

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XIII
Einleitung	1
1 Phasengleichgewichte	5
1.1 Flüssigkeit/Gas-Systeme	6
1.1.1 Verhalten reiner Stoffe	6
1.1.1.1 Dampfdruck	7
1.1.1.2 Dampfdruck an stark gekrümmten Flüssigkeitsflächen	12
1.1.2 Verhalten von binären Gemischen	14
1.1.2.1 Dampfdruck binärer verdünnter Lösungen	14
1.1.2.2 Gefrierpunktniedrigung	23
1.1.2.3 Das Raoult'sche Gesetz	24
1.1.2.4 Das Henry'sche Gesetz	26
1.1.3 Verhalten idealer Gemische	27
1.1.4 Reales Verhalten von Flüssigkeitsgemischen	34
1.1.4.1 Die Gibbs-Duhem-Gleichung	37
1.1.4.2 Phasenumwandlungs-, Mischungs- und Bindungswärmen	44
1.1.4.3 Exzessgrößen	50
1.1.4.4 Aktivität und Aktivitätskoeffizient	52
1.1.4.5 Fugazität und Fugazitätskoeffizient, Gleichgewichtskonstante	54
1.2 Flüssigkeit/Flüssigkeit-Systeme	57
1.3 Flüssigkeit/Feststoff-Systeme	62
1.4 Sorptionsgleichgewichte	68
1.4.1 Sorption einer Komponente	68
1.4.2 Phasenänderungs- und Bindungswärme	74
1.4.3 Adsorption von zwei und mehr Komponenten	76
1.4.4 Voraussage von Einkomponenten-Adsorptions-Isothermen	81
1.4.5 Molekülbasierte Voraussage von Adsorptionsisothermen	84
1.4.6 Voraussage von Mehrkomponenten-Adsorptions-Gleichgewichten	88
1.5 Enthalpie-Konzentrations-Diagramm	96

2	Grundlagen der Ein- und Mehrphasenströmung	111
2.1	Einige Gesetze der Einphasenströmung	112
2.1.1	Massenerhaltungssatz und Kontinuitätsgleichung	112
2.1.2	Wirbelfreie Bewegung und Wirbelbewegung	113
2.1.3	Das zähe Fluid	114
2.1.4	Navier-Stokes-, Euler- und Bernoulli-Gleichungen	114
2.1.5	Laminare und turbulente Strömung in Rohren und Öffnungen	117
2.1.6	Das turbulente Strömungsfeld	122
2.1.7	Molekularströmung und Molekulardiffusion	123
2.1.8	Filmströmung an senkrechten Wänden	125
2.2	Gegenstrom von Gas und Flüssigkeit im senkrechten Rohr	128
2.3	Ähnlichkeitstheorie und Kennzahlen, Bedeutung der Kennzahlen	130
2.4	Kennzeichnung von Partikelsystemen	132
2.5	Durchströmte Festbetten	136
2.6	Disperse Systeme im Erdschwerefeld	137
2.6.1	Die Endsteig- oder Endfallgeschwindigkeit einzelner Teilchen	140
2.6.2	Volumenanteile (Fließbetten, Sprüh-, Blasen- und Tropfensäulen)	144
2.7	Erzwungene Großraumströmungen in Rührwerken	149
3	Bilanzierung, Wärme- und Stoffübertragung	163
3.1	Einführung	163
3.2	Bilanzierung	164
3.2.1	Grundlagen	164
3.2.2	Beispiele für Bilanzierungen ohne kinetische Vorgänge	169
3.2.2.1	Beispiel: Füllen eines Behälters	169
3.2.2.2	Beispiel: Behälter mit Ablauf	170
3.2.2.3	Beispiel: Temperaturverlauf eines gerührten Behälters	172
3.2.2.4	Beispiel: Isotherme Verdunstung von Wasser	174
3.2.2.5	Beispiel: Bilanzierung einer Kristallisationsanlage	176
3.3	Wärme- und Stoffübertragung	182
3.3.1	Kinetische Ansätze	182
3.3.2	Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten	187
3.3.2.1	Wärme- und Stoffübertragung bei erzwungener Konvektion	187
3.3.2.2	Wärme- und Stoffübertragung in Partikelsystemen	189
3.3.2.3	Wärme- und Stoffübertragung bei freier Konvektion	192
3.3.2.4	Wärmeübertragung an fluidisierte Systeme	194
3.3.2.5	Instationäre Wärme- und Stoffübertragung	195
3.3.2.6	Wärmeübergang an kondensierende Dämpfe	197

3.3.2.7	Wärmeübergang bei der Verdampfung von reinen Flüssigkeiten	199
3.3.3	Beispiele für Bilanzierungen mit kinetischen Vorgängen	204
3.3.3.1	Beispiel: Dampfbeheizter Rührkessel	204
3.3.3.2	Beispiel: Flüssigkeitsgekühlter Rührkessel	207
3.3.3.3	Beispiel: Instationärer Stofftransport in Kugeln	210
3.3.3.4	Beispiel: Isotherme Verdunstung eines binären Gemisches	214
3.3.3.5	Beispiel: Bilanzierung eines Rohrbündel-Wärmeübertragers	219
4	Destillation, Rektifikation, Absorption	225
4.1	Destillation	226
4.1.1	Grundlagen	226
4.1.1.1	Betriebsweisen	226
4.1.1.2	Phasengleichgewicht	227
4.1.1.3	Siedepunkt, Taupunkt	233
4.1.2	Kontinuierliche geschlossene Destillation	235
4.1.2.1	Binäre Gemische	236
4.1.2.2	Vielstoffgemische	237
4.1.2.3	Flashdestillation	238
4.1.3	Diskontinuierliche offene Destillation, Batchdestillation	240
4.1.3.1	Batchdestillation binärer Gemische	240
4.1.3.2	Batchdestillation ternärer Gemische	243
4.2	Rektifikation	244
4.2.1	Grundlagen	245
4.2.2	Kontinuierliche Rektifikation	248
4.2.2.1	Rektifikation binärer Gemische	248
4.2.2.2	Rektifikation ternärer Gemische	262
4.2.2.3	Rektifikation von Vielstoffgemischen	277
4.2.2.4	Reaktivrektifikation	280
4.2.3	Batchrektifikation	284
4.2.3.1	Batchrektifikation binärer Gemische	285
4.2.3.2	Batchrektifikation ternärer Gemische	289
4.2.3.3	Batchreaktivrektifikation	293
4.3	Absorption, Desorption	296
4.3.1	Absorptionsgleichgewicht	297
4.3.2	Physikalische Absorption	299
4.3.2.1	Minimale Waschmittelmenge	299
4.3.2.2	Minimale Strippgasmenge	300
4.3.2.3	Graphische Bestimmung der Zahl der Gleichgewichtsstufen	300
4.3.2.4	Vergleich zwischen Absorption/Desorption und Rektifikation	304
4.3.3	Chemische Absorption, Chemisorption	305
4.4	Gestaltung und Dimensionierung von Stoffaustauschkolonnen	310
4.4.1	Bodenkolonnen	310

4.4.1.1	Arbeitsbereich von Bodenkolonnen	312
4.4.1.2	Zweiphasenströmung auf Kolonnenböden	315
4.4.1.3	Stoffübergang in der Zweiphasenschicht auf Kolonnenböden	322
4.4.2	Packungskolonnen	324
4.4.2.1	Arbeitsbereich von Packungskolonnen	328
4.4.2.2	Zweiphasenströmung in Packungskolonnen	330
4.4.2.3	Stoffübergang in Packungskolonnen	336
5	Extraktion	345
5.1	Phasengleichgewicht	346
5.1.1	Wahl des Extraktionsmittels	349
5.2	Thermodynamische Berechnung der Extraktion	350
5.2.1	Einstufige Extraktion	351
5.2.2	Vielstufige Kreuzstrom-Extraktion	353
5.2.3	Vielstufige Gegenstrom-Extraktion	354
5.3	Bauformen von Extraktionsapparaten	358
5.3.1	Apparate für die Solventextraktion	358
5.3.2	Wahl der dispersen Phase	363
5.3.3	Phasenscheider	364
5.4	Dimensionierung von Flüssig/flüssig-Extraktoren	368
5.4.1	Fluiddynamische Auslegung	368
5.4.2	Stoffübergang in Extraktionsapparaten	376
6	Verdampfen und Kondensieren	385
6.1	Verdampferbauarten	386
6.2	Vielstufenverdampfung	391
6.3	Kondensatorbauarten	399
6.4	Auslegung von Verdampfern und Kondensatoren	401
6.5	Brüdenverdichtung	408
6.6	Verdampfungsverfahren	409
7	Kristallisation	413
7.1	Grundlagen und Gleichgewichte	413
7.1.1	Grundlagen	414
7.1.2	Gleichgewichte	417
7.2	Kristallisationsverfahren und -apparate	418
7.2.1	Kühlungskristallisation	419

7.2.2	Verdampfungskristallisation	420
7.2.3	Vakuumkristallisation	421
7.2.4	Verdrängungs- und Reaktionskristallisation	422
7.2.5	Kristallisationsapparate	423
7.2.5.1	Kristallisation aus Lösungen	423
7.2.5.2	Kristallisation aus Schmelzen	427
7.3	Bilanzen	434
7.3.1	Stoffbilanz des kontinuierlich betriebenen Kristallisators	434
7.3.2	Stoffbilanz des Batch-Kristallisators	439
7.3.3	Energiebilanz des kontinuierlich betriebenen Kristallisators	442
7.3.4	Anzahlbilanz	444
7.4	Kristallisationskinetik	448
7.4.1	Keimbildung und metastabiler Bereich	448
7.4.1.1	Aktivierete Keimbildung	449
7.4.1.2	Heterogene Keimbildung	454
7.4.1.3	Abriebskeimbildung	457
7.4.2	Kristallwachstum	458
7.4.2.1	Diffusionskontrolliertes Kristallwachstum	460
7.4.2.2	Integrationskontrolliertes Kristallwachstum	460
7.4.2.3	Wachstum mit Diffusions- und Integrationswiderstand	462
7.4.3	Aggregation und Agglomeration	465
7.4.4	Keimbildung und -Wachstum in MSM-PR-Kristallisatoren	474
7.5	Auslegung von Kristallisatoren	476
8	Adsorption	483
8.1	Technische Adsorbentien	483
8.2	Adsorptionsapparate	487
8.3	Sorptionsgleichgewichte	493
8.4	Ein- und mehrstufige Adsorber	494
8.4.1	Die einstufige Apparatur	494
8.4.2	Die Kreuzstromschaltung	495
8.4.3	Die Gegenstromschaltung	497
8.5	Adsorptionskinetik	499
8.5.1	Vereinfachte Lösungen für das Festbett	504
8.5.2	Vereinfachte Lösung für das Einzelpartikel	509
8.5.3	Kinetische Transportkoeffizienten	512
8.5.4	Der adiabate Festbettadsorber	518
8.6	Regenerieren der Adsorbentien	524
8.7	Adsorptionsverfahren	527

9	Trocknung	533
9.1	Bauarten von Trocknern	534
9.2	Trocknungsgüter und Trocknungsmittel	539
9.2.1	Trocknungsgüter	539
9.2.2	Trocknungsmittel	544
9.2.3	Trocknen durch Strahlung	544
9.3	Die einstufige Apparatur im Enthalpie-Beladungs- Diagramm	545
9.4	Bilanzen einer mehrstufigen Apparatur	551
9.5	Strömungs- und wärmetechnische Auslegung	553
9.6	Trocknungsverlauf	554
9.6.1	I. Trocknungsabschnitt	555
9.6.2	Der Knickpunkt	558
9.6.3	II. Trocknungsabschnitt	559
9.7	Einige Trocknungsverfahren	564
10	Konzeptuelle Prozessentwicklung	569
10.1	Prozesse zur Zerlegung binärer Stoffgemische	571
10.2	Prozesse zur Zerlegung zeotroper Mehrkomponentengemische	578
10.2.1	Basisprozesse zur Zerlegung ternärer Gemische	579
10.2.2	Prozesse mit Seitenkolonnen	583
10.2.3	Thermische Kopplung	589
10.3	Prozesse zur Zerlegung azeotroper Gemische	593
10.3.1	Prozesse zur Zerlegung von Heteroazeotropen	593
10.3.2	Druckwechselrektifikation	595
10.3.3	Zerlegung azeotroper Gemische unter Verwendung eines Entrainers	597
10.4	Hybridprozesse zur Zerlegung azeotroper Gemische	602
10.5	Reaktivrektifikation	610
	Literaturverzeichnis	613
	Sachverzeichnis	635