

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XV
----------------------------	-----------

1 Allgemeine Grundlagen	1
1.1 Zum Gegenstand der thermischen Verfahrenstechnik	1
1.2 Zur atomistischen Interpretation der thermischen Trennverfahren	9
1.3 Thermodynamische Systeme, Phase	15
1.4 Zur Berechnung thermischer Trennverfahren	21
1.5 Erhaltungssätze, Bilanzgleichungen, Hebelgesetz	23
1.6 Exergie, Anergie, Exergiebilanzen	29
1.7 Sicherheitstechnische Aspekte	33
2 Thermodynamische Größen und Einheiten	43
2.1 Zustandsgrößen	43
2.2 Prozessgrößen	43
2.3 Intensive und extensive Größen	44
2.4 Konservative Größen und nicht-konservative Größen	44
2.5 Temperatur, Druck	45
2.6 Volumen, Stoffmenge, Masse	46
2.7 Zusammensetzung von Mischphasen	48
3 Stoffübertragung	52
3.1 Einführung	52
3.2 Molekulare und effektive Diffusion	52
3.2.1 1. <i>Ficksches</i> Gesetz	53
3.2.2 Zur physikalischen Interpretation der Diffusion	54
3.2.3 Äquimolare Gegendiffusion	55
3.2.4 Einseitige Diffusion	56
3.2.5 Berechnungsmethoden für Diffusionskoeffizienten	59
3.2.6 2. <i>Ficksches</i> Gesetz	80
3.2.7 Stoffmengenbilanzgleichung	81
3.2.8 Effektive Diffusion	82
3.3 Diffusion in porösen Systemen	82
3.3.1 Effektive molekulare Diffusion	83
3.3.2 <i>Knudsen</i> -Diffusion und Makroporendiffusion	84
3.3.3 Mikroporendiffusion	86
3.3.4 <i>Poiseuille</i> -Strömung	87
3.3.5 Oberflächendiffusion	87

3.3.6 Konfigurable Diffusion	88
3.4 Dispersion.....	88
3.5 Stoffübergang.....	92
3.5.1 Phänomenologische Ansätze	92
3.5.2 Filmtheorie	93
3.5.3 Penetrationstheorie	95
3.5.4 Oberflächenerneuerungstheorie.....	97
3.5.5 Grenzschichttheorie.....	98
3.5.6 Ähnlichkeitstheoretische Beschreibung	99
3.5.7 Grenzflächenphänomene	102
3.5.8 Stoffübergang an Blasen, Tropfen und Filmen.....	103
3.5.9 Stoffübergang an festen Phasengrenzflächen	108
3.6 Stoffdurchgang	113
3.6.1 Übersicht	113
3.6.2 Zweifilmtheorie.....	115
3.6.3 Konzept der theoretischen Trennstufe.....	121
3.6.4 Konzept der Übertragungseinheit.....	122
4 Wärmeübertragung.....	124
4.1 Einführung	124
4.2 Molekulare und effektive Wärmeleitfähigkeit.....	124
4.2.1 1. <i>Fouriersches</i> Gesetz	125
4.2.2 Berechnungsmethoden für Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten	130
4.2.3 2. <i>Fouriersches</i> Gesetz	143
4.2.4 Wärmeleitungsgleichung	143
4.2.5 Effektive Wärmeleitfähigkeit	148
4.3 <i>Wärme</i> konvektion	154
4.3.1 Erzwungene Konvektion	154
4.3.2 Freie Konvektion.....	155
4.4 <i>Wärmeübergang</i>	157
4.4.1 Filmtheorie	157
4.4.2 Ähnlichkeitstheoretische Beschreibung	160
4.4.3 Schütt- und Wirbelschichten	164
4.4.4 Wärmeübergang bei Änderung des Aggregatzustandes	172
4.5 Wärmedurchgang.....	176
4.5.1 Zweifilmtheorie	177
4.5.2 Zahlenwerte von Wärmedurchgangskoeffizienten technisch wichtiger Apparate	182
4.6 Wärmetransport durch Strahlung	182
4.6.1 Einführende Bemerkungen.....	184
4.6.2 Fotometrische Größen	186
4.6.3 <i>Kirchhoffsches</i> Gesetz	190
4.6.4 <i>Plancksches</i> Strahlungsgesetz	191
4.6.5 <i>Stefan-Boltzmannsches</i> Gesetz	193
4.6.6 <i>Bouguersches</i> Gesetz.....	194
4.6.7 Eigenschaften technischer Gasvolumina homogener Temperatur... ..	198

4.6.8 Strahlungsaustausch zwischen zwei beliebig orientierten Körpern	200
4.6.9 Wärmeübergangs- und Wärmeleitfähigkeitskoeffizient infolge Strahlung	208
4.6.10 Strahlungstransportgleichung	210
5 Impulsübertragung (Strömungsmechanik).....	215
5.1 Einführung	215
5.2 Begriffe und Definitionen	216
5.3 Stromlinien, Teilchenbahnen, Streichlinien, Stromröhren und Stromfäden.....	218
5.4 <i>Navier-Stokes</i> -Gleichungen	221
5.4.1 Kontinuitätsgleichung	221
5.4.2 Impulsgleichung	223
5.4.3 Energiegleichung.....	224
5.5 Viskosität von Fluiden	227
5.5.1 Molekularer Impulsfluss bei <i>Gasen</i>	227
5.5.2 Newtonsches Schubspannungsgesetz bei Flüssigkeiten	228
5.5.3 Viskoser Anteil des Spannungstensors.....	230
5.5.4 Berechnungsmethoden für Viskositätskoeffizienten	231
5.5.5 Rheologische Eigenschaften von Stoffen	246
5.6 <i>Bernoulli</i> -Gleichung	254
5.7 Strömungszustände	255
5.7.1 Farbfaden-Versuch zur Visualisierung.....	256
5.7.2 Laminare Strömung.....	257
5.7.3 Turbulente Strömung.....	258
5.7.4 Reynolds-Kriterium (Ähnlichkeitskriterium)	260
5.8 Druckverlust.....	262
5.8.1 Allgemeine Berechnungsformel.....	262
5.8.2 Umströmte Einzelkörper	263
5.8.3 Durchströmte ruhende Schütttschichten	264
5.8.4 Durchströmte Wirbelschichten.....	265
5.8.5 Durchströmte Rohre, Membranen, Rohrleitungselemente und Leitungssysteme	268
6 Grundlagen der Trennprozesse.....	275
6.1 Einführung	275
6.2 Berechnung von Phasengleichgewichten.....	278
6.2.1 Ideale Gemische	278
6.2.2 Reale Gemische	284
6.2.3 Mehrkomponentensysteme	303
6.3 Enthalpie-Konzentrations-Diagramme	313
6.4 Trennfaktor und Ausbeute eines Trennapparates.....	316
6.5 Berechnungsmethoden für thermische und kalorische Stoffeigenschaften	317
6.5.1 Charakteristische Stoffkonstanten	320

6.5.2 Dichte, thermischer Ausdehnungskoeffizient, Kompressibilität	325
6.5.3 Dampfdruckkurve.....	331
6.5.4 Verdampfungsenthalpie.....	334
6.5.5 Molare Wärmekapazität	337
6.5.6 Berechnung der Oberflächenspannung.....	342
6.5.7 Datensammlungen und Datenbanken für Reinstoff- und Gemischdaten	347
7 Destillation, Rektifikation.....	352
7.1 Einführung	352
7.2 Konzept der idealen Trennstufe	359
7.3 Realisierung mehrerer Trennstufen.....	361
7.3.1 Mehrstufiges Gegenstromprinzip	363
7.4 Rektifikationskolonne (Grundbegriffe).....	364
7.5 Zur geschichtlichen Entwicklung der Destillationstechnik.....	366
7.6 Berechnung der Destillation binärer Systeme.....	367
7.6.1 Bilanzlinien	369
7.6.2 Thermischer Zustand (kalorischer Faktor) des Feeds.....	381
7.6.3 Minimale Anzahl theoretischer Trennstufen	384
7.6.4 Minimales Rücklaufverhältnis.....	387
7.6.5 Optimales Rücklaufverhältnis	388
7.6.6 Wahl des optimalen Feed-Bodens.....	390
7.6.7 Berücksichtigung von Seitenströmen und Wärmeverlusten.....	391
7.7 Berechnung der Destillation von Mehrkomponentensystemen.....	393
7.7.1 Einführende Bemerkungen.....	393
7.7.2 Short-cut-Methoden	394
7.7.3 Exakte Methoden (Matrixverfahren).....	399
7.8 Konzept der Übertragungseinheit	416
7.9 Rektifikation bei Drücken ungleich Atmosphärendruck.....	423
7.9.1 Rektifikation bei erhöhtem Druck (Druckdestillation).....	423
7.9.2 Vakuumrektifikation (Vakuumdestillation)	424
7.10 Sonderverfahren der kontinuierlichen Rektifikation.....	426
7.10.1 Heteroazeotroprektifikation.....	427
7.10.2 Zweidruckverfahren	428
7.10.3 Zusatzstoff-Trennverfahren (Selektive Rektifikation).....	429
7.10.4 Reaktive Rektifikation.....	445
7.11 Anzahl von Kolonnen und Schaltungsmöglichkeiten	448
7.11.1 Energieeinsparung	454
7.12 Diskontinuierliche Rektifikation.....	460
7.12.1 Einfache Destillation.....	461
7.12.2 Mehrstufige Destillation.....	464
7.13 Technische Auslegung von Rektifikationskolonnen.....	468
7.13.1 Grundlegende Bemerkungen und kommerzielle Simulations- programme	468
7.13.2 Bodenkolonnen.....	473
7.13.3 Packungskolonnen.....	498

8 Absorption.....	518
8.1 Einführung	518
8.2 Technisch bedeutsame Prozesse	521
8.3 Absorptionsmittel.....	533
8.4 Berechnung der Phasengleichgewichtskurve.....	534
8.5 Berechnung der Absorption bei Phasengegenstrom.....	541
8.5.1 Bilanzlinie	542
8.5.2 Lösemittlrückführung (Rezirkulationsverhältnis).....	543
8.5.3 Minimale Anzahl theoretischer Trennstufen bei Absorption.....	545
8.5.4 Mindestlösemittelverhältnis und Lösemittelbedarf	546
8.5.5 Minimale Anzahl theoretischer Trennstufen mit der <i>Kremser-</i> Gleichung	549
8.5.6 Minimale Anzahl theoretischer Trennstufen bei Exsorption	553
8.6 Berechnung des Bodenwirkungsgrades	554
8.7 Berechnung des Kolonnendurchmessers.....	555
8.8 Berechnung der Kolonnenhöhe.....	555
8.9 Chemische Absorption.....	559
8.9.1 Übersicht und Modifizierung der Phasengleichgewichtskurve	559
8.9.2 Einfluss der Reaktionsgeschwindigkeit auf die Absorption	562
8.9.3 Experimentelle Ermittlung der Phasengrenzfläche mit der sog. chemischen Methode.....	578
8.10 Nicht-isotherme Absorption.....	580
8.11 Absorption im Phasengleichstrom und Phasenkreuzstrom	584
8.12 Bauformen von Absorbern.....	587
8.13 Regenerationsverfahren	597
8.14 Aspekte zur Optimierung von Absorptionsanlagen	608
 9 Extraktion	 610
9.1 Einführung	610
9.2 Technisch bedeutsame Prozesse	614
9.2.1 Flüssig/Flüssig-Extraktion.....	616
9.2.2 Fest/Flüssig-Extraktion	621
9.2.3 Hochdruck-Extraktion (Gasextraktion)	621
9.3 Flüssig/Flüssig-Extraktion	621
9.3.1 Extraktionsmittel	621
9.3.2 Berechnung der Phasengleichgewichtskurve	626
9.3.3 Berechnung der Extraktion binärer Systeme	650
9.3.4 Berechnung der Extraktion ternärer Systeme	655
9.3.5 Berechnung des Stufenaustauschgrades	675
9.3.6 Numerische Berechnung von Mehrkomponentensystemen.....	678
9.3.7 Kontinuierliche Gegenstromextraktion in Kolonnen.....	679
9.3.8 Bauformen von Extraktoren	699
9.4 Fest/Flüssig-Extraktion	751
9.4.1 Einführung.....	751
9.4.2 Technische Prozesse.....	751
9.4.3 Berechnung der Extraktion ternärer Systeme	752

9.4.4 Bauformen von Extraktoren	755
9.5 Hochdruckextraktion	758
9.5.1 Einführung.....	758
9.5.2 Technische Prozesse.....	762
9.5.3 Verfahrenstechnische Anlagen.....	764
9.5.4 Zur Berechnung der Hochdruckextraktion.....	766
10 Adsorption.....	767
10.1 Einführung.....	767
10.1.1 Zur geschichtlichen Entwicklung der Adsorption	773
10.2 Technisch bedeutsame Prozesse der Adsorption und des Ionenaustausches.....	774
10.2.1 Adsorptions- und Regenerationsverfahren	774
10.2.2 Technische Anwendungen der Adsorption.....	788
10.2.3 Technische Anwendungen des Ionenaustausches	814
10.3 Adsorptionsmittel.....	822
10.4 Adsorptionsgleichgewicht.....	842
10.4.1 Grundbegriffe und grafische Darstellungen bei ein und zwei Adsorptiven	842
10.4.2 Adsorptionswärme	854
10.4.3 Berechnung von Einkomponentengleichgewichten	858
10.4.4 Berechnung von Mehrkomponentengleichgewichten	866
10.5 Kinetik der Adsorption	879
10.5.1 Grundlegende Bemerkungen	879
10.5.2 Einzelkorn-Modelle.....	882
10.5.3 Festbett-Modelle.....	894
10.5.4 Berechnung von <i>Durchbruchskurven</i> bei isothermer Adsorption.....	910
10.5.5 Berechnung von <i>Durchbruchskurven</i> bei nicht-isothermer Adsorption.....	925
10.6 Berechnung der Adsorption im Phasengegenstrom	927
10.7 Adsorption im Phasenkreuzstrom	930
10.8 Auslegungsmethoden.....	931
10.8.1 Vorgehensweise	932
10.8.2 Shortcut-Verfahren.....	934
10.8.3 Scale-up-Verfahren	943
10.8.4 Auswahl des geeigneten Auslegungsverfahrens.....	947
10.8.5 Aspekte bei der Detailauslegung	948
10.9 Bauformen von Adsorbern.....	948
10.9.1 Diskontinuierlicher Adsorptionsbetrieb	948
10.9.2 Kontinuierlicher Adsorptionsbetrieb	949
Literatur	957
Sachverzeichnis.....	1007