

Thermische Verfahrenstechnik

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. habil. S. Weiß, Merseburg

Prof. Dr. sc. techn. K.-E. Militzer, Dresden

Prof. Dr.-Ing. habil. K. Gramlich, Köthen

Mit 290 Bildern und 54 Tabellen



Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
Leipzig · Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	13
1. Zum Gegenstand der thermischen Verfahrenstechnik	19
2. Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung	25
2.1. Wärme- und Stoffübertragung durch molekulare Bewegung	27
2.1.1. Grundgesetze	27
2.1.2. Stationäre Wärmeleitung	29
Beispiel 2.1. Isolierte Rohrleitung für Kühlsole	32
2.1.3. Verschiedene Konzentrationsmaße	33
2.1.4. Diffusion in Gasen	35
Beispiel 2.2. Diffusionskoeffizient in der gasförmigen Phase	39
Beispiel 2.3. Stoffübertragung durch einseitige Diffusion	39
2.1.5. Diffusion in Flüssigkeiten	42
Beispiel 2.4. Diffusionskoeffizient in der flüssigen Phase	43
2.1.6. Diffusion in festen Stoffen	44
2.1.7. Analogie von Impuls-, Wärme- und Stoffübertragung	47
2.2. Bilanzgleichungen	48
2.3. Wärme- und Stoffübertragung durch Konvektion	53
2.3.1. Grundbegriffe und Grundgleichungen	54
2.3.2. Modellierung des Wärmeübergangs auf der Grundlage der Ähnlichkeitstheorie	58
Beispiel 2.5. Wärmeübergangskoeffizient bei turbulenter Strömung	66
Beispiel 2.6. Wärmeübergangskoeffizient bei freier Strömung	67
2.3.3. Modellierung des Stoffübergangs	67
2.3.4. Stoffübergang bei Blasen und Tropfen	74
2.3.5. Stoffübergang bei der Filmströmung	76
Beispiel 2.7. Stoffübergangskoeffizienten in einer Füllkörperkolonne	78
2.3.6. Stoffübergang an festen Grenzflächen	80
2.3.7. Stoffübergangskoeffizient bei einseitiger Stoffübertragung	81
2.3.8. Analogie von Impuls-, Wärme- und Stoffübertragung	82
2.4. Gekoppelte Wärme- und Stoffübertragung	85
2.4.1. Abkühlung eines Gases bzw. einer Flüssigkeit durch Verdunstung	85
Beispiel 2.8. Luftfeuchte-Messung mittels Psychrometer	88
2.4.2. Kondensation von Dämpfen aus Dampf-Gas-Gemischen	90
2.5. Wärme- und Stoffdurchgang	92

2.5.1.	Wärmedurchgang durch feste Wände	94
	Beispiel 2.9. Wärmedurchgang in einer zusammengesetzten ebenen Wand	96
	Beispiel 2.10. Wandtemperaturen bei Bildung von Kesselstein	97
2.5.2.	Stoffdurchgang fluid-fluid	98
	Beispiel 2.11. Stoffdurchgangskoeffizient bei der Absorption in einer Füllkörperkolonne	104
2.5.3.	Stoffdurchgang fluid-fest	105
2.5.4.	Stoffdurchgang fluid-fluid mit chemischer Reaktion	109
	Beispiel 2.12. Erhöhungsfaktor für die Absorption mit chemischer Reaktion	114
2.6.	Übertragungsfläche	114
2.6.1.	Wärmeübertragungsfläche	115
2.6.2.	Phasengrenzfläche	115
2.7.	Phasenführung und Triebkraft	119
2.7.1.	Grundformen der Phasenführung	119
2.7.2.	Triebkraft bei der Wärmeübertragung	120
	Beispiel 2.13. Triebkraftintegral mit temperaturabhängigen Wärmedurchgangskoeffizienten	124
2.7.3.	Triebkraft bei der Stoffübertragung	126
2.8.	Vereinfachte Modellvorstellungen bei der Stoffübertragung	130
2.8.1.	Stufenweiser Kontakt der Phasen	130
2.8.2.	Stetiger Kontakt der Phasen	133
	Übungsaufgaben	135
	Kontrollfragen	139
3.	Prozesse und Apparate der Wärmeübertragung	143
3.1.	Wichtige Bauformen für technische Wärmeübertrager	144
3.2.	Wärmeübertrager ohne Phasenänderung	149
3.2.1.	Grundlagen	149
	Beispiel 3.1. Wärmeverlust und Wandtemperaturen für ein isoliertes Rohr	157
	Beispiel 3.2. Wärmedurchgang bei der Abkühlung einer stark viskosen Flüssigkeit	159
	Beispiel 3.3. Mittlere Temperaturdifferenz bei mehrgängigen Rohrbündelwärmeübertragern	161
	Beispiel 3.4. Wärmeübergang durch Strahlung zwischen zwei Körpern	164
3.2.2.	Auslegung von Wärmeübertragern	164
	Beispiel 3.5. Auslegung von Wärmeübertragern mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	170
3.2.3.	Betriebliches Verhalten von Wärmeübertragern	177
	Beispiel 3.6. Austrittstemperaturen für einen in Betrieb befindlichen Wärmeübertrager	178
3.3.	Kondensation	180

3.3.1.	Grundlagen	180
	Beispiel 3.7. Kondensation von ruhendem Sattedampf am waage- rechten und senkrechten Rohr	185
3.3.2.	Auslegung von Kondensatoren	187
	Beispiel 3.8. Auslegung eines Kondensators	189
3.3.3.	Betriebliches Verhalten von Kondensatoren	192
	Beispiel 3.9. Berechnung eines in Betrieb befindlichen Kondensators	194
3.4.	Verdampfung	198
3.4.1.	Grundlagen	198
3.4.2.	Wärmeübergang bei Blasenverdampfung ohne aufgeprägte Strömung	202
3.4.3.	Wesentliche Bauarten von Verdampfern	205
3.4.4.	Berechnung von Umlaufverdampfern	207
3.4.5.	Betriebliches Verhalten von Verdampfern	210
	Beispiel 3.10. Verdampfung im Gefäß	211
	Beispiel 3.11. Blasenverdampfung in einer ruhenden Flüssigkeit	212
3.5.	Zur Leistungssteigerung von Wärmeübertragern	214
	Übungsaufgaben	217
	Kontrollfragen	219
4.	Destillation	222
4.1.	Grundbegriffe	222
4.2.	Bilanzen	226
4.2.1.	Bilanzen für eine kontinuierliche Destillationskolonne	227
	Beispiel 4.1. Stoff- und Energiebilanz für eine Destillationskolonne	229
4.2.2.	Bilanzen für den Teil einer kontinuierlichen Kolonne	230
4.3.	Kontinuierliche Destillation von Zweistoffgemischen	235
4.3.1.	Rücklaufverhältnis	235
	Beispiel 4.2. Minimales Rücklaufverhältnis bei unterschiedlichen thermi- schen Bedingungen des Einlaufproduktes	237
4.3.2.	Theoretische Bodenzahl	238
	Beispiel 4.3. Grafische Ermittlung der theoretischen Bodenzahl für ein Zweistoffgemisch	242
	Beispiel 4.4. Bodenzahl bei unterschiedlichem Rücklaufverhältnis	245
	Beispiel 4.5. Theoretische Bodenzahl nach Fenske	246
4.3.3.	Stoffübertragung in Füllkörperkolonnen und Schütthöhe	247
	Beispiel 4.6. Höhe einer Füllkörperschüttung bei der Destillation	254
4.3.4.	Betriebliches Verhalten von Destillationskolonnen	259
4.3.5.	Regelung von Destillationskolonnen	260
4.4.	Kontinuierliche Destillation von Mehrstoffgemischen	263
4.4.1.	Problemstellung	263
	Beispiel 4.7. Theoretische Bodenzahl in der Abtriebskolonne mit Berechnung von Boden zu Boden	269

4.4.2.	Kurzmethode zur Berechnung der Mehrstoffdestillation	271
	Beispiel 4.8. Berechnung einer Mehrstoffdestillationskolonne mit Kurz- methoden	276
4.4.3.	Berechnung bei vorgegebener Kolonne nach <i>Thiele-Geddes</i>	278
	Beispiel 4.9. Simulation des betrieblichen Verhaltens einer Mehrstoff- destillationskolonne	282
4.4.4.	Matrizen- und Relaxationsmethoden	285
4.4.5.	Extraktiv- und Azeotropdestillation	289
4.4.6.	Berechnung mit einer neuen Theta-Konvergenzmethode	291
	Beispiel 4.10. Berechnung der theoretischen Bodenzahl für eine Extrak- tivdestillation	294
4.4.7.	Dynamisches Verhalten von Mehrstoffdestillationskolonnen	295
4.4.8.	Schüthöhe in Füllkörperkolonnen	300
4.5.	Gestaltung von Kolonneneinbauten	301
4.6.	Zur Fluidodynamik von Kolonnen	310
4.6.1.	Zur Zweiphasenströmung	310
4.6.2.	Bodenkolonnen	316
	Beispiel 4.11. Auslegung einer kontinuierlichen Destillationsanlage zur Trennung eines binären Gemisches mit Wirtschaftlichkeitsbetrach- tungen	324
4.6.3.	Füllkörperkolonnen	332
4.7.	Austauschgrad bei der Stoffübertragung in Bodenkolonnen	334
4.7.1.	Einflußgrößen auf den Austauschgrad	335
4.7.2.	Zur Modellierung des Austauschgrades	337
	Beispiel 4.12. Austauschgrad bei der Destillation auf Ventilböden	343
4.8.	Einfache Destillation	345
	Beispiel 4.13. Einfache Destillation	347
4.9.	Diskontinuierliche Destillation	349
	Beispiel 4.14. Diskontinuierliche Destillation in einer Kolonne mit Blase	352
4.10.	Schwerpunkte bei der Optimierung von Destillationsprozessen und -anlagen	356
4.10.1.	Auswahl der Kolonneneinbauten	357
4.10.2.	Wahl des Kolonnendrucks	358
4.10.3.	Energieeinsparung	359
	Beispiel 4.15. Vergleich verschiedener Kolonneneinbauten	362
	Beispiel 4.16. Wirtschaftliche Nutzung der Kondensationsenthalpie bei der Destillation	363
	Beispiel 4.17. Einsatz einer Wärmepumpe in einer Destillationsan- lage	367
	Zusätzliche Symbole zum Abschnitt 4.	369
	Übungsaufgaben	370
	Kontrollfragen	376

5	Absorption	380
5.1.	Grundbegriffe	380
5.2.	Bilanzen und Waschflüssigkeits-Mengenstrom	381
5.3.	Stoffübertragung bei stufenweisem Kontakt	384
	Beispiel 5.1. Theoretische Bodenzahl bei der Absorption	386
5.4.	Stoffübertragung in Füllkörperkolonnen bei isothermer Absorption	387
	Beispiel 5.2. Höhe einer Füllkörperschüttung bei isothermer Absorption	390
5.5.	Stoffübertragung in Füllkörperkolonnen bei nichtisothermer Absorption	392
	Beispiel 5.3. Nichtisotherme Absorption von Aceton in Wasser	395
5.6.	Ausrüstungen und Fluidodynamik	396
5.7.	Absorption von organischen Stoffen aus Abgasen	397
	Beispiel 5.4. Absorption von Toluol aus Abgasen	400
5.8.	Desorption des gelösten Stoffes aus einer Flüssigkeit	404
	Beispiel 5.5. Desorption von Trichlorethylen aus Abwasser	405
5.9.	Gesichtspunkte zur Optimierung von Absorptionsanlagen	407
5.10.	Betriebliches Verhalten von Absorptionskolonnen	409
	Übungsaufgaben	410
	Kontrollfragen	411
6.	Extraktion	413
6.1.	Grundbegriffe	414
6.2.	Die theoretische Stufe	418
	Beispiel 6.1. Extraktion mit einer theoretischen Stufe	420
6.3.	Ermittlung der theoretischen Stufenzahl	421
6.3.1.	Extraktor mit frischem Extraktionsmittel in jeder Stufe	421
6.3.2.	Gegenstromextraktor mit Stufen	422
	Beispiel 6.2. Gegenstromextraktor mit theoretischen Stufen im Dreiecksdiagramm	425
	Beispiel 6.3. Gegenstromextraktor mit theoretischen Stufen im Rechteckdiagramm	426
6.3.3.	Gegenstrom mit Rücklauf	428
	Beispiel 6.4. Extraktionsprozeß für Gegenstrom mit Rücklauf	431
6.4.	Austauschgrad	434
6.5.	Grundlagen der Stoffübertragung mit kontinuierlichem Kontakt	435
	Beispiel 6.5. Höhe eines Drehscheibenextraktors bei konstanten Massenströmen	438

6.6.	Zur Fluidodynamik von Drehscheibenextraktoren	439
	Beispiel 6.6. Drehscheibenextraktor zur Aufarbeitung von phenolhaltigem Wasser	442
6.7.	Extraktoren	448
6.8.	Betriebliches Verhalten von Extraktionskolonnen	451
6.9.	Gesichtspunkte zur Optimierung von Extraktionsanlagen	453
	Zusätzliche Symbole zum Abschnitt 6.	454
	Übungsaufgaben	455
	Kontrollfragen	457
7.	Die Trocknung feuchten Gutes	459
7.1.	Grundlagen	459
7.1.1.	Das feuchte Gut	460
7.1.2.	Statik des Trocknungsprozesses	463
	Beispiel 7.1. Schaltungsvarianten eines theoretischen Trockners	467
	Beispiel 7.2. Bilanzen um einen einstufigen realen Trockner	469
7.1.3.	Stoff- und Wärmeübertragung im 1. Abschnitt der Konvektionstrocknung	472
7.1.4.	Prozesskinetik unter konstanten äußeren Bedingungen (Das klassische kinetische Experiment)	474
	Beispiel 7.3. Auswertung von Trocknungsversuchen	479
7.2.	Bauformen technischer Trockner	482
7.2.1.	Einteilung der Trockner	482
7.2.2.	Ausführungsbeispiele von Konvektionstrocknern	483
7.3.	Auslegung von Konvektionstrocknern	487
7.3.1.	Das durchströmte Haufwerk (diskontinuierlicher Kreuzstrom)	487
	Beispiel 7.4. Trocknung eines durchströmten Haufwerkes	491
7.3.2.	Der kontinuierliche Kanaltrockner mit Überströmung des Gutes im Gleich- oder Gegenstrom	495
	Beispiel 7.5. Nachrechnung eines Kanaltrockners	498
7.3.3.	Der Stromtrockner (pneumatischer Trockner)	501
	Beispiel 7.6. Auslegung eines Stromtrockners	503
7.4.	Betrieb von Konvektionstrocknern	505
7.4.1.	Betriebserfahrungen mit Konvektionstrocknern	506
7.4.2.	Simulation des Betriebsverhaltens	509
	Zusätzliche Symbole zum Abschnitt 7.	511
	Übungsaufgaben	512
	Kontrollfragen	517
8.	Adsorption	519
8.1.	Einführung	519
8.2.	Adsorbentien	520

8.3.	Theoretische Grundlagen	523
8.3.1.	Das Adsorptionsgleichgewicht	523
	Beispiel 8.1. Gleichgewicht bei der Adsorption von Ethan und Ethen an Silikagel	525
8.3.2.	Die Adsorptionskinetik	526
8.4.	Praktische Anwendungen der Adsorption	528
8.4.1.	Prozesse und Apparate	528
	Beispiel 8.2. Adsorption von Bleichloriddämpfen im Festbett aus aktivierter Tonerde	534
8.4.2.	Adsorptionsverfahren	536
	Kontrollfragen	538
9.	Kristallisation	539
9.1.	Löslichkeit und Übersättigung	539
9.2.	Bilanzen um einen Kristallisator	541
9.3.	Kornzahlendichtebilanz	542
9.4.	Kinetik der Kristallisation	545
9.4.1.	Keimbildung	546
9.4.2.	Kristallwachstum	547
9.5.	Verfahrenstechnische Modellierung von Kristallisatoren	548
9.5.1.	Modell eines MSMPR-Kristallisators	548
9.5.2.	Bestimmung der Modellparameter K_p, i, j	549
	Beispiel 9.1. Berechnung des Suspensionsvolumens eines Kristallisators	549
9.5.3.	Modellierung diskontinuierlicher Kristallisatoren	553
9.6.	Kristallisatoren	553
	Zusätzliche Symbole zum Abschnitt 9.	554
	Kontrollfragen	555
10.	Membrantrenntechnik	557
10.1.	Übersicht	557
10.2.	Membranen	560
10.3.	Membranmodule	562
10.4.	Umkehrosmose, Nanofiltration, Ultrafiltration, Mikrofiltration	565
10.4.1.	Industrielle Anwendung	566
10.4.2.	Verfahrenstechnische Berechnung	569
10.4.3.	Betriebsverhalten	572
	Beispiel 10.1. Auslegung einer UO-Anlage zur Aufkonzentrierung des Feststoffes im Abwasser einer Sulfitzellstoffanlage	577
	Beispiel 10.2. Konzentrationspolarisation	580

10.5.	Gaspermeation	582
10.6.	Pervaporation	586
10.7.	Dialyse und Elektrodialyse	592
10.8.	Flüssigmembranpermeation	594
10.8.1.	Grundbegriffe	594
10.8.2.	Untersuchungen im Labor	597
10.8.3.	Gestaltung von FMP-Anlagen	598
10.8.4.	Zur verfahrenstechnischen Berechnung der FMP-Kolonne	600
	Kontrollfragen	604
	Lösungen zu den Übungsaufgaben	606
	Literaturverzeichnis	612
	Anhang	619
	Tab. A1. Hauptabmessungen von Rohrbündelwärmeübertragern	619
	Tab. A2. Hauptabmessungen von Ventilböden	620
	Tab. A3. Abmessungen von Füllkörpern und charakteristische Daten	624
	Tab. A4. Gleichgewichte flüssig-flüssig für ternäre Gemische	625
	Tab. A5. Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewichte für ausgewählte binäre Gemische	626
	Tab. A6. Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten	627
	Sachwörterverzeichnis	628