

Werner Kast

Adsorption aus der Gasphase

Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen
und technische Verfahren



Inhalt

	Liste der verwendeten Symbole	XIII
1	Einführung	1
1.1	Begriff der Adsorption	1
1.2	Geschichtliche Entwicklung der Adsorption	2
1.3	Bezeichnungen, Zustand der Phasengrenzen, allgemeine Beschreibung des Sorptionsgleichgewichts	3
1.4	Freiheitsgrade des Adsorptionssystems	6
	Literatur	7
2	Technische Adsorbentien	9
2.1	Allgemeines	9
2.2	Aktivkohle	10
2.3	Kieselgel	13
2.4	Aktivtonerde	14
2.5	Zeolithische Molekularsiebe	15
2.6	Kohlenstoff-Molekularsiebe	18
2.7	Weitere Adsorbentien	20
	Literatur	20
3	Gleichgewicht bei der Adsorption	23
3.1	Monomolekulare Belegung	23
3.1.1	Ableitung nach Langmuir	23
3.1.2	Diskussion der Langmuir-Gleichung	26
3.1.3	Darstellung der Langmuir-Gleichung	26
3.1.4	Die Temperaturabhängigkeit der monomolekularen Belegung	27
3.2	Die Gleichung von Freundlich	27
3.3	Die Gleichung von Dubinin	27
3.4	Gleichungen von Brunauer-Emmet-Teller	29
3.5	Kapillarkondensation	30
3.5.1	Dampfdruckabsenkung in Kapillaren	30
3.5.2	Porenverteilungskurve	31
3.6	Bindungsenergie im Bereich der mehrschichtigen Beladung und der Kapillarkondensation	33
3.7	Gleichgewichtsthermodynamik der Einkomponenten-Adsorption	36
3.7.1	Ansatz	36
3.7.2	Adsorptions- oder Bindungsenergie	38

3.7.3	Thermodynamischer Ansatz für die Sorptionsisotherme	39
3.8	Theorie der Leerstellenlösung (Vacancy-Solution-Theorie)	41
3.9	Adsorptions- und Desorptionshysterese	42
3.10	Mehrkomponenten-Adsorption	43
3.10.1	Allgemeines und Darstellung	43
3.10.2	Überblick über die Ansätze zur Beschreibung des Gleichgewichts bei der Mehrkomponenten-Adsorption	49
3.10.3	Halbempirische Gleichgewichtsbeziehungen für die Adsorption von mehreren Komponenten	49
3.10.4	Thermodynamisches Gleichgewicht bei der Adsorption mehrerer Komponenten	53
3.10.4.1	Gibbs-Duhemsche Gleichung für die adsorbierte Phase	53
3.10.4.2	Chemisches Potential der adsorbierten Phase	54
3.10.4.3	Chemisches Potential der Gasphase	55
3.10.4.4	Thermodynamisches Gleichgewicht	55
3.10.5	Auswertung der Gleichgewichtsbedingungen	56
3.10.5.1	Verfahren von van Nees	56
3.10.5.2	Theorie der ideal adsorbierten Lösung (IAST)	56
3.10.5.3	Analytische Lösung der IAST	58
3.10.5.4	Graphische Lösung der IAST	60
3.10.5.5	Theorie der realen adsorbierten Lösung	61
3.10.5.6	Theorie der Leerstellenlösung (Vacancy-Solution-Theorie)	61
3.10.5.7	Beispiele für die Berechnung des binären Adsorptionsgleichgewichts, Vergleich von Rechnungen und Messungen	61
3.10.5.8	Erweiterung auf m -Komponenten	66
3.11	Adsorptionskatalyse	67
	Literatur	68
4	Stoff- und Wärmetransport im Adsorbens	71
4.1	Problemstellung	71
4.2	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang	71
4.3	Strömung in den Poren des Adsorbens	72
4.4	Molekularbewegung nach Knudsen in den Poren	73
4.5	Freie oder Gasdiffusion	74
4.6	Überlagerung der Transportmechanismen in der Gasphase	75
4.7	Widerstandsfaktoren μ_p	76
4.8	Transport in der sorbierten Phase	78
4.9	Aktivierter Spaltdiffusion, Mikroporendiffusion oder interkristalline Diffusion	80
4.10	Temperaturabhängigkeit der Transportkoeffizienten	82
	Literatur	83
5	Kinetik der isothermen Ad- und Desorption am Einzelkorn	85
5.1	Ansätze zur Beschreibung der Kinetik	85
5.2	Allgemeine Gleichungen für den instationären Stofftransport unter isothermen Bedingungen	87
5.2.1	Transport und Adsorption in den Makroporen	87
5.2.2	Transport und Adsorption in den Mikroporen	90

5.3	Konzentrationsabhängigkeit des instationären Stofftransports bei der Adsorption unter isothermen Bedingungen	92
5.4	Konzentrationsabhängigkeit des instationären Stofftransports bei der Desorption unter isothermen Bedingungen	96
5.5	Grenzfälle der Sorptionskinetik	97
5.6	Einfluß des äußeren Stoffübergangs auf die Kinetik	99
5.7	Kinetisches Modell des Stofftransports im Adsorbens	99
5.8	Adsorption mehrerer Komponenten	102
	Literatur	104
6	Kinetik der nichtisothermen Ad- und Desorption am Einzelkorn	107
6.1	Probleme und Ansätze	107
6.2	Charakteristische Abhängigkeiten des Temperaturverlaufs im Adsorbens	110
6.3	Kopplung von Kinetik und Temperaturänderung anhand experimenteller und rechnerischer Befunde	112
6.3.1	Ad- und Desorption bei näherungsweise linearen Isothermen	112
6.3.2	Änderung des treibenden Potentials bei nichtisothermen Vorgängen	114
6.3.3	Einfluß der Abmessungen des Adsorbenskorns	114
6.3.4	Einfluß der Höhe des Dampfdrucks auf das nichtisotherme Verhalten	115
6.3.5	Einfluß der Steigung und Krümmung der Sorptionsisothermen	117
6.4	Grenzfälle der Sorptionskinetik	118
6.4.1	Isotherme Sorption	118
6.4.2	Adiabate Sorption	118
6.4.3	Wärmegehemmte Ad- und Desorption	119
6.4.4	Gemeinsame Darstellung der isothermen und nichtisothermen Sorptionskinetik	121
	Literatur	122
7	Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch in durchströmten Schüttungen	125
7.1	Problemstellung	125
7.2	Hohlraumanteil in Schüttungen	125
7.3	Hydraulischer Durchmesser in durchströmten Schüttungen	127
7.4	Geschwindigkeitsverteilung im Festbett	127
7.5	Druckverlust im durchströmten Festbett	130
7.6	Wärme- und Stoffübergang zwischen Fluid und Partikeln in einer durchströmten Schüttung	132
7.7	Wärmeleitfähigkeit in Schüttungen	134
7.7.1	Wärmeleitfähigkeit in nicht-durchströmten Schüttungen	134
7.7.2	Wärmeleitfähigkeit durchströmter Schüttungen	135
7.8	Wärmeübergang zwischen durchströmter Schüttung und Wand	135
7.9	Axiale Dispersion in durchströmten Schüttungen	136
7.10	Mehrkornschüttungen	138
	Literatur	138
8	Durchbruchskurve	141
8.1	Differentialgleichungen zur Bestimmung der zeitlichen und örtlichen Konzentrations- und Temperaturfelder im durchströmten Festbett	141
8.2	Mittlere Frontgeschwindigkeit	144

8.3	Durchbruchskurven bei Gleichgewicht zwischen Gas und Adsorbens	145
8.4	Durchbruchskurve bei linearer Sorptionsisotherme	147
8.5	Durchbruchskurve bei irreversibler oder Sättigungsisotherme	151
8.6	Durchbruchskurve bei axialer Dispersion ohne Adsorption	152
8.7	Constant Pattern	153
8.8	Durchbruchskurven bei Mehrkomponenten-Adsorption	155
8.9	Durchbruchskurven bei nichtisothermer Adsorption	157
8.9.1	Geschwindigkeit der Temperaturfront	157
8.9.2	Berechnung der Durchbruchskurve bei nichtisothermer Adsorption	161
8.9.3	Dimensionslose Darstellung der nichtisothermen Durchbruchskurve und Auslegungsdiagramme	167
8.10	Numerische Methoden zur Berechnung der Durchbruchskurven	170
8.10.1	Überblick über das Differentialgleichungssystem und die numerischen Lösungsverfahren	170
8.10.2	Methode der finiten Differenzen	172
8.10.3	Methode der orthogonalen Kollokation	175
8.10.4	Charakteristikenverfahren	177
	Literatur	178
9	Kontinuierliche Adsorption im Gegenstrom, im Kreuzstrom und in der Wirbelschicht	181
9.1	Kontinuierliche Verfahren	181
9.2	Adsorption im Gegenstrom-Wanderbett	181
9.3	Adsorption im Kreuzstrom-Wanderbett	185
9.4	Adsorption in der Wirbelschicht	189
9.4.1	Einstufige Wirbelschicht	189
9.4.2	Mehrstufige Wirbelschichten	191
9.5	Das Temperaturfeld bei kontinuierlicher Adsorption	196
	Literatur	197
10	Regeneration	199
10.1	Verfahren zur Regeneration	199
10.2	Regeneration durch Spülen mit adsorptivfreiem Gas	200
10.3	Regeneration durch Temperaturwechsel	203
10.4	Regeneration durch Druckwechsel	206
10.5	Regeneration durch Verdrängung	209
	Literatur	211
11	Adsorptionsverfahren	213
11.1	Gliederung der Verfahren	213
11.1.1	Gliederung nach Problemstellungen	213
11.1.2	Gliederung nach den Trenneffekten	213
11.1.2.1	Sterischer Effekt	213
11.1.2.2	Gleichgewichtseffekt	214
11.1.2.3	Kinetischer Effekt	214
11.1.2.4	Verbesserung des Trenneffekts durch Präadsorption	214
11.1.3	Gliederung nach der Verfahrenstechnik	214
11.1.3.1	Festbettverfahren	214

11.1.3.2	Wanderbettverfahren	215
11.1.3.3	Wirbelschichtverfahren	215
11.2	Technische Anwendung von Adsorptionsverfahren zur Gastrennung und Gasanreicherung	215
11.2.1	Abtrennung von Wasserstoff aus wasserstoffhaltigen Gasen	216
11.2.1.1	Darstellung der Verfahren	216
11.2.1.2	Verfahrensbeispiele	219
11.2.2	Zerlegung der Luft in Stickstoff und Sauerstoff	220
11.2.2.1	Darstellung der Verfahren	220
11.2.2.2	Verfahrensbeispiele	222
11.2.3	Trennung von <i>n</i> - und <i>iso</i> -Kohlenwasserstoffen	223
11.2.3.1	Darstellung der Verfahren	223
11.2.3.2	Verfahrensbeispiel: Total-Isomerization-Process (TIP)	225
11.2.4	Anreicherung von Ozon	226
11.2.4.1	Darstellung der Verfahren	226
11.2.4.2	Verfahrensbeispiele	227
11.2.5	Abtrennung von Methan aus Gasgemischen und Kohlenwasserstoff-Trennung	228
11.2.5.1	Darstellung der Verfahren	228
11.2.5.2	Verfahrensbeispiel: Ethylenrückgewinnung	230
11.2.6	Abtrennung von Helium von Tauchatmungs gasen	231
11.2.6.1	Darstellung der Verfahren	231
11.2.6.2	Verfahrensbeispiel: BF-He-Verfahren	232
11.2.7	Kohlenmonoxid- (Wasserstoff-) Abtrennung aus verschiedenen Gasen	232
11.2.7.1	Darstellung der Verfahren	232
11.2.7.2	Verfahrensbeispiel: Kohlenmonoxid-Abtrennung aus Hochofengas	233
11.3	Technische Anwendung der Adsorptionsverfahren zur Gasreinigung	233
11.3.1	Verfahren zur Entschwefelung von Abgasen	234
11.3.1.1	Darstellung der Verfahren	234
11.3.1.2	Verfahrensbeispiele	237
11.3.2	Verfahren zur Simultanabscheidung von Schwefeldioxid und Stickoxiden	240
11.3.2.1	Darstellung der Verfahren	240
11.3.2.2	Verfahrensbeispiele	242
11.3.3	Verfahren zur Lösungsmittel-Rückgewinnung	244
11.3.3.1	Darstellung der Verfahren	244
11.3.3.2	Verfahrensbeispiele	245
11.3.4	Verfahren zur adsorptiven Abtrennung von Geruchsstoffen oder organischen Substanzgemischen	247
11.3.4.1	Darstellung der Verfahren	247
11.3.4.2	Verfahrensbeispiel: Adsox-Verfahren zur Entfernung von Geruchsstoffen und anderen organischen Substanzen aus der Abluft	248
11.3.5	Verfahren zur Reinigung der Abluft von Viskosebetrieben	249
11.3.5.1	Darstellung der Verfahren	249
11.3.5.2	Verfahrensbeispiel: Sulfosorbon-Verfahren zur Reinigung von Viskoseabluft	251
11.3.6	Verfahren zur Entfernung gasförmiger, radioaktiver Komponenten aus Abgasen von Kernkraftwerken und Wiederaufbereitungsanlagen	252
11.3.6.1	Darstellung der Verfahren	252

11.3.6.2	Verfahrensbeispiel: Verfahren zur Reinigung von Abgasen aus Wiederaufbereitungsanlagen	254
11.3.7	Verfahren zur Reinigung von Abgasen unterschiedlicher Abgasquellen	255
11.4	Technische Anwendung der Adsorptionsverfahren zur Gastrocknung	256
11.4.1	Darstellung der Verfahren	256
11.4.2	Verfahrensbeispiele	259
11.4.2.1	Erdgastrocknungsanlage mit Kreislaufregeneratoren	259
11.4.2.2	Heatless-Dryer-Prinzip	260
11.5	Sonderverfahren	261
11.5.1	Zyklische Zonenadsorption – parametrisches Pumpen	261
11.5.2	„Simulierte“ Gegenstromverfahren	261
11.5.3	Wärmespeicherung und -rückgewinnung, Klimatisierung der Raumluft	263
11.6	Zusammenfassende Bemerkungen zu den Adsorptionsverfahren	264
	Literatur	265
	Sachregister	275