

Inhaltsübersicht

Vorwort	V
-------------------	---

Häufig benutzte Formelzeichen	XV
---	----

1 Allgemeine Grundlagen	1
-----------------------------------	---

Peter Grassmann, Fritz Widmer

1.1 Mechanische und thermische Verfahrenstechnik	1
1.2 Erhaltungssätze und Bilanzgleichungen	3
1.3 Exergiebilanzen	7
1.4 Konzentrationsmaße	10
1.5 Absatzweiser und kontinuierlicher Betrieb	13
1.6 Sicherheitsbetrachtungen	15
1.7 Einige Hinweise für die Literatursuche	16

2 Wärmetauscher	19
---------------------------	----

Peter Kaiser

2.1 Einleitung	19
2.2 Bilanzgleichungen für Gleich-, Gegen- und Kreuzstrom	20
2.3 Wärmeübergang und Wärmedurchgang	21
2.4 Einführung dimensionsloser Kennzahlen	24
2.5 Gebrauchsformeln und Diagramme für den Wärmeübergang und den Druckverlust	26
2.6 Wirtschaftlichkeit	29
2.7 Konstruktives und Sonderbauarten	31
2.7.1 Rohrbündelwärmeaustauscher	31
2.7.2 Sonderbauarten (ohne Rohrbündel)	35
2.7.3 Einige allgemeine Richtlinien zur Konstruktion von Wärmeaustauschern	39
2.8 Beheizte Gefäße	39
2.8.1 Wasserdampf als Heizmittel	39
2.8.2 Induktionsheizung	40
2.8.3 Dielektische Heizung	40

VIII Inhaltsübersicht

2.9	Wärmeübertragungsmittel	41
2.10	Wärmeübertragung in der Wirbelschicht	42
2.10.1	Einleitung	42
2.10.2	Wärmeübertragung zwischen Fluid und Partikeln in der Wirbelschicht	44
2.10.3	Wärmeübertragung zwischen Gas/Feststoff-Wirbelschichten und Einbauten	46
2.10.4	Wirbelschicht-Wärmeübertrager	48

3 Verdampfer und Kondensatoren 53

Peter Kaiser, Fritz Widmer

3.1	Der Wärmeübergang beim Verdampfen	53
3.2	Bauarten von Verdampfern	64
3.3	Der Wärmeübergang beim Kondensieren	70
3.4	Bauarten von Kondensatoren	73

4 Grundlagen der Trennprozesse 77

Fritz Widmer, Raoul Waldburger

4.1	Definitionen	77
4.2	Gasgemische	78
4.3	Die reversible Trennarbeit idealer Gasgemische	79
4.4	Aggregatzustandsänderungen von reinen Stoffen	82
4.5	Lösungen	84
4.5.1	Das Raoult'sche Gesetz	84
4.5.2	Anwendung auf ideal verdünnte Salzlösungen	85
4.5.3	Mischungswärme	86
4.6	Enthalpie-Konzentrations-Diagramme	87
4.6.1	Das Hebelgesetz und die Mischungsgerade	88
4.6.2	Der Verlauf der Isothermen in der flüssigen und in der gasförmigen Phase	90
4.6.3	Der Verlauf der Isothermen im Zweiphasengebiet, Gleichgewichtsverhalten	91
4.7	Stoffdaten	92
4.7.1	Viskosität	93
4.7.2	Wärmeleitfähigkeit	94
4.7.3	Diffusionskoeffizient	94
4.7.4	Oberflächenspannung	95
4.7.5	Weitere Angaben	96

5 Zerlegung von Gemischen durch Verdampfer 97

Hans Günther Hirschberg

5.1	Eindampfen und Verdampfen wäßriger Lösungen	97
5.1.1	Darstellung im h, w -Diagramm und Berechnung der Wärmemengen	97
5.1.2	Verbesserung der Wärmenutzung	103
5.2	Destillation	106
5.2.1	Zur Theorie der Lösungen	106
5.2.2	Die offene Destillation	111

6 Rektifikation 115

Hans Günther Hirschberg

6.1	Einführung	115
6.2	Die Bilanzgerade im McCabe-Thiele-Diagramm	119
6.2.1	Die Verstärkungsgerade	119
6.2.2	Die Abtriebsgerade	123
6.3	Die Bodenkolonne	125
6.3.1	Aufbau einer Bodenkolonne	125
6.3.2	Die Zahl der theoretischen Böden	127
6.3.3	Das Verstärkungsverhältnis	129
6.3.4	Das Mindestrücklaufverhältnis	131
6.3.5	Berechnung einer vollständigen, stetig arbeitenden Bodenkolonne	132
6.3.6	Berechnung im h, w -Diagramm	137
6.3.7	Der Druckabfall in der Bodenkolonne	146
6.3.8	Kolonnenquerschnitt und Bodenabstand	148
6.4	Die Packungskolonne	150
6.4.1	Einführung	150
6.4.2	HETP, NTU, HTU und Kolonnenhöhe	153
6.4.3	Druckabfall und Belastbarkeit von Packungskolonnen	155
6.5	Spezielle Rektifikationsprozesse	159
6.5.1	Mehrstoffrektifikation	159
6.5.2	Rektifikation mit Hilfsstoffen	160
6.5.3	Rektifikation von Azeotropen	161
6.5.4	Reaktivdestillation	163
6.5.5	Molekulardestillation	164

7 Absorption und Gaswäsche 169

Hans Günther Hirschberg, Fritz Widmer

7.1	Einleitung und Definition	169
7.2	Grundlegende Beziehungen, Bilanzgerade	170
7.3	Allgemeine Anforderungen an ein Waschmittel	172

X Inhaltsübersicht

7.4	Phasengleichgewichte	173
7.4.1	Phasengleichgewichte von physikalisch lösenden Waschmitteln . . .	174
7.4.2	Phasengleichgewichte von chemisch wirkenden Lösungsmitteln . . .	176
7.4.3	Literaturangaben über Gleichgewichtsdaten	178
7.5	Stoffaustauschvorgänge	179
7.5.1	Zweifilmtheorie	179
7.5.2	Turbulenztheorien	184
7.6	Aufnahme der Absorptionswärme	187
7.7	Berechnung der theoretischen Bodenzahl	187
7.8	Bestimmung der Höhe von Packungskolonnen	191
7.8.1	Zahl und Höhe von Übergangseinheiten	194
7.9	Absorber	195
7.9.1	Rohrabsorber	195
7.9.2	Rieselabsorber	196
7.9.3	Gegenstromabsorptionskolonnen	197
7.9.4	Gleichstromabsorptionskolonnen	199
7.9.5	Absorber mit mechanischer Zerstäubung	199
7.10	Regeneration des Waschmittels	201
7.10.1	Regeneration durch Austreiben im inerten Gasstrom	201
7.10.2	Regeneration des Waschmittels durch Entspannen	203
7.10.3	Regeneration durch Auskochen	203
7.10.4	Beispiel eines Regenerationsprozesses	204
7.11	Bemerkungen zur Betriebsweise von Absorptionskolonnen	205
7.12	Absorptionsvorgang mit einem chemisch wirkenden Waschmittel . .	207

8 Extraktion/Hochdruckextraktion 213

Fritz Widmer, Raoul Waldburger

8.1	Definitionen und Anwendungen	213
8.1.1	Anwendung der Flüssig/Flüssig-Extraktion	214
8.2	Gleichgewichte von Flüssig/Flüssig-Systemen	214
8.3	Durchführung der Extraktion	219
8.3.1	Absatzweise Extraktion	219
8.3.2	Kontinuierliche Gegenstromextraktion	222
8.4	Wahl des Extraktionsmittels	223
8.5	Berechnung der Gegenstromextraktion unter vereinfachenden An- nahmen	225
8.6	Verfeinerte Berechnung der Gegenstromextraktion unter Berück- sichtigung der gegenseitigen Löslichkeit von Abgeber und Aufneh- mer	229
8.7	Bestimmung der Höhe von Füllkörperkolonnen	234
8.8	Wahl der dispersen und der kontinuierlichen Phase	237
8.9	Extraktionsapparate	237
8.9.1	Mischer-Abscheider (Mixer-Settler)	238
8.9.2	Sprühkolonnen	240

8.9.3	Füllkörperkolonnen	240
8.9.4	Bodenkolonnen	242
8.9.5	Rührkolonnen	244
8.9.6	Extraktoren (Zentrifugalextraktoren)	247
8.9.7	Auswahl der geeigneten Extraktionseinrichtung	247
8.10	Längsmischung in Flüssig/Flüssig-Extraktionskolonnen	250
8.10.1	Stufenmodell (Zellenmodell)	252
8.10.2	Backflow-Modell	253
8.10.3	Dispersionsmodell	254
8.11	Hochdruckextraktion	256
8.11.1	Einleitung	256
8.11.2	Eigenschaften verdichteter Gase	259
8.12	Beispiele von Extraktionsprozessen	261
8.12.1	Entfernen von Mercaptanen aus Kohlenwasserstoffen	261
8.12.2	Reinigung von Rohcaprolactam	262

9 Adsorption und Ionenaustausch 265

Hans Günther Hirschberg

9.1	Allgemeines	265
9.2	Adsorption	265
9.2.1	Der Adsorptionsvorgang. Sorptionsisothermen	265
9.2.2	Die technischen Adsorbentien	269
9.2.3	Die Adsorption aus der Gasphase	272
9.2.4	Die Adsorption aus der flüssigen Phase	275
9.2.5	Chromatographie	276
9.3	Ionenaustausch	276

10 Trocknung fester Stoffe 281

Peter Kaiser

10.1	Einleitung, Definitionen	281
10.2	Der feuchte Körper	282
10.2.1	Die Arten der Feuchtigkeitsbindung	282
10.2.2	Die Bewegung der Feuchtigkeit im Gut	285
10.3	Das feuchte Gas	286
10.3.1	Das h, X -Diagramm	286
10.3.2	Zur Anwendung des h, X -Diagramms	289
10.4	Die Wärmeübertragung an das feuchte Gut	292
10.4.1	Konvektionstrocknung	293
10.4.2	Kontaktstrocknung	293
10.4.3	Strahlungstrocknung	294
10.4.4	Trocknung durch im Gut gespeicherte Wärme (adiabate Vakuum- trocknung)	295
10.4.5	Dielektrische Trocknung	296

10.5	Der Verlauf der Trocknung	297
10.5.1	Der erste Trocknungsabschnitt	297
10.5.2	Der Knickpunkt	298
10.5.3	Der zweite Trocknungsabschnitt	299
10.5.4	Der dritte Trocknungsabschnitt	300
10.5.5	Der Trocknungsverlauf unter technischen Bedingungen	301
10.6	Die technischen Trockner	301
10.6.1	Konvektionstrockner	302
10.6.2	Kontaktstrockner	307
10.6.3	Trockner mit kombinierter Energienutzung	309
10.7	Gefriertrocknung	311
10.8	Kriterien zur Auswahl des optimalen Trocknungsverfahrens	312

11 Kristallisation 315

Hans Günther Hirschberg

11.1	Allgemeines	315
11.2	Definitionen und Grundbegriffe	315
11.3	Löslichkeit	316
11.4	Lösungs- und Kristallisationswärme	319
11.5	Übersättigung und Keimbildung	321
11.6	Kristallisatoren	325
11.6.1	Verdampfungskristallisatoren	326
11.6.2	Kühlungskristallisatoren	327
11.6.3	Vakuumkristallisatoren	329
11.7	Schmelzkristallisation	330
11.7.1	Suspensionskristallisation	332
11.7.2	Schichtkristallisation	333
11.8	Weitere Kristallisationsverfahren	335
11.8.1	Adduktive Kristallisation	335
11.8.2	Zonenschmelzen	335
11.8.3	Züchtung spezieller Kristalle	336

12 Membrantrennverfahren 337

Arthur Ruf, Raoul Waldburger

12.1	Einleitung	337
12.1.1	Begriffe	338
12.1.2	Membranmaterialien	339
12.2	Stofftransport durch Membranen	341
12.2.1	Porenflußmodell	342
12.2.2	Lösungsdiffusionsmodell	343
12.2.3	Verfahrenstechnische Grenzen	344

12.3	Membranprozesse	345
12.3.1	Einleitung	345
12.3.2	Mikrofiltration	349
12.3.3	Ultrafiltration	349
12.3.4	Nanofiltration	350
12.3.5	Umkehrosmose	350
12.3.6	Dialyse	351
12.3.7	Elektrodialyse	352
12.3.8	Pervaporation	353
12.3.9	Gaspermeation	355
12.3.10	Membrandestillation	355
12.3.11	Flüssigmembrantechnik	356
12.4	Modulkonstruktionen	357
12.5	Verfahrenstechnische Probleme	358

13 Verweilzeit und Verweilzeitspektrum 361

Fritz Widmer

13.1	Verweilzeitspektrum und mittlere Verweilzeit	361
13.2	Die Übergangsfunktion	368
13.3	Frequenzgangdarstellung des Verweilzeitverhaltens	370
13.4	Verweilzeitverhalten und Längsmischung	370
13.5	Charakterisierung von Verweilzeitspektren	372

14 Das chemische Gleichgewicht 375

Hansjörg Sinn

14.1	Einleitung	375
14.2	Erster und zweiter Hauptsatz, Reaktionsenthalpie und -energie . . .	376
14.3	Das Massenwirkungsgesetz	377
14.4	Anwendungen des Massenwirkungsgesetzes	381
14.5	Anwendung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik auf chemische Reaktionen	384
14.6	Arbeitsleistung chemischer Reaktionen, Triebkraft	387
14.7	Berechnung der Reversiblen Arbeit chemischer Reaktionen mit Hilfe der Entropie (Nernstscher Wärmesatz)	391
14.8	Die Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtskonstanten	393

15 Reaktionskinetik 395

Hansjörg Sinn

15.1	Einleitung	395
15.2	Geschwindigkeitsausdruck und Reaktionsordnung	399
15.3	Die Konzentrationsabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit . . .	401

XIV	Inhaltsübersicht	
15.4	Die Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeitskonstanten . . .	405
15.5	Reaktionsbeispiele	409
15.6	Zusammengesetzte Reaktionen	416
15.7	Polymerisationen	424
15.8	Explosionen	431
15.9	Heterogene Reaktionen	434
15.10	Die Katalyse	443
	Anhang zu Kapitel 15	455
16	Reaktoren	461
	<i>Hansjörg Sinn</i>	
16.1	Einleitung	461
16.2	Einteilung der Reaktoren	461
16.3	Chargenweiser und kontinuierlicher Betrieb	463
16.4	Die drei Stufen der Reaktionskinetik	464
16.5	Dimensionierung von Reaktoren	465
16.5.1	Der homogene, instationäre Rührkessel	467
16.5.2	Der homogene, stationäre Rührkessel	468
16.5.3	Die Rührkesselkaskade	469
16.5.4	Das Reaktionsrohr	473
16.6	Wärmeumsatz und Stabilität von Reaktoren	478
16.7	Rückführungen	485
16.8	Der Einfluß des Druckabfalls und des Verweilzeitspektrums	487
	Lösungen zu den Aufgaben	491
	Literaturverzeichnis	513
	Register	529