

Inhaltsverzeichnis

Buchstabensymbole	XXII
Allgemeine Literaturübersicht	XXV
Abkürzungen	XXVII

Kapitel 1 Aufgaben des Verfahreningenieurs

1.1	Verfahrenstechnik = Stoffwandlungstechnik	1
1.2	Darstellung und Gliederung	4
1.3	Allgemeines Schema einer verfahrenstechnischen Anlage	7
1.4	Wie packen wir die Aufgabe an?	8
1.5	Betriebsweisen	14
	a) Kontinuierlicher und Chargenbetrieb	14
	b) Umschalt-Wechselbetrieb	16
	c) Zur Nomenklatur	16

Kapitel 2 Maßsysteme, Dimensionsanalyse, Modellgesetze

2.1	Das neue Einheitensystem: das SI	18
	a) Die Basiseinheiten	18
	b) Wie gelangt man zu abgeleiteten Größen?	19
	c) Einiges zur Nomenklatur	20
	d) Das CGS und das technische Maßsystem	21
	e) Bemerkungen zu den Tabellen	22
2.2	Wann rechnet man bequemer mit der Masse, mit der Stoffmenge oder mit dem Volumen?	26
2.3	Nichtkohärente Einheiten für Kraft, Druck, Energie und Leistung	27
	a) Kraft	27
	b) Druck	27
	c) Energie	28
	d) Leistung	28
	e) Dem jeweiligen Zweck angepaßte Einheiten	28
2.4	Einheiten und Dimensionen	29
2.5	Größengleichungen und Zahlenwertgleichungen	31
2.6	Primitive Anwendung der Dimensionsanalyse	32
2.7	Dimensionsmatrix und vollständige Kennzahlsätze	34
	a) Herleitung aus der Dimensionsmatrix	34
	b) Die Auswahl des geeignetsten Satzes	36
2.8	Das Π -Theorem	40
2.9	Kennzahlen als Kräfteverhältnisse	44
2.10	Die Froude-Zahl	49
2.11	Die dimensionslosen Gleichungen der Strömung einer dichtebeständigen viskosen Flüssigkeit	50
2.12	Herleitung der Kennzahlen aus dimensionsgleichen Größen	56
2.13	Welche physikalischen Erkenntnisse bringen wir in die Dimensionsanalyse ein?	59
	a) Stoffgrößen	60
	b) Muß man auf die letzten Grundlagen zurückgreifen?	60
	c) Geometrische Größen	61

2.14	Herleitung der Kennzahlen aus den Differentialgleichungen	62
	a) Kennzahlen für konstante Stoffwerte	62
	b) Berücksichtigung variabler Stoffwerte	66
2.15	Modelle	68
	a) «Modell» kann vielerlei bedeuten	68
	b) Abhängigkeit von der absoluten Größe	70
	c) Der Rührkessel als Beispiel eines physikalischen Modells	73
2.16	Möglichkeiten und Grenzen des Modellversuchs	76
2.17	Wandinflüsse	79
2.18	Analogieverfahren	80
2.19	Die Wege vom Gedanken zur industriellen Anlage	81

Kapitel 3 Bilanzen

3.1	Erhaltungssätze und Bilanzgleichungen	83
	a) Energie- und Massenerhaltung	83
	b) Erhaltungssatz der Energie	83
	c) Erhaltung der Atomarten	84
	d) Das Bilanzgebiet	85
	e) Fraktion und Ausbeute	88
	f) Offene, geschlossene und abgeschlossene Systeme	88
	g) Das offene, irreversible System verfügt über die meisten Möglichkeiten	89
3.2	Die Kontinuitätsgleichung für die Strömung in einer Leitung	89
3.3	Bilanzierung eines halbkontinuierlichen Verfahrens, der Filtration	92
3.4	Konzentrationsmaße	93
3.5	Darstellung von Zwei- und Dreikomponentensystemen	99
3.6	Konstruktion des Mischpunktes auf Grund der Hebelbeziehung	101
3.7	Massen- und Stoffbilanzen bei Mehrkomponenten-Strömen	102
3.8	Innere Energie und Enthalpie	104
3.9	Wärmekapazität und spezifische Wärme	106
3.10	Das $h-w$ -Diagramm und das Hebelgesetz für die adiabate Mischung	109
3.11	Die Wahl des Skalennullpunktes und die Verdampfungsenthalpie von Mischungen	113
3.12	Energiebilanz und Flußbild der Energie	117
3.13	Energie und Massenbilanz des durchströmten Rohrschnittes	118
	a) Der Wärmeübergang im Rohrschnitt	118
	b) Der Wärmeaustauscher	121
	c) Stoffbilanzen	123
3.14	Die Massenbilanz für das Volumenelement und die Divergenz	124
3.15	Differentielle Energiebilanzen	130
	a) Wärmeleitung und Fourier'sches Gesetz	130
	b) Konvektiver Energietransport	132
3.16	Differentielle Massenbilanzen bei mehreren Komponenten	133
	a) Warum ist die Diffusion für uns so wichtig?	133
	b) Diffusion und Fick'sche Gesetze	134
	c) Molare Gegendiffusion, einseitige Diffusion und Stefan-Strom	135
	d) Zusammenspiel zwischen Diffusion und Migration bei der Elektrolyse	138
	e) Zusammenfassung	139
3.17	Grenzen der Analogie zwischen Wärmeleitung bzw. Diffusion und Sickerströmung	140
3.18	Quellen und Senken	140

3.19	Der Gauß'sche Satz	143
3.20	Beispiele bewegter Bilanzgebiete	144
3.21	Zusammenfassung und Verallgemeinerung	147
	a) Allgemeine Grundlagen und Grenzen	147
	b) Erhaltung der Masse der Komponente i und der Gesamtmasse	149
	c) Erhaltung des Impulses	150
	d) Erhaltung der Energie	151
	e) Erhaltung der elektrischen Ladung	152
	f) Erhaltung des Drehimpulses	152
	g) Erhaltung von Entropie und Exergie	152

Kapitel 4 Kräfte und Ströme

4.1	Die drei Säulen der Strömungslehre	153
4.2	Das Geschwindigkeitspotential	154
4.3	Energie und Impulssatz	156
4.4	Die Beschleunigung bei instationärer Strömung	158
4.5	Stromlinien und Teilchenbahnen	161
4.6	Die Bernoulli'sche Gleichung	162
4.7	Anwendungen des Impulssatzes auf einphasige Strömungen	166
	a) Druckverlust bei der plötzlichen Erweiterung eines Rohres	166
	b) Bleibender Druckverlust in Düsen und Blenden	166
	c) Kraft auf einen Ventilator und ein Drahtgitter	167
	d) Kräfte in Krümmern	167
	e) Ein scheinbarer Widerspruch zwischen Impuls- und Energiesatz	169
	f) Anwendungen des Impulssatzes auf Einbauten, Schüttschichten und disperse Systeme	171
	g) Zusammenfassung	173
4.8	Das Newton'sche Viskositätsgesetz	174
4.9	Die auf das «Volumenelement» wirkende Viskositätskraft und die Navier-Stokes'schen Gleichungen	175
4.10	Laminarer Rieselfilm und Spaltströmungen	177
	a) Der Rieselfilm	177
	b) Strömung durch Rohre und Spalte unter Wirkung einer Druckkraft	178
4.11	Strömungswiderstand von glatten und rauen Rohren	181
4.12	Widerstand von Stellgeräten und Formstücken	185
4.13	Geschwindigkeitsverteilung über den Rohrquerschnitt	187
4.14	Der hydraulische Durchmesser	189
4.15	Mengenstrommeßverfahren	191
	a) Die Wichtigkeit der Aufgabe führte zu einer Vielzahl von Verfahren	191
	b) Düsen und Blenden	192
	c) Schwebekörper-Durchflußmesser	193
	d) Pitot-Rohr und Staurohr	195
4.16	Die Grenzschicht	197
4.17	Turbulenz	203
	a) Ablösung und Wirbelbildung	203
	b) Labilität der Trennungsfläche	204
	c) Nomenklatur und Grundlagen	205
	d) Kontinuitätssatz und Navier-Stokes-Gleichung für turbulente Strömungen	207
	e) Der Abbau der freien Turbulenz	208
	f) Die Kolmogoroff-Hypothese	210
	g) Der turbulente Freistrahle	211

4.18	Mischung – Diffusion – Reaktion	212
4.19	Mischen – Rühren – Kneten	214
4.20	Hydraulik des Rieselfilms	218
4.21	Kräfte im rotierenden System	221
4.22	Wirbel und Zyklon	224
4.23	Maschinen und Vorrichtungen für die Druckerhöhung	227
	a) Maschinen nach dem Verdrängungsprinzip	227
	b) Strömungsmaschinen	229
	c) Verschiedene Verfahren	231
4.24	Der Druckstoß	234
4.25	Netzmodelle	238

Kapitel 5 Wahrscheinlichkeitsrechnung und kinetische Gastheorie

5.1	Warum sind die Atome so klein?	242
5.2	Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik	244
5.3	Primitives Modell eines idealen Gases	248
5.4	Mischungen idealer Gase	251
5.5	Das Maxwell'sche Geschwindigkeits-Verteilungsgesetz	253
	a) Kritik des Modells von § 5.3	253
	b) Das Maxwell'sche Geschwindigkeits-Verteilungsgesetz für eine Komponente	254
	c) Das Maxwell'sche Geschwindigkeits-Verteilungsgesetz für drei Komponenten	257
5.6	Der Boltzmann-Faktor	262
	a) Gleichgewichtszustände	262
	b) Übergangs- und Reaktionsgeschwindigkeiten	268
	c) Zusammenfassung	272
5.7	Zahl der Stöße auf die Wand und Verdampfungsgeschwindigkeit	273
5.8	Die mittlere freie Weglänge	276
5.9	Viskosität, Wärmeleitung und Diffusion	278
	a) Die formale Ähnlichkeit der empirischen Gleichungen	278
	b) Die Viskosität	279
	c) Die Diffusion	280
	d) Die Wärmeleitung	281
5.10	Gleichungen für Viskosität, Wärmeleitung und Diffusion im idealen Gas	282
	a) Das einfachste Modell	282
	b) Berechnung der Wärmeleitfähigkeit	284
	c) Berechnung der Viskosität	285
	d) Berechnung des Diffusionskoeffizienten	286
	e) Temperatur- und Druckabhängigkeit von η , λ und D	286
	f) Die Kennzahlen Prandtl (Pr) und Schmidt (Sc)	287
5.11	Der Grenzfall großer freier Weglängen	289
5.12	Bemessung von Rohrleitungen für Gase bei Druck und Vakuum	294
	a) Die Dissipationsleistung	294
	b) Bereich der turbulenten Strömung	295
	c) Bereich der laminaren Strömung	296
	d) Strömung für $Re \gg D$	296
	e) Unstetigkeit an der Wand («slip flow»)	298
	f) Der Übergangsbereich für das lange Rohr mit kreisförmigem Querschnitt	299
5.13	Brown'sche Bewegung, Grenzen der Meßgenauigkeit und statistische Schwankungen	302

5.14	Die Diffusion und die Binominalkoeffizienten	305
5.15	Das Gauß'sche Fehlergesetz.	309
5.16	Kennzahlen des molekularen Gases	314

Kapitel 6 Partikeltechnologie

6.1	Die möglichen Strukturen und ihre Anwendung	317
6.2	Größenordnung von Teilchen	321
6.3	Wieviel schneller erreichen kleine Teilchen das Gleichgewicht?	324
6.4	Reduktion der Information	326
6.5	Leervolumenanteil, Lückengrad und Porosität	327
6.6	Verteilungsfunktionen	327
6.7	Angepaßte Mittelwerte	334
	a) Einleitendes Beispiel	334
	b) Der Sauter-Durchmesser und andere angepaßte Mittelwerte	335
	c) Geometrischer und harmonischer Mittelwert	337
	d) Die Bildung angepaßter Mittelwerte der kinetischen Gastheorie	337
6.8	Empirische Korn- und Tropfenverteilungsfunktionen	338
6.9	Spezifische Oberfläche und Formfaktoren	346
6.10	Oberflächenspannung	350
6.11	Spreiten, Randwinkel und Benetzung	354
6.12	Zerkleinerung	357
	a) Verfahren	357
	b) Trennarbeit fester Körper und Wirkungsgrad der Zerkleinerung	358
	c) Halbempirische Gleichungen für den Arbeitsbedarf	361
6.13	Haufwerke, Schüttungen, Packungen und Füllkörperschichten	363
6.14	Agglomerieren	366

Kapitel 7 Energie – Entropie – Exergie

7.1	Entropie als Maß der Unordnung und der Wahrscheinlichkeit	368
	a) Geordnete und ungeordnete Energie	368
	b) Die Unmöglichkeit des Perpetuum mobiles 2. Art	371
	c) Carnot-Faktor, II-Theorem und Festlegung der Temperaturskala	371
	d) Abhängigkeit der Entropie von Druck und Temperatur	373
	e) Wahrscheinlichkeit und «thermodynamische Wahrscheinlichkeit»	376
	f) Mischungsentropie	377
	g) Abhängigkeit der Entropie von richtenden Kräften	379
	h) Hydraulische und thermische Maschinen	380
	i) Entropiequellen	382
	k) Zweiter Hauptsatz und Leben	383
7.2	Das Differential dS der Entropie ist ein vollständiges (= totales) Differential	385
7.3	Thermodynamische Gleichgewichte	388
	a) Begriff des thermodynamischen Gleichgewichts	388
	b) Freie Energie und freie Enthalpie	390
	c) Zwei Phasen reiner Stoffe und Clausius-Clapeyron-Gleichung	393
	d) Mehrere Komponenten in zwei Phasen und chemisches Potential	394
	e) Gleichgewicht chemischer Reaktionen	394
	f) Gehemmte Gleichgewichte	396
	g) Gleichgewichte in Kraftfeldern	396

7.4	Gleichverteilungssatz und spezifische Wärme	398
	a) Gleichverteilungssatz der klassischen Physik	398
	b) Gleichverteilungssatz und Quantentheorie	401
	c) Schwingungen im Molekül	403
7.5	Zustandsänderungen	405
7.6	Zustandsdiagramme und Stoffdatenermittlung	409
7.7	Beziehungen zwischen den partiellen Ableitungen der Zustandsgrößen . .	416
7.8	Thermodynamischer Mittelwert der Temperatur	417
7.9	Die Exergie	419
	a) Das Wort «Exergie» bedeutet zweierlei	419
	b) Die Exergie des offenen Systems	420
	c) Die Exergiegleichung enthält viele Gleichungen als Spezialfälle	423
	d) Darstellung der Exergie im h - s -Diagramm	424
	e) Gespeicherte Exergie	426
	f) Vorteile des Rechnens mit der Exergie gegenüber dem Rechnen mit der freien Enthalpie	428
	g) Strategie der Verlustbekämpfung	430
	h) Berechnung der Verluste unter Umgehung von Exergiebilanzen	431
	i) Grenzen der Exergiebetrachtung	432
	k) Zusammenfassung	433
7.10	Die Exergiebeschaffung	434
7.11	Das Exergieflußbild	440
7.12	Wirkungsgrad, Leistungszahl und Reversibilität	442
7.13	Kältemaschine und Wärmepumpe	443
	a) Allgemeine Grundlagen	443
	b) Kaltluft- bzw. Kaltgasmaschine	446
	c) Die Kaltdampfmaschine	448
	d) Sorptionsprozesse	450
	e) Wärmepumpen	452
	f) Technische Kreisprozesse	452
7.14	Innere und äußere Verluste in Wärmeaustauschern	454
7.15	Erstes Beispiel einer thermodynamischen Analyse: Eindampfen von Salzlösungen	457
7.16	Zweites Beispiel einer thermodynamischen Analyse: Die Luftverflüssigung	463
7.17	Thermodynamik und Wirtschaftlichkeit	468
7.18	Die Leistungsbilanz einer Strömung ohne chemische Reaktion	470
7.19	Die Energiebilanz einer Strömung mit chemischer Reaktion	474
7.20	Die Entropiebilanz einer Strömung	476
7.21	Strömung durch Düsen	477
7.22	Die Mach-Zahl	482

Kapitel 8 Lokale Wärme- und Stoffübertragung

8.1	Reversible und irreversible Thermodynamik	483
	a) Langsamkeit schützt nicht vor Verlusten!	483
	b) Irreversible Thermodynamik und die Onsager'schen Reziprozitätssätze	485
	c) Grenzen der irreversiblen Thermodynamik	486
	d) Die Abhängigkeit von Strom und Kraft weitab vom Gleichgewicht . .	487
	e) Man achte auf die Größenordnung!	490
	f) Wärme- und Stoffübertragung außerhalb der Verfahrenstechnik	491

8.2	Beispiele für Stoffaustauschvorgänge	492
8.3	Grundlegende Gleichungen und Definitionen	497
8.4	Andere Definitionen von Stoffübergangskoeffizienten	502
8.5	Kennzahlen des Wärmeaustausches	506
8.6	Dimensionslose Kennzahlen des Stoffaustausches	508
8.7	Das Modell des turbulenten Austausches	509
8.8	Der Austausch in der laminaren Unterschicht	514
8.9	Gleichzeitige Berücksichtigung des Widerstandes im turbulenten Kern und in der laminaren Unterschicht	516
8.10	Weitere Annäherung an die Wirklichkeit	519
8.11	Das Temperaturprofil im Rohr in Abhängigkeit von der Prandtl-Zahl	522
8.12	Der gleichwertige Durchmesser für den Wärmeaustausch	523
8.13	Erzwingt die Fülle der Probleme den Übergang zu anderen Forschungsmethoden?	525
8.14	Gleichzeitiger Wärme- und Stoffübergang	527
8.15	Wärme- und Stoffaustausch bei stationärer freier Konvektion	530
8.16	Wärmeübergang und Druckabfall	537
8.17	Wärmeübergang bei der Kondensation	543
	a) Die Nusselt'sche Wasserhauttheorie	543
	b) Abweichungen von der Nusselt'schen Wasserhauttheorie	548
	c) Wärme- und Stoffübergang an den Film	550
8.18	Verdampfung	551
	a) Was man beobachtet	551
	b) Die homogene Keimbildung ist sehr unwahrscheinlich!	553
	c) Die heterogene Keimbildung und ihre Forcierung	557
	d) Blasenwachstum	559
	e) Relevante Größen für das Blasensieden	560
	f) Filmsieden und Krisis	562
	g) Blasensieden bei erzwungener Konvektion	562
	h) Entspannungsverdampfung und Kavitation	563
	i) Wärmerohre, Feuchtigkeitswanderung und «Suprawärmeleitung»	565
8.19	Berechnung von Durchgangskoeffizienten	566
8.20	Austausch an der Grenzfläche fluider Phasen	571
	a) Die Zweifilmtheorie	571
	b) Die Oberflächenerneuerungs- und Penetrations-Theorie	572
	c) Der «Marangoni»-Effekt	573
8.21	Wärmestrahlung	575
8.22	Beherrschung hoher Wärmestromdichten	576
	a) Wärmeübergang an flüssige Metalle	576
	b) Unterkühltes Sieden	577
	c) Wärmeübergang im Plasma	577
8.23	Anhaltswerte von Wärmeübergangskoeffizienten und Wärmestromdichten	578
8.24	Zur Systematik der Transportvorgänge	580
8.25	Knudsen-Zahl und Gleichungstyp	582

Kapitel 9 Mehrphasige Strömungsvorgänge

9.1	Überblick	584
9.2	Raumgrößen und Transportgrößen	587
	a) Zur Einführung	587
	b) Die grundlegenden Gleichungen	588
	c) Raumdichten bei Gleich- und Gegenstrom	591

XVIII Inhaltsverzeichnis

9.3	Kräfte und Kennzahlen	593
	a) Die relevanten Größen	593
	b) Die meist verwendeten Kennzahlen	596
9.4	Die umströmten starren Partikel	598
	a) Bewegungsgesetze	598
	b) Wärme- und Stoffübergang	604
9.5	Partikelschwärme	607
9.6	Absetzen, Zentrifugieren, Klassieren	612
	a) Übersicht	612
	b) Absetzen und Zentrifugieren	612
	c) Trennung aufgrund des Unterschiedes der Sinkgeschwindigkeit	614
	d) Feinstaubabscheidung	615
9.7	Strömung durch Schüttungen	616
	a) Übersicht	616
	b) Berechnung des Druckverlustes	617
	c) Berieselte Schüttichten	620
	d) Wärme- und Stoffaustausch in Schüttichten	621
9.8	Filtrieren	622
9.9	Eigentliche und generalisierte Kräfte – mechanische und thermische Trennverfahren	625
9.10	Wirbelschichten und Fließbettreaktoren	630
	a) Erscheinungsbild und grundlegende Beziehungen	630
	b) Wärme- und Stoffaustausch	634
	c) Vor- und Nachteile	634
9.11	Feststofftransport durch Rohrleitungen	636
9.12	Modellgesetze für Flugstaubsysteme	638
9.13	Zwei fluide Phasen	643
9.14	Die mit konstanter Geschwindigkeit aufsteigende Gasblase	647
9.15	Blasen- und Tropfenbildung	658
9.16	Blasenschwarm und Blasensäule	662
9.17	Wärme- und Stoffaustausch an Tropfen und Blasen	665
	a) Einzelpartikel	665
	b) Schwierigkeiten der Übertragung in die Praxis	665
	c) Experimentelle Ergebnisse	666
9.18	Gas/Flüssigkeits-Strömungen in Rohrleitungen	666
	a) Überblick und Anwendungen	666
	b) Anwendung des Impulssatzes für stationäre Bedingungen	669
	c) Berechnung der Wandreibung	671
	d) Die Gasförderpumpe	672
	e) Strömungsbilder	674
9.19	Zweiphasenströmung über Wasch- und Rektifizierböden	678
9.20	Zerstäuben	680
9.21	Emulgieren, Dispergieren und Verteilen von Gasen in Flüssigkeiten	690
9.22	Koaleszenz	693
9.23	Schäume	695

Kapitel 10 Integraler Austausch

10.1	Unmittelbarer Kontakt zwischen Stoffströmen	699
	a) Gegenstrom und Gleichstrom	699
	b) Mischformen von Gegenstrom und Gleichstrom	700
	c) Axiale Durchmischung erniedrigt das treibende Gefälle	700
	d) Ursachen der axialen Durchmischung	701
	e) Ungleichverteilung («Maldistribution»)	703

	f) Quervermischung	704
	g) Möglichkeiten der Verwirklichung	704
	h) Rückführung und Hilfsstoffverfahren	706
	i) Kontaktapparat als Vierpol	706
	k) Die chemischen Reaktoren	707
10.2	Wann darf mit dem logarithmischen Mittelwert der Differenzen des treibenden Gefälles gerechnet werden?	707
	a) Temperaturverteilung bei Gegenstrom	707
	b) Berechnung der mittleren Temperaturdifferenz	709
	c) Temperaturverteilung bei Gleichstrom	709
	d) Voraussetzungen für die Gültigkeit von Gl. 8	710
	e) Wann darf man auch beim Stoffaustausch mit logarithmischen Mittelwerten des treibenden Gefälles rechnen?	711
10.3	Bilanzgerade, Gleichgewichtskurve und das Stufenmodell	712
	a) Der Gedankenversuch mit dem «Ölkühler»	712
	b) Wann ergibt sich beim Stoffaustausch eine Bilanzgerade?	714
	c) Gleichgewichtskurven für den Stoffaustausch	716
	d) Die Stufenkonstruktion	718
	e) Einige Hinweise zur Wirtschaftlichkeitsberechnung	719
	f) Das Verstärkungsverhältnis	720
10.4	Das stetige Modell für Kolbenströmung ohne axiale Mischung	723
	a) Der stetige Stoffaustausch in der Füllkörperkolonne	723
	b) Stoffdurchgangsgleichung mit den Differenzen der Molanteile als treibendem Gefälle	724
	c) Die Integration der Bilanzgleichung	725
10.5	Mittlere Verweilzeit, Verweilzeitspektrum und Übergangsfunktion	726
	a) Warum müssen wir die Verweilzeit beachten?	726
	b) Begriff und Definitionen	729
	c) Mittlere Verweilzeit und dimensionsloses Verweilzeitspektrum	731
	d) Berechnung des Spektrums der idealen Rührkesselnkaskade	733
	e) Die Übergangsfunktion	736
	f) Spektren und Übergangsfunktionen von Rohrströmungen	738
	g) Die Gefahren von Toträumen	740
	h) Frequenzdarstellung des Verweilzeitverhaltens	740
	i) Übertragungsverhalten und Regelungstechnik	741
	k) Kurze Verweil-, Anwärm- und Abkühlzeiten	741
	l) Kann man vom absatzweisen Laboratoriumsversuch auf das kontinuierliche Verfahren schließen?	742
	m) Anwendung auf Nachbargebiete	743
10.6	Berücksichtigung der axialen Durchmischung	745
10.7	Kinetische Trennverfahren	748
10.8	Klassifikation der thermischen Trennverfahren	750
	a) Das Ziel	750
	b) Die beiden Merkmalgruppen: Gleichgewicht – Kinetik und Zahl der Phasen	751
	c) Gibt es – streng genommen – drei- und mehrphasige Verfahren?	752
	d) Zweiphasige Trennverfahren	752
	e) Hilfsstoffverfahren	754
	f) Gegenstromverfahren	755
	g) Weitere Bemerkungen zu Tabelle 1	756
	h) Auswirkung der Eigenschaften der Aggregatzustände auf die Auslegung der Apparate	757
	i) Komprimierte Gase als Hilfsstoffe	759
	k) Einphasige Verfahren	760

Kapitel 11 Zeitabhängige Vorgänge und Instabilitäten

11.1	Was bringt dieses Kapitel?	762
11.2	Die beiden Typen des asymptotischen Ausgleichs	763
	a) Das verallgemeinerte Ohm'sche Gesetz	763
	b) Aufbau eines Widerstandes	764
	c) Eine Erweiterung der Dimensionsanalyse	765
	d) Aufwachsen einer Eisschicht an einer gekühlten Fläche	765
	e) Abbau einer dem Sättigungsdefizit proportionalen «Kraft»	767
11.3	Instationäre Wärmeleitung und Diffusion	769
	a) Die grundlegenden Gleichungen	769
	b) Anfangs- und Randbedingungen	770
	c) Integration durch Zeitfunktion mal Ortsfunktion	771
	d) Das Auseinanderfließen der eindimensionalen Quelle	772
	e) Instationäre Wärmeleitung im Halbraum	773
11.4	Exponentielles Wachstum – Explosion – Detonation	779
11.5	Stabilität von Strömungen	781
	a) Zeitliche Stabilität.	781
	b) Fallende und steigende Charakteristik	785
	c) Wann bilden sich ebene und wann gezahnte Phasengrenzflächen?	787
	d) Kippschwingungen	789
11.6	Hysterese	790
	a) Ein Modell der Hysterese	790
	b) Hysterese beim Füllen und Entleeren von Kapillaren	792
	c) Hysterese bei der Kapillarkondensation	792
	d) Der an einer geneigten Wand haftende Tropfen	793
	e) Hysterese und Gedächtnis	794
11.7	Nachwirkung und Dämpfung	795
11.8	Keimbildung und Wachstum	798
	a) Die Vielfalt der Erscheinungen	798
	b) Die Herstellung des metastabilen Zustandes	799
	c) Die Theorie der homogenen Keimbildung im unterkühlten Dampf	800
	d) Die heterogene Keimbildung	800
	e) Verhinderung der Keimbildung und glasiges Erstarren	802
	f) Wachstum	803
	g) Ein Blick über die Grenzen	804

Kapitel 12 Erscheinungsformen der Materie

12.1	Bindung, thermische Molekularbewegung und äußere Kräfte	805
	a) Vom Nernst'schen Wärmesatz zum idealen Gasgesetz	805
	b) Äußere Kräfte und Bindungskräfte	807
	c) Phasenübergänge	809
12.2	Mechanische Eigenschaften des elastischen, festen Körpers	810
	a) Kräfte und Spannungen	810
	b) Skalar und Vektor	811
	c) Der Spannungstensor	811
	d) Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm	815
	e) Das verallgemeinerte Hooke'sche Gesetz	818
	f) Beziehungen zwischen den elastischen Konstanten isotroper Körper	818
	g) Dauerfestigkeit	819
	h) Die für uns wichtigsten Werkstoffklassen	821

12.3	Thermodynamik des festen Körpers	822
	a) Wärmespannungen	822
	b) Arbeitsvermögen des festen Körpers	826
	c) Reversible Temperaturänderungen bei der elastischen Dehnung fester Körper	828
12.4	Festigkeitsannahmen	832
12.5	Struktureigenschaften und Verbundwerkstoffe	834
	a) Innere und äußere Kerben	834
	b) Druckspannungen an der Oberfläche erhöhen die Festigkeit	836
	c) Faserverstärkte Werkstoffe	837
12.6	Anisotropie	838
12.7	Rheologie	845
	a) Übersicht über das Gebiet	845
	b) Kennzeichnung der rheologischen Stoffeigenschaften	847
	c) Modelle rheologischer Körper	850
	d) Molekularkinetische Deutung des rheologischen Verhaltens	852
	e) Strömung durch Leitungen	854
	f) Der Toms-Effekt	858
	g) Rheologische Kuriosa	859
12.8	Druck und Strömung von Schüttgütern in Bunkern	860
12.9	Austauschvorgänge in den 3 Aggregatzuständen	863
	a) Struktur der Flüssigkeiten	863
	b) Die Transportmittel	866
12.10	Vakuumtechnik	869
12.11	Hochdrucktechnik	872
12.12	Die Oberfläche fester Körper	873
12.13	Schlußwort	875
	Anhang 1 Lösungen der Aufgaben	876
	Anhang 2 Die wichtigsten Kennzahlen	908
	Autorenverzeichnis	911
	Sachverzeichnis	923