturführung 199
 - 6.1.1.4 Isotherme Reaktionsführung 200
 - 6.1.1.5 Adiabate Reaktionsführung 202
 - 6.1.1.6 Adiabater Abschnittsreaktor 202
 - 6.1.2 Komplexe Reaktionen (Ausbeuteproblem) 204
 - 6.1.2.1 Parallelreaktionen 205
 - 6.1.2.2 Folgereaktionen 206
 - 6.1.2.3 Konkurrierende Folgereaktionen 207
 - 6.1.2.4 Polymerisationsreaktionen 210
 - 6.1.2.5 Temperaturführung 211
 - 6.1.2.5.1 Parallelreaktionen 211
 - 6.1.2.5.2 Folgereaktionen 211
 - 6.2 Thermische Prozesssicherheit 212
 - 6.2.1 Theorie der Wärmeexplosion 212
 - 6.2.2 Parametrische Sensitivität 215
 - 6.2.3 Halbkontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren 217
 - 6.2.4 Kontinuierlich betriebene Rührkesselreaktoren 218
 - 6.2.5 Strömungsrohrreaktoren 218
 - 6.3 Mikrostrukturierte Reaktoren 218
 - 6.3.1 Homogene Reaktionen 219
 - 6.3.1.1 Mikrofluidik 219
 - 6.3.1.2 Verweilzeitverteilung 219
 - 6.3.1.3 Stoff- und Wärmeübergang 220
 - 6.3.2 Heterogen katalysierte Fluid-Fest-Reaktionen 223
 - 6.3.2.1 Innerer Stofftransport 223
 - 6.3.2.2 Äußerer Stofftransport 224
 - 6.3.2.3 Temperaturkontrolle 225
 - 6.3.3 Fluid-Fluid-Reaktionen 225
 - Literatur* 225
- Teil III Grundoperationen 227**
Jürgen Grmehling, Axel Brehm
- 7 Konvektiver Stoff- und Wärmetransport 227**
- 7.1 Strömungslehre 227
 - 7.1.1 Strömungsarten, Reynoldssche Ähnlichkeit 227
 - 7.1.2 Mechanik fließfähiger Medien 228
 - 7.1.2.1 Grundlagen der Strömungsgesetze 228
 - 7.1.2.2 Strömung „idealer Fluide“ 228
 - 7.1.2.3 Auftreten von Reibungskräften (Strömen von Flüssigkeiten) 229
 - 7.1.3 Strömungsbedingter Druckverlust 230
 - 7.1.3.1 Ungestörte Strömung – Durchströmen eines geraden Rohrs 230
 - 7.1.3.2 Gestörte Strömung – Auftreten örtlicher Druckverluste 231
 - 7.1.3.3 Ausbildung von Wirbelschichten 231
 - 7.2 Fördern von Fluiden: Pumpen, Komprimieren, Vakuumerzeugung 233
 - 7.2.1 Pumpencharakteristika und Pumpenwirkungsgrade 233
 - 7.2.1.1 Pumpencharakteristika 233

- 7.2.1.2 Pumpenwirkungsgrade 234
- 7.2.2 Pumpen – Apparate zum Fördern von Flüssigkeiten 234
- 7.2.2.1 Arbeitsweise von Hubkolbenpumpen 234
- 7.2.2.2 Arbeitsweise von Kreiselpumpen 235
- 7.2.2.3 Arbeitsweise von Umlaufkolbenpumpen 236
- 7.2.3 Verdichten von Gasen 236
- 7.2.3.1 Druck-Volumen-Diagramm, ein- und mehrstufiges Verdichten 236
- 7.2.3.2 Bauarten von Kompressoren (Verdichtern) 238
- 7.2.3.3 Einsatzbereiche von Kompressoren 239
- 7.2.4 Vakuumerzeugung 240
- 7.3 Wärmetransportprozesse 241
- 7.3.1 Wärmeübertragung 241
- 7.3.1.1 Wärmetransport bei konvektiver Durchmischung 241
- 7.3.1.2 Wärmetransport durch Strahlung 243
- 7.3.2 Wärmeleitung 244
- 7.3.2.1 Wärmeträger 244
- 7.3.2.2 Indirekte Temperaturlenkung 245
- 7.3.2.3 Direkte Temperaturlenkung 247
- 7.3.3 Apparative Möglichkeiten zur Temperaturlenkung 248
- 7.3.3.1 Bauarten von Wärmeaustauschern 248
- 7.4 Trocknung 249
- 7.4.1 Trocknungsgüter und Trocknungsarten 249
- 7.4.2 Kriterien zur Auslegung von Trocknern 249
- 7.4.3 Apparate zum technischen Trocknen 249
- 7.4.3.1 Konvektionstrockner 250
- 7.4.3.2 Kontaktrockner 250
- Literatur* 251
- 8 Thermodynamische Grundlagen für die Berechnung von Phasengleichgewichten 253**
- 8.1 Phasengleichgewichtsbeziehung 254
- 8.2 Dampf-Flüssig-Gleichgewicht 255
- 8.2.1 Anwendung von Zustandsgleichungen 256
- 8.2.2 Virialgleichung 258
- 8.2.3 Chemische Theorie 259
- 8.2.4 Anwendung von Aktivitätskoeffizienten-Modellen 259
- 8.2.5 Aktivitätskoeffizienten-Modelle 261
- 8.3 Vorausberechnung von Phasengleichgewichten 265
- 8.4 Konzentrationsabhängigkeit des Trennfaktors binärer Systeme 268
- 8.4.1 Bedingung für das Auftreten azeotroper Punkte 268
- 8.4.2 Rückstandslinien, Grenzdestillationslinien und Destillationsfelder 269
- 8.5 Flüssig-Flüssig-Gleichgewicht 272
- 8.6 Gaslöslichkeit 274
- 8.7 Fest-Flüssig-Gleichgewicht 276
- 8.8 Phasengleichgewicht für die überkritische Extraktion 279
- 8.9 Adsorptionsgleichgewichte 280
- 8.10 Osmotischer Druck 283
- Literatur* 284
- 9 Auslegung thermischer Trennverfahren 287**
- 9.1 Konzept der idealen Trennstufe 287
- 9.2 Realisierung mehrerer Trennstufen 287
- 9.3 Kontinuierliche Rektifikation 288
- 9.3.1 Rektifikationskolonne 288
- 9.3.2 Ermittlung der Zahl theoretischer Trennstufen 290
- 9.3.2.1 Binäre Systeme 291
- 9.3.2.2 Mehrkomponentensysteme 298
- 9.3.2.2.1 Short-cut-Methoden 298
- 9.3.2.2.2 Fenske-Gleichung 298
- 9.3.2.2.3 Konzept der Schlüsselkomponenten 300
- 9.3.2.2.4 Bestimmung des minimalen Rücklaufverhältnisses mit der Underwood-Gleichung 302
- 9.3.2.2.5 Festsetzung des Rücklaufverhältnisses und der theoretischen Stufenzahl nach Gilliland 302
- 9.3.2.2.6 Rigorose Auslegung von Rektifikationskolonnen 303
- 9.3.2.2.7 Matrixverfahren 303
- 9.3.2.2.7.1 Wang-Henke-Verfahren 303
- 9.3.2.2.7.2 Naphthali-Sandholm-Verfahren 308
- 9.3.3 Konzept der Übertragungseinheit 310
- 9.4 Trennung azeotroper und eng siedender Systeme 313
- 9.4.1 Rektifikative Trennung azeotroper und engsiedender Systeme ohne Zusatzstoff 314
- 9.4.1.1 Trennung durch Rektifikation im Vakuum oder bei erhöhtem Druck 314
- 9.4.1.2 Trennung binärer heteroazeotroper Systeme 316
- 9.4.1.3 Zweidruckverfahren 316
- 9.4.2 Rektifikation mit Hilfsstoffen 318
- 9.4.2.1 Extraktive Rektifikation 318
- 9.4.2.2 Azeotrope Rektifikation 320
- 9.4.3 Wasserdampfdestillation 322
- 9.5 Reaktive Rektifikation 322
- 9.6 Zahl der Kolonnen und mögliche Trennsequenzen 324
- 9.6.1 Energieeinsparung 325
- 9.7 Diskontinuierliche Rektifikation 326
- 9.7.1 Einfache diskontinuierliche Destillation 327
- 9.7.2 Mehrstufige diskontinuierliche Rektifikation 327
- 9.8 Auslegung von Rektifikationskolonnen 329
- 9.8.1 Bodenkolonnen 329
- 9.8.2 Packungskolonnen 332
- 9.8.3 Wärmetauscher 336
- 9.8.3.1 Verdampfer 336
- 9.8.3.2 Kondensatoren 338
- 9.9 Absorption 339

- 9.9.1 Lösemittelauswahl 340
- 9.9.2 McCabe-Thiele-Verfahren 340
- 9.9.3 Kremser-Gleichung 342
- 9.9.4 Chemische Absorption 344
- 9.9.5 Absorberbauarten 345
- 9.10 Flüssig-Flüssig-Extraktion 345
- 9.10.1 Auswahl des Extraktionsmittels 347
- 9.10.2 McCabe-Thiele-Verfahren 347
- 9.10.2.1 Kremser-Gleichung 349
- 9.10.3 Anwendung von Dreiecksdiagrammen 349
- 9.10.4 Extraktoren 352
- 9.10.4.1 Mixer-Settler 352
- 9.10.4.2 Extraktionskolonnen 353
- 9.10.4.3 Zentrifugalextraktoren 354
- 9.11 Fest-Flüssig-Extraktion 354
- 9.12 Extraktion mit überkritischen Fluiden 355
- 9.13 Kristallisation 356
- 9.13.1 Kristallisationsprozess 356
- 9.13.2 Kristallisatoren 357
- 9.14 Adsorption 359
- 9.14.1 Adsorptionsmittel 360
- 9.14.2 Adsorptions- und Desorptionsschritt 361
- 9.14.3 Adsorberbauarten 362
- 9.15 Membrantrennverfahren 364
- 9.15.1 Trennprinzip und Arbeitsweise 364
- 9.15.2 Arten von Membranverfahren 366
- 9.15.3 Membranmodule 368
Literatur 370
- 10 Mechanische Grundoperationen 371**
- 10.1 Mischen fluider Phasen 371
- 10.1.1 Mischen in flüssiger Phase 371
- 10.1.1.1 Aufbau von Rührbehältern;
Rührorgane und ihre Förderwirkung 371
- 10.1.1.2 Ermittlung des Leistungsbedarfs für Rührer 373
- 10.1.1.3 Begasen von Flüssigkeiten, Emulgieren und Suspendieren 375
- 10.1.2 Flüssigkeitsverteilung in der Gasphase 376
- 10.1.2.1 Kriterien der Flüssigkeitsverteilung 376
- 10.1.2.2 Abtropfen, Strahl- und Lamellenzerfall 377
- 10.1.2.3 Einflussgrößen und Auswahlkriterien beim Zerstäuben 378
- 10.2 Mechanische Trennverfahren 379
- 10.2.1 Partikelabtrennung aus Flüssigkeiten 379
- 10.2.1.1 Sedimentieren und Zentrifugieren 379
- 10.2.1.2 Filtrieren 382
- 10.2.2 Partikelabscheidung aus Gasströmen 386
- 10.2.2.1 Ausnutzung der Schwer- und der Zentrifugalkraft 386
- 10.2.2.2 Filterelemente, Elektrofilter, Nassentstaubung 388
- 10.2.3 Trennen weiterer disperser Systeme 389
- 10.2.3.1 Emulsionstrennung 389
- 10.2.3.2 Auftrennen von Schäumen (Schaumbrechen und Schaumverhinderung) 390
- 10.3 Verarbeiten von Feststoffen 391
- 10.3.1 Zerkleinern von Feststoffen 391
- 10.3.1.1 Grundlagen des Zerkleinerns 391
- 10.3.1.2 Energiebedarf beim Zerkleinern 393
- 10.3.1.3 Zerkleinerungsapparate 394
- 10.3.2 Klassieren und Sortieren 396
- 10.3.2.1 Auftrennen des Mahlgut nach Kornklassen (Klassieren) 396
- 10.3.2.2 Auftrennen des Mahlguts unter Ausnutzung von Stoffeigenschaften (Sortieren) 398
- 10.3.3 Formgebung 400
Literatur 402
- Teil IV Verfahrensentwicklung 403**
Arno Behr, Ulfert Onken
- 11 Gesichtspunkte der Verfahrensauswahl 403**
- 11.1 Stoffliche Gesichtspunkte 403
- 11.1.1 Phenol – sieben technische Synthesewege 403
- 11.1.1.1 Alkalischesmelze von Natriumbenzolsulfonat 404
- 11.1.1.2 Wasserdampfhydrolyse von Chlorbenzol (Raschig-Hooker-Verfahren) 404
- 11.1.1.3 Alkalische Hydrolyse von Chlorbenzol 404
- 11.1.1.4 Cumolverfahren (Hock-Verfahren) 405
- 11.1.1.5 Toluoloxidation 405
- 11.1.1.6 Dehydrierung von Cyclohexanol/Cyclohexanon 406
- 11.1.1.7 Benzolhydroxylierung mit Distickstoffmonoxid 406
- 11.1.1.8 Vergleich der Phenolverfahren 406
- 11.1.2 Zusammenfassung 407
- 11.2 Katalyse 407
- 11.2.1 Was ist Katalyse? 407
- 11.2.2 Heterogene Katalyse 409
- 11.2.2.1 Grundprinzipien 409
- 11.2.2.2 Eigenschaften von Feststoff-Katalysatoren 410
- 11.2.3 Homogene Katalyse 411
- 11.2.4 Biokatalyse 413
- 11.2.4.1 Biokatalysatoren 414
- 11.2.4.2 Biotransformationen 414
- 11.2.4.3 Entwicklungschancen der Biokatalyse 417
- 11.2.5 Heterogene und homogene Katalyse – Vergleich und besondere Anwendungsformen 418
- 11.3 Energieaufwand 418
- 11.3.1 Energiearten und Energienutzung 418
- 11.3.2 Wasserstoff 419
- 11.3.2.1 Wasserstofferzeugung aus fossilen Rohstoffen 420
- 11.3.2.2 Wasserstofferzeugung durch Wasserelektrolyse 421
- 11.3.2.3 Vergleich: Wasserstoff aus fossilen Rohstoffen oder durch Wasserelektrolyse 422
- 11.3.2.4 Wasserstoff als Energieträger und Energiespeicher 422

- 11.4 Sicherheit 423
 - 11.4.1 Exotherme Reaktionen 424
 - 11.4.1.1 Ausfall der Kühlung am Beispiel der Blockpolymerisation von Styrol 424
 - 11.4.1.2 Explosion eines Ethylenoxidbehälters als Beispiel einer Wärmeexplosion 425
 - 11.4.1.3 Exotherme Sekundärreaktionen 425
 - 11.4.2 Brennbare und explosive Stoffe und Stoffgemische 426
 - 11.4.2.1 Explosionen 426
 - 11.4.2.2 Explosionsbereich 426
 - 11.4.2.3 Organische Peroxide 427
 - 11.4.2.4 Maßnahmen zur Verhinderung von Explosionen 427
 - 11.4.3 Toxische Stoffe 428
 - 11.4.4 Zusammenfassung und Folgerungen 428
 - 11.5 Umwelt 429
 - 11.5.1 Luftverunreinigungen 429
 - 11.5.2 Abwasserbelastungen 431
 - 11.5.2.1 Ersatz des Chlorhydrinverfahrens für Ethylenoxid und Propylenoxid 432
 - 11.5.2.2 Abwasserreinigung 433
 - 11.5.3 Abfälle 436
 - 11.5.4 Zusammenfassung und Folgerungen 438
 - 11.6 Betriebsweise 439
 - 11.6.1 Beispiel: Hydrierung von Doppelbindungen 439
 - 11.6.1.1 Hydrierung im Suspensionsreaktor 439
 - 11.6.1.2 Hydrierung im Rieselbettreaktor 440
 - 11.6.2 Unterschiede zwischen diskontinuierlichen und kontinuierlichen Verfahren 440
 - 11.6.3 Entscheidungskriterien 442
Literatur 443
- 12 Verfahrensgrundlagen 445**
- 12.1 Ausgangssituation und Ablauf 445
 - 12.2 Verfahrensinformationen 447
 - 12.2.1 Übersicht 447
 - 12.2.2 Sicherheitstechnische Kenndaten 447
 - 12.2.3 Toxikologische Daten 449
 - 12.3 Stoff- und Energiebilanzen 451
 - 12.3.1 Stoff- und Energiebilanzen – Werkzeug in Verfahrensentwicklung und Anlagenprojektierung 451
 - 12.3.2 Stoffbilanzen 451
 - 12.3.3 Energiebilanzen 456
 - 12.4 Versuchsanlagen 456
 - 12.4.1 Notwendigkeit und Aufgaben 456
 - 12.4.2 Typen von Versuchsanlagen 457
 - 12.4.3 Planung einer Versuchsanlage 458
 - 12.5 Auswertung und Optimierung 458
 - 12.5.1 Auswertung 459
 - 12.5.2 Prozess-Simulation und Prozessoptimierung 459
Literatur 460
- 13 Wirtschaftlichkeit von Verfahren und Produktionsanlagen 463**
- 13.1 Erlöse, Kosten und Gewinn 463
 - 13.2 Herstellkosten 464
 - 13.2.1 Vorkalkulation und Nachkalkulation 464
 - 13.2.2 Ermittlung des Kapitalbedarfs 464
 - 13.2.3 Ermittlung der Herstellkosten 467
 - 13.3 Kapazitätsauslastung und Wirtschaftlichkeit 470
 - 13.3.1 Erlöse und Gewinn 470
 - 13.3.2 Fixe Kosten und veränderliche Kosten 470
 - 13.3.3 Gewinn bzw. Verlust in Abhängigkeit von der Kapazitätsauslastung 471
 - 13.4 Wirtschaftlichkeit von Projekten 472
 - 13.4.1 Rentabilität als Maß für die Wirtschaftlichkeit 472
 - 13.4.2 Kapitalrückflusszeit 473
 - 13.4.3 Andere Methoden der Rentabilitätsbewertung 473
 - 13.4.4 Entscheidung zwischen Alternativen 474
Literatur 477
- 14 Planung und Bau von Anlagen 479**
- 14.1 Projektablauf 479
 - 14.2 Projektorganisation 480
 - 14.3 Genehmigungsverfahren für Chemieanlagen 482
 - 14.4 Anlagenplanung 482
 - 14.5 Projektentwicklung 485
 - 14.5.1 Ablaufplanung und -überwachung 485
 - 14.5.2 Bau und Montage 488
Literatur 489
- Teil V Chemische Prozesse 491**
Arno Behr, Ulfert Onken
- 15 Organische Rohstoffe 491**
- 15.1 Erdöl 491
 - 15.1.1 Zusammensetzung und Klassifizierung 491
 - 15.1.2 Bildung und Vorkommen 491
 - 15.1.3 Förderung und Transport 493
 - 15.1.4 Erdölraffinerien 496
 - 15.1.5 Thermische Konversionsverfahren 500
 - 15.1.6 Katalytische Konversionsverfahren 501
 - 15.2 Erdgas 506
 - 15.2.1 Zusammensetzung und Klassifizierung 506
 - 15.2.2 Förderung und Transport 506
 - 15.2.3 Weiterverarbeitung 507
 - 15.3 Kohle 508
 - 15.3.1 Zusammensetzung und Klassifizierung 508
 - 15.3.2 Vorkommen 509
 - 15.3.3 Förderung 509
 - 15.3.4 Verarbeitung 510
 - 15.3.4.1 Verkokung 511
 - 15.3.4.2 Kohlevergasung 513

- 15.3.4.3 Kohlehydrierung 516
- 15.4 Nachwachsende Rohstoffe 517
 - 15.4.1 Bedeutung der nachwachsenden Rohstoffe 517
 - 15.4.2 Fette und Öle 518
 - 15.4.3 Kohlenhydrate 524
 - 15.4.3.1 Cellulose 524
 - 15.4.3.2 Stärke 526
 - 15.4.3.3 Zucker 527
 - 15.4.4 Pflanzliche Sekrete und Extrakte 528
Literatur 529
- 16 Organische Grundchemikalien 531**
 - 16.1 Alkane 531
 - 16.1.1 Herstellung 531
 - 16.1.1.1 Methan 531
 - 16.1.1.2 Höhere *n*- und *iso*-Alkane 532
 - 16.1.1.3 Cycloalkane 532
 - 16.1.2 Verwendung 532
 - 16.1.2.1 Methan 532
 - 16.1.2.2 Höhere *n*-Alkane 533
 - 16.1.2.3 Cycloalkane 534
 - 16.2 Alkene 534
 - 16.2.1 Herstellung 534
 - 16.2.2 Verwendung 541
 - 16.3 Aromaten 544
 - 16.3.1 Herstellung 544
 - 16.3.2 Verwendung 547
 - 16.4 Acetylen 550
 - 16.4.1 Herstellung 550
 - 16.4.1.1 Acetylen aus Kohle 550
 - 16.4.1.2 Acetylen aus Kohlenwasserstoffen 551
 - 16.4.2 Verwendung 551
 - 16.5 Synthesegas 552
 - 16.5.1 Herstellung 552
 - 16.5.1.1 Steamreforming 553
 - 16.5.1.2 Partielle Oxidation 555
 - 16.5.2 Verwendung 555
 - 16.5.3 Kohlenmonoxid 556
Literatur 557
- 17 Organische Zwischenprodukte 559**
 - 17.1 Sauerstoffhaltige Verbindungen 559
 - 17.1.1 Alkohole 559
 - 17.1.1.1 Methanol 559
 - 17.1.1.2 Ethanol 563
 - 17.1.1.3 Propanole 566
 - 17.1.1.4 Butanole 566
 - 17.1.1.5 Längerkettige Alkohole 566
 - 17.1.1.6 Cyclische Alkohole 566
 - 17.1.1.7 Ungesättigte Alkohole 566
 - 17.1.1.8 Mehrwertige Alkohole 567
 - 17.1.2 Phenole 568
 - 17.1.3 Ether 569
 - 17.1.3.1 Aliphatische Ether 569
 - 17.1.3.2 Cyclische Ether 569
 - 17.1.4 Epoxide 570
 - 17.1.4.1 Ethylenoxid 570
 - 17.1.4.2 Propylenoxid 571
 - 17.1.5 Aldehyde 572
 - 17.1.5.1 Formaldehyd (Methanal) 572
 - 17.1.5.2 Acetaldehyd (Ethanal) 573
 - 17.1.5.3 Butyraldehyd (Butanale) 574
 - 17.1.5.4 Ungesättigte Aldehyde 576
 - 17.1.6 Ketone 576
 - 17.1.6.1 Aceton und Methylisobutylketon 576
 - 17.1.6.2 Methylethylketon 577
 - 17.1.7 Carbonsäuren 577
 - 17.1.7.1 Ameisensäure 577
 - 17.1.7.2 Essigsäure 578
 - 17.1.7.3 Ungesättigte Carbonsäuren 580
 - 17.1.7.4 Aliphatische Dicarbonsäuren 580
 - 17.1.7.5 Aromatische Carbonsäuren 581
 - 17.2 Stickstoffhaltige Verbindungen 583
 - 17.2.1 Amine 583
 - 17.2.1.1 Niedere Amine 584
 - 17.2.1.2 Fettamine 584
 - 17.2.1.3 Diamine 584
 - 17.2.1.4 Cyclische Amine 584
 - 17.2.1.5 Aromatische Nitroverbindungen und Amine 585
 - 17.2.2 Lactame 586
 - 17.2.3 Nitrile 586
 - 17.2.3.1 Acrylnitril 586
 - 17.2.3.2 Adipodinitril 587
 - 17.2.4 Isocyanate 588
 - 17.2.4.1 Aliphatische Isocyanate 588
 - 17.2.4.2 Aromatische Isocyanate 589
 - 17.3 Halogenhaltige Verbindungen 589
 - 17.3.1 Chlormethane 589
 - 17.3.2 Chlorderivate höherer Aliphaten 591
 - 17.3.3 Chloraromaten 593
 - 17.3.4 Fluorverbindungen 594
Literatur 595
- 18 Anorganische Grund- und Massenprodukte 597**
 - 18.1 Anorganische Schwefelverbindungen 597
 - 18.1.1 Schwefel und Sulfide 597
 - 18.1.2 Schwefeldioxid 597
 - 18.1.3 Schwefeltrioxid und Schwefelsäure 598
 - 18.2 Anorganische Stickstoffverbindungen 598
 - 18.2.1 Ammoniak 598
 - 18.2.2 Salpetersäure 602
 - 18.2.3 Harnstoff und Melamin 603
 - 18.3 Chlor und Alkalien 603
 - 18.3.1 Chlor und Alkalilauge durch Alkalichloridelektrolyse 603
 - 18.3.2 Natronlauge und Soda 605
 - 18.4 Phosphorverbindungen 606
 - 18.4.1 Elementarer Phosphor 606
 - 18.4.2 Phosphorsäure und Phosphate 607

- 18.5 Technische Gase 607
- 18.5.1 Sauerstoff und Stickstoff 608
- 18.5.2 Edelgase 609
- 18.5.3 Kohlendioxid 610
- 18.6 Düngemittel 610
- 18.6.1 Bedeutung der Düngemittel 610
- 18.6.2 Stickstoffdüngemittel 610
- 18.6.3 Phosphordüngemittel 611
- 18.6.4 Kalidüngemittel 611
- 18.6.5 Mehrnährstoffdünger 612
- 18.6.6 Wirtschaftliche Betrachtung 612
- 18.7 Metalle 612
- 18.7.1 Stähle 612
- 18.7.2 Nichtisenmetalle und ihre Legierungen 613
- 18.7.3 Korrosion und Korrosionsschutz 613
 - Literatur* 614

- 19 Chemische Endprodukte 617**
- 19.1 Polymere 617
- 19.1.1 Aufbau und Synthese von Polymeren 617
 - 19.1.1.1 Stufenreaktionen 618
 - 19.1.1.2 Kettenreaktionen 618
- 19.1.2 Polymerisationstechnik 621
- 19.1.3 Massenkunststoffe 625
- 19.1.4 Fasern 629
- 19.1.5 Klebstoffe 629
- 19.1.6 Hochtemperaturfeste Kunststoffe 630
- 19.1.7 Elektrisch leitfähige Polymere 630
- 19.1.8 Flüssigkristalline Polymere 631
- 19.1.9 Biologisch abbaubare Polymere 631
- 19.2 Tenside und Waschmittel 632
 - 19.2.1 Aufbau und Eigenschaften 632
 - 19.2.2 Anionische Tenside 632
 - 19.2.3 Kationische Tenside 634
 - 19.2.4 Nichtionische Tenside 634
 - 19.2.5 Amphotere Tenside 637
 - 19.2.6 Vergleich der Tensidklassen 637
 - 19.2.7 Anwendungsgebiete 639
- 19.3 Farbstoffe 642
 - 19.3.1 Übersicht 642
 - 19.3.2 Azofarbstoffe 643
 - 19.3.3 Carbonylfarbstoffe 644
 - 19.3.4 Methinfarbstoffe 645
 - 19.3.5 Phthalocyanine 646
 - 19.3.6 Färbevorgänge 646
- 19.4 Pharmaka 648
 - 19.4.1 Allgemeines 648
 - 19.4.2 Arten pharmazeutischer Produkte 648
 - 19.4.3 Wirkstoffherstellung durch chemische Synthese 652
 - 19.4.4 Wirkstoffherstellung mit Biokatalysatoren 653
 - 19.4.5 Wirkstoffherstellung durch Fermentationsverfahren 654
 - 19.4.6 Sonstige Verfahren zur Wirkstoffherstellung 657
- 19.5 Pflanzenschutzmittel 657
 - 19.5.1 Bedeutung des Pflanzenschutzes 657
 - 19.5.2 Insektizide 657
 - 19.5.3 Herbizide 659
 - 19.5.4 Fungizide 660
 - 19.5.5 Marktdaten und Entwicklungstrends 661
- 19.6 Metallorganische Verbindungen 661
- 19.7 Silicone 663
 - 19.7.1 Struktur und Eigenschaften 663
 - 19.7.2 Herstellung der Ausgangsverbindungen 664
 - 19.7.3 Herstellung der Silicone 665
 - 19.7.4 Technische Siliconerzeugnisse 667
- 19.8 Zeolithe 667
 - Literatur* 669

- Anhang 673**
- Anhang 1 Größen zur Charakterisierung von Reaktionen, Verfahren und Anlagen 673**
- Anhang 2 Tabellen zu Reinstoffdaten 675**
- Anhang 3 Graphische Symbole für Fließschemata nach EN ISO 10 628 679**
- Anhang 4 Programm zur Auslegung von Rektifikationskolonnen 689**

- Stichwortverzeichnis 705**