

Dieter Bathen • Marc Breitbach

Adsorptionstechnik

Mit 141 Abbildungen



Springer

Inhalt

1 Einführung in die Adsorptionstechnik	1
1.1 Geschichte der Adsorptionstechnik	1
1.2 Begriffsbestimmung	2
1.3 Beschreibung der physikalischen Vorgänge	3
1.4 Unterschiede von Flüssig- und Gasphasen-Adsorption	5
1.5 Klassifizierung von Adsorptionsverfahren	6
1.5.1 Klassifizierung nach Bindungsenthalpien	6
1.5.2 Klassifizierung nach Mechanismen/Selektivitäten	7
1.5.3 Klassifizierung nach Adsorberbauformen	8
1.5.4 Klassifizierung nach prozesstechnischen Kriterien	9
1.6 Fachbücher zur Adsorptionstechnik	9
2 Technische Adsorbentien	13
2.1 Einleitung	13
2.2 Charakterisierung von Adsorbentien	14
2.2.1 Partikelgrößenverteilung	14
2.2.2 Dichte	15
2.2.3 Porosität	17
2.2.4 Innere oder spezifische Oberfläche	17
2.2.5 Porenradialen Verteilung	18
2.3 Kohlenstoffhaltige Adsorbentien	19
2.3.1 Aktivkohle und -koks	19
2.3.2 Kohlenstoffmolekularsiebe	26
2.4 Oxidische Adsorbentien	28
2.4.1 Kieselgel	28
2.4.2 Alumosilicate	29
2.4.3 Aktivtonerde	36
2.4.4 Weitere oxidische Adsorbentien	38
2.5 Polymere Adsorbentien	39
2.6 Zusammenfassung „Adsorbentien“	43
Literatur zu Kapitel 2	44

3 Grundlagen der Adsorption.....	49
3.1 Thermodynamik der Adsorption.....	49
3.1.1 Thermodynamik der Gasphasen-Adsorption.....	51
3.1.2 Thermodynamik der Flüssigphasen-Adsorption.....	54
3.1.3 Einkomponenten-Isothermen.....	56
3.1.4 Kapillarkondensation und Adsorptions-Desorptions-Hysterese.....	65
3.1.5 Beispiel für ein reales Einkomponenten-System.....	68
3.1.6 Mehrkomponenten-Isothermen.....	70
3.1.7 Adsorptionsenthalpie.....	74
3.2 Kinetik der Adsorption.....	78
3.2.1 Beschreibung der Phänomene.....	78
3.2.2 Stoff-ÄVärmeübergang durch Grenzfilm (Heterogenes Modell I) ...	80
3.2.3 Diffusion in Poren (Heterogenes Modell II).....	82
3.2.4 LDF-Ansatz (Homogenes Modell).....	90
3.2.5 Kinetik von Mehrkomponenten-Prozessen.....	92
3.3 Dynamik der Adsorption.....	92
3.3.1 Durchbruchskurve.....	93
3.3.2 Einfluss der Thermodynamik.....	94
3.3.3 Einfluss der Kinetik.....	95
3.4 Zusammenfassung „Grundlagen“.....	96
Literatur zu Kapitel 3.....	97
4 Mathematische Beschreibung von Adsorption und Desorption.....	103
4.1 Zielsetzung der Modellierung.....	103
4.2 Ansätze zur Modellierung und Simulation.....	104
4.3 Bilanzräume der Modellierung von Adsorptionsprozessen.....	107
4.4 Unterschiede von Gasphasen- und Flüssigphasen-Adsorption.....	108
4.5 Modell der Gasphasen-Adsorption.....	109
4.5.1 Annahmen zur Modellbildung.....	110
4.5.2 Massenbilanz der festen Phase.....	111
4.5.3 Energiebilanz der festen Phase.....	112
4.5.4 Massenbilanz der fluiden Phase.....	114
4.5.5 Energiebilanz der fluiden Phase.....	116
4.5.6 Anfangs- und Randbedingungen.....	119
4.6 Modell der Flüssigphasen-Adsorption.....	120
4.6.1 Annahmen zur Modellbildung.....	121
4.6.2 Massenbilanz der festen Phase.....	121
4.6.3 Massenbilanz der flüssigen Phase.....	123
4.6.4 Anfangs- und Randbedingungen.....	125
4.7 Hilfsgleichungen.....	126
4.7.1 Thermodynamik des Fluids.....	127
4.7.2 Thermodynamik der Adsorbentien.....	127
4.7.3 Druckverlust in durchströmten Festbetten.....	127
4.7.4 Modellparameter.....	129
4.8 Kommerzielle Softwareprogramme.....	134
Literatur zu Kapitel 4.....	135

5 Technische Desorptionsverfahren.....	139
5.1 Grundprinzipien der Desorption.....	139
5.2 Desorption in Gasphasen-Adsorptions-Prozessen.....	141
5.2.1 Druckwechsel-Desorption.....	142
5.2.2 Temperaturwechsel-Desorption.....	148
5.2.3 Verdrängungs-Desorption.....	155
5.2.4 Reaktivierung.....	160
5.3 Desorption in Flüssigphasen-Adsorptions-Prozessen.....	161
5.3.1 Temperaturwechsel-Desorption.....	162
5.3.2 Verdrängungs-Desorption.....	164
5.3.3 Reaktivierung.....	173
5.4 Zusammenfassung „Technische Desorptionsverfahren“.....	175
Literatur zu Kapitel 5.....	175
 6 Industrielle Gasphasen-Adsorptions-Prozesse.....	 183
6.1 Technische Problemstellung.....	183
6.1.1 Vorbehandlung der Gasströme.....	183
6.1.2 Industrielle Anwendungsfelder.....	184
6.1.3 Industrielle Randbedingungen.....	184
6.2 Bauformen der Adsorber.....	188
6.2.1 Festbett-Adsorber.....	188
6.2.2 Rotor-Systeme.....	213
6.2.3 Wander/Wirbelbett-Adsorber.....	223
6.2.4 Flugstrom verfahren.....	232
6.2.5 SMB-Adsorber (Simulierte Gegenstromführung).....	235
6.3 Auslegung von Gasphasenadsorbern.....	235
6.3.1 Short-Cut-Methode 1: Massenbilanz (Adsorption).....	236
6.3.2 Short-Cut-Methode 2: Energiebilanz (Heißgasdesorption).....	237
6.3.3 Erfahrungswerte für die industrielle Adsorber-Auslegung.....	239
6.4 Zusammenfassung „Industrielle Gasphasen-Adsorption“.....	241
Literatur zu Kapitel 6.....	242

7 Industrielle Flüssigphasen-Adsorptions-Prozesse.....	249
7.1 Technische Problemstellung bei der Flüssigphasen-Adsorption	249
7.1.1 Vorbehandlung der Flüssigkeitsströme.....	249
7.1.2 Industrielle Anwendungsfelder.....	250
7.1.3 Industrielle Randbedingungen.....	251
7.2 Bauformen der Adsorber.....	256
7.2.1 Festbett-Adsorber.....	256
7.2.2 Rührkessel-Adsorber.....	286
7.2.3 Pulverkohledosierung.....	287
7.2.4 Bewegte Adsorberbetten.....	291
7.2.5 Wirbelschicht- und Schwebebettadsorber.....	294
7.2.6 Karusselladsorber.....	298
7.2.7 Simulierte bewegte Adsorberbetten (SMB).....	302
7.3 Auslegung von Flüssigphasenadsorbern.....	307
7.3.1 Short Cut Methode 1.....	309
7.3.2 Short Cut Methode II.....	311
7.3.3 Erfahrungswerte für die industrielle Adsorber-Auslegung	313
7.4 Zusammenfassung „Industrielle Flüssigphasen-Adsorption“.....	314
Literatur zu Kapitel 7.....	315
 8 Anhang.....	 323
8.1 Liste der verwendeten Symbole.....	323
8.1.1 Formelzeichen.....	323
8.1.2 Griechische Symbole.....	328
8.2 Indices.....	330
8.3 Dimensionslose Kennzahlen.....	331
8.4 Abkürzungen.....	332
 Sachverzeichnis.....	 335