
Einführung in die thermischen Trennverfahren

Trennung von Gas-, Dampf- und
Flüssigkeitsgemischen

von
Prof. Dr.-Ing. Burkhard Lohrengel

Oldenbourg Verlag München Wien

Inhalt

Vorwort	XI
1 Grundlagen Verfahrenstechnik	1
1.1 Unit Operations	1
1.2 Thermische und mechanische Trennverfahren.....	4
1.3 Thermische und physikalisch-chemische Trennverfahren	6
2 Thermische Trennverfahren	11
2.1 Absorption und Desorption	11
2.1.1 Absorption	11
2.1.2 Desorption	17
2.2 Extraktion	19
2.2.1 Flüssig-Flüssig-Extraktion	21
2.2.2 Fest-Flüssig-Extraktion	24
2.2.3 Hochdruckextraktion	27
2.3 Adsorption, Ionenaustausch, Chromatographie	30
2.3.1 Adsorption	30
2.3.2 Ionenaustausch	35
2.3.3 Chromatographie	37
2.4 Membranverfahren	38
2.4.1 Mikro- und Ultrafiltration	40
2.4.2 Umkehrosmose	41
2.4.3 Pervaporation.....	43
2.4.4 Gaspermeation	44
2.4.5 Dialyse.....	44
2.4.6 Elektrodialyse	46
2.5 Destillation	47
2.6 Rektifikation.....	53
2.7 Kristallisation	57

3	Reine Stoffe und Stoffgemische	61
3.1	Reine Stoffe.....	61
3.1.1	Gase.....	63
3.1.2	Flüssigkeiten	65
3.1.3	Feststoffe.....	68
3.2	Gemische.....	70
4	Phasengleichgewichte	77
4.1	Grundlagen der Gleichgewichtsberechnung	77
4.2	Gibbssche Phasenregel.....	80
4.3	Phasengleichgewicht Gasphase-Flüssigphase.....	81
4.3.1	Gleichgewicht für Absorption.....	84
4.3.2	Gleichgewicht für Destillation und Rektifikation	93
4.4	Phasengleichgewicht Flüssigphase-Flüssigphase	97
4.4.1	Vollständige Unlöslichkeit von Trägerstoff und Extraktionsmittel	98
4.4.2	Teilweise Löslichkeit von Trägerstoff und Extraktionsmittel	101
4.5	Phasengleichgewicht unter Beteiligung einer Feststoffphase	109
4.5.1	Adsorption.....	110
4.5.2	Fest-Flüssig-Extraktion	116
4.5.3	Kristallisation	116
5	Stoffaustauschapparate	119
5.1	Betriebsformen.....	119
5.2	Aufgabe von Stoffaustauschapparaten.....	121
5.3	Stoffaustauschapparate für den Stoffaustausch zwischen gasförmiger und flüssiger Phase.....	123
5.3.1	Dispergierung der flüssigen Phase	124
5.3.2	Dispergierung der Gasphase	126
5.3.3	Gas und Flüssigkeit als zusammenhängende Phasen	132
5.4	Stoffaustauschapparate für den Stoffaustausch zwischen zwei flüssigen Phasen	139
5.4.1	Anforderungen an Flüssig/Flüssig-Stoffaustauschapparate	139
5.4.2	Mixer-Settler	142
5.4.3	Zentrifugalextraktoren.....	143
5.4.4	Kolonnen ohne äußere Energiezufuhr.....	143
5.4.5	Kolonnen mit äußerer Energiezufuhr.....	146
5.5	Stoffaustauschapparate unter Beteiligung einer festen Phase	150
5.5.1	Diskontinuierlich betriebene Fest/Fluid-Stoffaustauschapparate	150
5.5.2	Kontinuierlich betriebene Fest/Fluid-Stoffaustauschapparate	152
5.6	Stoffaustauschapparate unter Beteiligung einer Membran	154

6	Bilanz	159
6.1	Grundlagen der Bilanzierung	159
6.2	Allgemeine Bilanzgleichungen	161
6.2.1	Stoffbilanz	161
6.2.2	Energie- und Wärmebilanz	163
6.3	Bilanz- oder Arbeitslinie	166
6.4	Bilanzlinie für Absorption	167
6.4.1	Grundsätzliches	167
6.4.2	Bilanzlinie für Gleichstromoperationen	168
6.4.3	Bilanzlinie für Kreuzstromoperationen	172
6.4.4	Bilanzlinie für Gegenstromoperationen	174
6.5	Bilanzlinie für Adsorption	180
6.6	Bilanzlinie für Extraktion	182
6.6.1	Bilanzlinie im Y_m, X_m -Beladungsdiagramm	182
6.6.2	Bilanzlinie im Dreiecksdiagramm	185
6.7	Bilanz für Destillation	199
6.7.1	Diskontinuierliche einfache Destillation	199
6.7.2	Kontinuierliche einfache Destillation	201
6.7.3	Rektifikation	204
6.8	Bilanz für Kristallisation	220
6.8.1	Lösungseindampfung	220
6.8.2	Kristallisation	222
7	Theorie der theoretischen Trennstufen	227
7.1	Theoretische Trennstufe	227
7.2	Stufenmodell für Absorption	229
7.3	Stufenmodell für Adsorption	236
7.4	Stufenmodell für Rektifikation	237
7.4.1	Stufenkonstruktion	237
7.4.2	Zulaufboden	238
7.4.3	Azeotroprektifikation	242
7.5	Stufenmodell für Extraktion	245
7.5.1	Stufenmodell im Y_m, X_m -Beladungsdiagramm	246
7.5.2	Stufenmodell im Dreiecksdiagramm	247
7.6	Praktische Stufenzahl	250
7.6.1	Praktische Stufenzahl für Bodenkolonnen	251
7.6.2	Praktische Stufenzahl für Füllkörper und Packungen	254

8	Stofftransport	261
8.1	Grundlagen des Stofftransports	261
8.2	Diffusion	263
8.3	Stofftransport zwischen Phasen	267
8.3.1	Modellvorstellungen für den Stofftransport	267
8.3.2	Stoffübergang	268
8.3.3	Stoffdurchgang	270
8.4	HTU/NTU-Modell	275
8.4.1	HTU/NTU-Modell für einseitigen Stofftransport	276
8.4.2	HTU/NTU-Modell für Chemisorption	280
8.4.3	HTU/NTU-Modell für äquimolaren Stofftransport	284
8.4.4	Bestimmung des NTU-Werts	285
8.4.5	Bestimmung des HTU-Werts	294
8.4.6	Stoffübergangskoeffizienten	296
8.5	Stofftransport bei Adsorption	300
8.5.1	Filmtheorie bei der Adsorption	300
8.5.2	Adsorption im Partikelbett	304
8.6	Stofftransport bei Membrantrennverfahren	312
8.6.1	Kenngrößen	312
8.6.2	Porenmembranen	314
8.6.3	Porenfreie Membranen	315
9	Fluiddynamik	321
9.1	Strömung in Stoffaustauschapparaten	321
9.1.1	Strömungszustände	321
9.1.2	Strömungsbeeinflussung durch Einbauten	322
9.1.3	Gegenstrom in Stoffaustauschapparaten mit Einbauten	324
9.2	Grundlagen Druckverlust	328
9.2.1	Kenngrößen von Einbauten	328
9.2.2	Bernoulli-Gleichung	330
9.3	Hydrodynamische Kolonnenauslegung	332
9.3.1	Gas-Flüssigkeitsströmungen	332
9.3.2	Flüssig-Flüssig-Strömungen	349
9.3.3	Fluid-Feststoff-Strömungen	367
9.4	Druckverlust	367
9.4.1	Gas-Flüssigkeitsströmungen	367
9.4.2	Fluid-Feststoff-Strömungen	374

10	Regeneration	379
10.1	Absorption	379
10.1.1	Regeneration durch Entspannung	381
10.1.2	Regeneration durch Temperaturerhöhung	381
10.1.3	Regeneration durch Strippung	381
10.1.4	Regeneration durch Fällung	386
10.1.5	Keine Regeneration des Absorbats	386
10.1.6	Kombination von Regenerationsmöglichkeiten	387
10.2	Extraktion	388
10.2.1	Rektifikation	388
10.2.2	Rektifikation mit anschließender Strippung	390
10.2.3	Reextraktion	391
10.2.4	Kristallisation	391
10.2.5	Membrantrennverfahren	391
10.2.6	Extraktion ohne Regeneration	391
10.3	Adsorption	393
10.3.1	Spülen mit unbeladenem Fluid	393
10.3.2	Temperaturwechselverfahren	394
10.3.3	Druckwechselverfahren	398
10.3.4	Verdrängungsdesorption	399
10.3.5	Extraktion mit Lösungsmitteln	400
10.3.6	Thermische Reaktivierung	401
10.3.7	Entsorgung des beladenen Adsorpts	401
	Formelzeichen	403
	Literaturverzeichnis	409
	Stichwortverzeichnis	413