

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Das Ziel industrieller Forschung und Entwicklung	1
1.2	Die Produktionsstruktur der chemischen Industrie	3
1.3	Struktur chemischer Produktionsanlagen	14
2	Chemische Thermodynamik	17
2.1	Reaktionswärme	17
2.2	Thermodynamisches Gleichgewicht	18
2.3	Stoffdaten	23
2.3.1	Reinstoffdaten	24
2.3.2	Mischungsdaten	26
3	Chemische Kinetik	29
3.1	Grundlagen	29
3.2	Kinetische Modelle	33
3.3	Selektivität und Umsatz als Funktion der Prozessparameter	42
4	Hydrodynamik	51
4.1	Grundlagen	51
4.2	Einphasenströmung in Rohrleitungen	54
4.3	Flüssigkeitspumpen [Sulzer 1987]	59
4.4	Verdichter	64
5	Katalyse	67
5.1	Katalysatorperformance	71
5.1.1	Selektivität	71
5.1.2	Aktivität	71
5.1.3	Lebensdauer	73
5.1.4	Mechanische Festigkeit	76
5.1.5	Herstellkosten	76
5.2	Charakterisierung von Katalysatoren [Leofanti 1997a, b]	79
5.2.1	Chemische Zusammensetzung	80
5.2.2	Art des Trägermaterials	80
5.2.3	Promotorenzusätze	81

x | Inhaltsverzeichnis

5.2.4	Phasenzusammensetzung	82
5.2.5	Partikelgröße	82
5.2.6	Hohlraumstruktur	82
5.2.7	Oberflächenstruktur	83
5.2.8	Nebenprodukte im Feed	83
5.3	Kinetik der Heterogenkatalyse [Santacesaria 1997, Santacesaria 1997a]	84
5.3.1	Filmdiffusion	85
5.3.2	Porendiffusion [Keil 1999]	87
5.3.3	Sorption	91
5.3.4	Oberflächenreaktionen	95
5.3.5	Porendiffusion und chemische Reaktion [Emig 1993, Forni 1999, Keil 1999]	98
5.3.6	Filmdiffusion und chemische Reaktion	102
6	Chemische Reaktionstechnik	105
6.1	Grundlagen	106
6.2	Ideale Reaktoren	110
6.3	Reaktoren mit realem Verhalten	114
6.3.1	Verweilzeitverhalten	114
6.3.2	Verweilzeitverhalten idealer Reaktoren	117
6.3.3	Verweilzeitverhalten realer Reaktoren	117
6.4	Nicht-isotherme Reaktoren	124
6.5	Ausführungsformen von Reaktoren	131
7	Produktaufarbeitung (thermische- und mechanische Trennverfahren)	137
7.1	Wärmeübertragung, Verdampfung, Kondensation	138
7.1.1	Grundlagen	138
7.1.2	Dimensionierung	143
7.2	Destillation, Rektifikation	152
7.2.1	Grundlagen der Gas/Flüssig-Gleichgewichte [Pfennig 2003]	152
7.2.1.1	Reinststoffe	153
7.2.1.2	Binäre Mischungen [Ghosh 1999]	156
7.2.2	Einstufige Verdampfung	161
7.2.3	Mehrstufige Verdampfung (Rektifikation)	163
7.2.4	Entwurf von Destillationsanlagen	169
7.2.4.1	Diskontinuierliche Destillation	172
7.2.4.2	Kontinuierliche Destillation	178
7.2.4.3	Trenneinbauten	188
7.2.4.4	Experimentelle Ausarbeitung	193
7.2.4.5	Spezielle Destillationsverfahren	194
7.3	Absorption und Desorption, Stripping, Trägerdampfdestillation	198
7.3.1	Grundlagen	198
7.3.2	Dimensionierung	199
7.3.3	Desorption	204
7.3.4	Trägerdampfdestillation	204

7.4	Extraktion	205
7.4.1	Grundlagen	207
7.4.2	Dimensionierung	208
7.4.3	Apparatives	216
7.5	Kristallisation	218
7.5.1	Grundlagen	219
7.5.2	Lösungskristallisation	221
7.5.3	Schmelzkristallisation	223
7.5.4	Dimensionierung	226
7.6	Adsorption, Chemisorption	228
7.7	Ionentausch	229
7.8	Trocknung	230
7.9	Sonderverfahren für fluide Phasen	232
7.10	Mechanische Verfahren	232
7.10.1	Abtrennung von Feststoffen aus Flüssigkeiten	233
8	Anhang	237
8.1	Mathematische Formeln	237
8.2	Naturkonstanten.	251
8.3	Elementzusammenstellung mit relativen Atommassen und Bindungsradien sowie Schmelz- und Siedepunkten.	252
8.4	Umrechnung verschiedener Maßeinheiten in SI-Einheiten	254
8.5	Wichtige Zusammenhänge zwischen abgeleiteten Einheiten und Basiseinheiten.	259
8.6	Umrechnung von Konzentrationsangaben binärer Mischungen der gelösten Komponente A im Lösungsmittel B.	259
8.7	Van-der-Waals-Konstanten a und b und kritische Werte für einige Gase in alphabetischer Reihenfolge.	260
8.8	Wärmekapazitäten einiger Stoffe und ihre Temperaturabhängigkeit.	261
8.9	Thermodynamische Daten ausgewählter organischer Verbindungen	262
8.10	Größenordnung der Reaktionsenthalpie $\Delta_R H$ ausgewählter technischer Reaktionen [Weissermel 1994].	263
8.11	Antoine-Parameter ausgewählter organischer Verbindungen	266
8.12	Eigenschaften von Wasser	268
8.12.1	Formeln für die Berechnung der physikalisch-chemischen Eigenschaften von flüssigem Wasser zwischen 0 und 150 °C (T in °C, P in bar) [Popiel 1998].	268
8.12.2	Stoffwerte von Wasser ρ = Dichte, c_p = Wärmekapazität, α = Wärmeausdehnungskoeffizient, λ = Wärmeleitfähigkeit, η = Viskositätskoeffizient	271
8.12.3	Dichte $\rho / \text{kg m}^{-3}$ von Wasser bei verschiedenen Temperaturen und Drücken.	273
8.12.4	Spezifische Wärmekapazität $c_p/\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ von Wasser bei verschiedenen Temperaturen und Drücken.	274

- 8.12.5 Dynamische Viskosität $\eta/10^{-6}$ kg m⁻¹ s⁻¹ von Wasser bei verschiedenen Temperaturen und Drücken. 275
- 8.12.6 Selbstdiffusionskoeffizient D/m^2 s⁻¹ [Lamb 1981] von Wasser bei verschiedenen Temperaturen und Drücken. 276
- 8.12.7 Wärmeausdehnungskoeffizient $\beta/10^{-3}$ K von Wasser bei verschiedenen Temperaturen und Drücken. 277
- 8.12.8 Wärmeleitfähigkeit $\lambda/10^{-3}$ W m⁻¹ K⁻¹ von Wasser bei verschiedenen Temperaturen und Drücken. 278
- 8.12.9 Negativer dekadischer Logarithmus des Ionenproduktes von Wasser pK_W/mol^2 kg⁻² [Marshall 1981] von Wasser bei verschiedenen Temperaturen und Drücken. 279
- 8.12.10 Relative statische Dielektrizitätskonstante ϵ_r von Wasser als Funktion von Druck und Temperatur. 279
- 8.13 Eigenschaften von trockener Luft (Molmasse: $M = 28,966$ g mol⁻¹). 280
- 8.13.1 Realgasfaktoren $r = pV/RT$ von trockener Luft bei verschiedenen Temperaturen und Drücken. 281
- 8.13.2 Spezifische Wärmekapazität c_p in kJ kg⁻¹ K⁻¹ von trockener Luft bei verschiedenen Temperaturen und Drücken. 281
- 8.13.3 Dynamische Viskosität $\eta/10^{-3}$ mPa s von trockener Luft bei verschiedenen Temperaturen und Drücken. 282
- 8.13.4 Wärmeleitfähigkeit λ/W m⁻¹ K⁻¹ von trockener Luft bei verschiedenen Temperaturen und Drücken. 282
- 8.14 Dimensionslose Kennzahlen. 283
- 8.15 Wichtige gesetzliche Regelungen beim Umgang mit Stoffen. 285
- 8.16 Gefahren- und Sicherheitshinweise. 285
- 8.17 Die 25 größten Unternehmen der Welt im Jahr 2000. 289
- 8.18 Die 25 größten Unternehmen in Deutschland im Jahr 2000. 290
- 8.19 Oberflächenuntersuchungsmethoden. 291

9 Literatur 295

Register 335