

Inhalt

Häufig verwendete Formelzeichen. XV

1	Grundlagen.	1
1.1	Übersicht über die thermischen Trennverfahren, Prinzipien.	1
1.2	Betriebsformen thermischer Trennverfahren.	7
1.3	Stoffbilanz, Energiebilanz, Exergiebilanz	8
1.3.1	Stoff-, Energie- und Wärmebilanz	8
1.3.2	Exergiebilanz.	12
1.3.3	Durchrechnung der Bilanzierungsgleichungen.	13
1.4	Phasengleichgewichte	13
1.4.1	Allgemeine Begriffe	13
1.4.1.1	Allgemeine Differentialgleichung für das Gleichgewicht zweier Phasen	17
1.4.1.2	Gibbssches Phasengesetz (Phasenregel).	18
1.4.2	Phasengleichgewicht Flüssigphase-Flüssigphase.	19
1.4.2.1	Nernstscher Verteilungssatz	19
1.4.2.2	Darstellung des Phasengleichgewichts Flüssigphase-Flüssigphase	23
1.4.3	Phasengleichgewicht Gasphase-Flüssigphase	29
1.4.3.1	Einkomponentensysteme	29
1.4.3.2	Zwei- und Mehrkomponentensysteme	30
1.4.3.3	Henrysches Gesetz, Gaslöslichkeit	47
1.4.3.4	Siedegleichgewicht von Feststofflösungen, Dampfdruckerniedrigung, Siedepunktserhöhung	59
1.4.4	Phasengleichgewicht Gasphase-Festphase	61
1.4.4.1	Phasengleichgewicht Gasphase-Festphase bei der Sublimation	61
1.4.4.2	Phasengleichgewicht Gasphase-Festphase bei Adsorption/Desorption und konvektiver Feststofftrocknung (Adsorptionsgleichgewicht).	62
1.4.5	Phasengleichgewicht Flüssigphase-Festphase	69
1.4.5.1	Löslichkeit fester Stoffe in flüssigen Lösungsmitteln	69
1.4.5.2	Schmelzdruckkurve.	72
1.4.5.3	Gefrierpunktserniedrigung	73
1.4.5.4	Zustandsdiagramme binärer Systeme mit fester und flüssiger Gleichgewichtsphase	74
1.4.6	Enthalpie des Phasenübergangs.	75
1.5	Trennfaktor, relative Flüchtigkeit	75
1.6	Mindesttrennarbeit	77
1.7	Grundzüge des Stofftransports	78

1.7.1	Stofftransport durch molekulare Diffusion	78
1.7.1.1	Stationäre Diffusion	78
1.7.1.2	Instationäre Diffusion	79
1.7.1.3	Diffusionskoeffizient	79
1.7.2	Stofftransport durch Konvektion	79
1.7.3	Stoffdurchgang.	87
1.7.3.1	Zweifilmtheorie, Stoffdurchgangskoeffizient, Turbulenztheorien.	88
1.8	Stationäre Gleichstromoperationen	90
1.9	Stationäre Gegenstromoperationen	92
1.9.1	Theorie der Trennstufen.	93
1.9.2	Verfahren zur Bestimmung der Zahl der theoretischen Trennstufen von Gegenstromkolonnen	95
1.9.3	Berechnung von Gegenstromkolonnen	102
1.9.3.1	Mengenbilanzen.	105
1.9.3.2	Phasengleichgewichtsbeziehungen	105
1.9.3.3	Enthalpiebilanzen.	105
1.9.3.4	Stöchiometrische Bedingungen für die Konzentrationssummen jeder Gleichgewichtsstufe.	105
1.9.4	Kinetische Theorie der Gegenstromgemischzerlegung	106
1.9.4.1	Stofftransport in beiden Richtungen zwischen den Phasen.	106
1.9.4.2	Stofftransport in einer Richtung	108
1.10	Stationäre Kreuzstromoperationen	111
1.11	Allgemeine Vorgehensweise bei der Auslegung von Einrichtungen zur thermischen Trennung von Gemischen	111
2	Destillation und Teilkondensation	123
2.1	Erläuterung der Begriffe einfache Destillation, Rektifikation, Teilkondensation	123
2.2	Diskontinuierlich und kontinuierlich betriebene einfache Destillation, Entspannungsdestillation	125
2.2.1	Diskontinuierlich betriebene einfache Destillation.	125
2.2.2	Kontinuierlich betriebene einfache Destillation.	129
2.2.3	Wärmebedarf einfacher Destilliereinrichtungen	133
2.2.4	Entspannungsdestillation	136
2.3	Trägerdampfdestillation	137
2.4	Destillation unter Vakuum. Molekulardestillation	140
2.5	Gegenstromdestillation (Rektifikation)	145
2.5.1	Verfahrensvarianten der Rektifikation	148
2.5.1.1	Kontinuierlich betriebene Rektifikation in Rektifizierkolonnen mit Verstärkungsteil und Abtriebsteil	149
2.5.1.2	Reine Abtriebskolonne	151
2.5.1.3	Reine Verstärkungskolonne	151
2.5.1.4	Trennwandkolonne	151

2.5.1.5	Trägerdampfrektifikation	153
2.5.1.6	Kombination verschiedener Varianten.	154
2.5.1.7	Rektifikation mit Hilfsstoff.	154
2.5.1.8	Heteroazeotroprektifikation	165
2.5.1.9	Zweidruckverfahren	166
2.5.1.10	Kombination der Rektifikation mit einem Membrantrennverfahren	168
2.5.1.11	Diffusionsdestillation.	172
2.5.1.12	Rektifikation bei Überdruck-, Tieftemperatur- und Vakuumbetrieb.	173
2.5.1.13	Reaktivdestillation	175
2.5.2	Kontinuierliche adiabate Rektifikation	177
2.5.2.1	Mengenströme.	177
2.5.2.2	Wärmebedarf der Kolonne	180
2.5.2.3	Maßnahmen zur Energieeinsparung	180
2.5.2.4	Festlegung von Trennstufenzahl und wärme- und stoffaustauschender Kolonnenhöhe	194
2.5.2.5	Mindestrücklaufverhältnis, wirtschaftlich optimales Rücklaufverhältnis	200
2.5.2.6	Zulaufstufe	202
2.5.3	Diskontinuierliche adiabate Rektifikation	202
2.5.3.1	Kopfproduktmenge.	204
2.5.3.2	Wärmebedarf.	204
2.5.3.3	Blasendurchmesser, freie Dampfraumhöhe, Kolonnendurchmesser	206
2.5.3.4	McCabe-Thiele-Verfahren zur Bestimmung der Zahl der theoretischen Trennstufen.	206
2.5.4	Halbkontinuierliche adiabate Rektifikation	207
2.5.5	Festlegung des Kolonnendurchmessers	207
2.5.6	Einbauten von Rektifizierkolonnen	208
2.5.6.1	Kolonnenböden	212
2.5.6.2	Regellos geschüttete Füllkörper, Packungen mit regelmäßiger Geometrie.	242
2.6	Auswahl, Optimierung und Regelung von Rektifizieranlagen.	274
2.7	Zubehör von Rektifizieranlagen	280
2.8	Gleichstromdestillation	282
2.9	Nichtadiabate Rektifikation	285
2.10	Teilkondensation	294
2.10.1	Teilkondensation aus Dampfgemischen	294
2.10.2	Teilkondensation von Dämpfen aus Abgasen	298
3	Absorption	313
3.1	Erläuterung der Begriffe Absorption und Desorption, Verfahrensweise, Verfahrensbeispiele.	313
3.1.1	Begriffserläuterung und Verfahrensweise.	313
3.1.2	Verfahrensbeispiele.	314
3.2	Anforderungen an das Wasch- bzw. Lösungsmittel, Lösungsmittelbedarf	335
3.3	Enthalpie- bzw. Wärmebilanz	338

3.4	Absorption im Phasengleichstrom und im Phasenkreuzstrom	339
3.5	Absorption im Phasengegenstrom, Auslegung von Gegenstromkolonnen	342
3.5.1	Festlegung des Kolonnenquerschnitts	342
3.5.2	Festlegung von Stufenzahl und von stoff- und wärmeaustauschender Kolonnenhöhe	342
3.6	Bauformen von Absorbern	365
3.7	Regenerierung des Lösungsmittels, Desorption.	366
4	Adsorption	381
4.1	Erläuterung der Begriffe Adsorption und Desorption, Verfahrensweise, Verfahrensbeispiele	381
4.1.1	Begriffserklärung	381
4.1.2	Verfahrensweise, Verfahrensbeispiele	382
4.2	Adsorbentien, Adsorbensauswahl	398
4.2.1	Adsorbentien.	398
4.2.2	Anforderungen an Adsorbentien, Adsorbensauswahl	401
4.2.3	Technische Adsorbentien, Kenndaten von Adsorbentien	401
4.3	Kinetik der Adsorption	401
4.4	Varianten der Adsorption, Auslegung von Adsorbern.	410
4.4.1	Einstufige Adsorption im Behälteradsorber mit Adsorbensfestbett	410
4.4.2	Mehrstufige Adsorption im Kreuzstrom von Abgeber- und Adsorbensphase . . .	417
4.4.3	Mehrstufige Adsorption im Gegenstrom	417
4.5	Bauformen von Adsorbern	420
4.6	Desorption, Regeneration beladener Adsorbentien	426
5	Trocknung	433
5.1	Erläuterung des Begriffs, Verfahrensweise, Verfahrensbeispiele	433
5.2	Eigenschaften des feuchten Guts, Feuchtewanderung.	436
5.3	Eigenschaften des feuchten Gases, h , X -Diagramm	443
5.4	Wärme- und Stoffübergang bei der Konvektionstrocknung	445
5.5	Kinetik der Trocknung, Trocknungsverlauf, Trocknungsdauer.	453
5.6	Konvektionstrocknung.	458
5.6.1	Trockengas- und Wärmebedarf bei der Konvektionstrocknung	458
5.6.2	Maßnahmen zur Energieeinsparung	461
5.6.3	Varianten der Konvektionstrocknung	463
5.7	Kontaktstrocknung (konduktive Trocknung)	466
5.8	Strahlungstrocknung	471
5.9	Hochfrequenzstrocknung.	472
5.10	Gefriertrocknung	473

5.11	Bauformen von Trocknern	477
5.11.1	Übersicht über die Trocknerbauformen, Auswahl, Auslegung	477
5.11.2	Einzeldarstellung ausgewählter Trocknerbauformen mit Auslegungshinweisen	485
5.11.2.1	Kammertrockner	485
5.11.2.2	Kanaltrockner	486
5.11.2.3	Bandtrockner	486
5.11.2.4	Etagentrockner	486
5.11.2.5	Trommeltrockner	489
5.11.2.6	Wirbelschichttrockner	490
5.11.2.7	Flugrockner, Förderlufttrockner	499
5.11.2.8	Zerstäubungstrockner	502
5.11.2.9	Walzentrockner	507
5.11.2.10	Dünnschichtverdampfer-Trockner (Vertikal- und Horizontaltrockner)	507
5.11.2.11	Kontakt-Mengschichttrockner	512
5.11.2.12	Kontaktrockner mit ständig durch Schwerkraft bewegtem Gut	514
5.11.3	Regelung von Trocknern	519
6	Extraktion	523
6.1	Erläuterung des Begriffs und Verfahrensweise	523
6.2	Flüssig-Flüssig-Extraktion	530
6.2.1	Einsatzbereiche und Verfahrensbeispiele	530
6.2.2	Anforderungen an das Lösungsmittel, Lösungsmittelauswahl	534
6.2.3	Varianten der Flüssig-Flüssig-Extraktion	539
6.2.3.1	Einfache einstufige Extraktion	539
6.2.3.2	Differentielle absatzweise Extraktion	541
6.2.3.3	Mehrstufige Kreuzstromextraktion	542
6.2.3.4	Mehrstufige Gegenstromextraktion	545
6.2.3.5	Gegenstromextraktion mit Extraktrücklauf	560
6.2.3.6	Gegenstromverteilung	562
6.2.4	Bauformen von Extraktionsapparaten	563
6.2.4.1	Mischer-Abscheider, Mischer-Abscheider-Batterie	564
6.2.4.2	Gegenstromkolonnen ohne und mit Energiezufuhr	565
6.2.5	Auswahl und Auslegung von Extraktionsapparaten	596
6.3	Fest-Flüssig-Extraktion	598
6.4	Hochdruckextraktion (Destraktion)	605
7	Lösungseindampfung, Kristallisation	617
7.1	Begriffserläuterung und Verfahrensweise bei der Kristallisation	617
7.2	Kristallisation aus Lösungen	626
7.2.1	Konzentrierung von Lösungen durch Eindampfung	628
7.2.1.1	Einstufige Lösungseindampfung	628
7.2.1.2	Mehrstufige Lösungseindampfung	629
7.2.1.3	Lösungseindampfung unter Einbezug der mechanischen und thermischen Brüdenverdichtung	634
7.2.1.4	Mehrstufige Entspannungsverdampfung	640

XIV *Inhalt*

7.2.1.5	Bauformen von Verdampfern zur Eindampfung von Lösungen	643
7.2.2	Bilanzierung von Kristallisatoren	643
7.2.2.1	Kristallisatertrag.	643
7.2.2.2	Bei der Kristallisation zu- oder abzuführende Wärme	649
7.2.3	Kristallisationskinetik, Kristallkeimbildung, Kristallwachstum	651
7.2.4	Bauarten von Kristallisatoren für die Massenkristallisation aus Lösungen.	654
7.2.5	Hinweise zur Auswahl und Auslegung von Kristallisatoren	661
7.2.6	Ausfrieren.	662
7.2.7	Fraktionierte Kristallisation aus Lösungen	663
7.3	Kristallisation aus der Schmelze.	664
7.4	Kristallisation aus der Dampfphase, Sublimation und Desublimation	671
8	Dokumentation und Vorausberechnung von Stoffwerten.	677
	Literaturverzeichnis	681
	Register.	683