

A.Mersmann

Thermische Verfahrens- technik



Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

A. Mersmann

Thermische Verfahrenstechnik

Grundlagen und Methoden

Mit 299 Abbildungen

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1980

Professor Dr.-Ing. ALFONS MERSMANN

Lehrstuhl B für Verfahrenstechnik
der Technischen Universität München

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Mersmann, Alfons:

Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Methoden / A. Mersmann.
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1980

ISBN 3-540-09903-4 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 0-387-09903-4 Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Weg und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© Springer-Verlag Berlin/Heidelberg 1980

Printed in GDR

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bindearbeiten: K. Tritsch, Würzburg

2362/3020 — 543210

Vorwort

Dieses Buch entstand auf Anregung des Springer-Verlages. Als Ziel wurde eine zwar kurze, aber möglichst allgemeine Darstellung der Thermischen Verfahrenstechnik angestrebt. Nun gibt es einerseits ausgezeichnete Literatur über die physikalischen Grundlagen der Verfahrenstechnik und andererseits umfassende Einzelbeschreibungen von thermischen Grundverfahren. Deshalb wurde versucht, die Grundverfahren auf der Basis der Thermodynamik, der Wärme- und Stoffübertragung und der Fluidodynamik mit der Absicht übergreifend darzustellen, dem Praktiker erste Informationen über die Auswahl, die Auslegung und den Betrieb von Apparaten zu geben. Dabei sollten das Gemeinsame der Thermischen Verfahrenstechnik und ihre Orientierung an den Grundlagen betont werden.

Mit Rücksicht auf die knappe Darstellung werden beim Studenten gewisse ingenieur- und naturwissenschaftliche Vorkenntnisse vorausgesetzt. Dem Praktiker soll gezeigt werden, wie sich grundlagenorientierte Berechnungsansätze für fluiddynamische und kinetische Vorgänge in bekannten und neuen Apparaten finden lassen. Denn der Überblick geht angesichts einer kaum überschaubaren Literaturfülle zuweilen verloren.

Im einzelnen werden die thermischen Gleichgewichte in Kap. 1, die Sätze der Erhaltung von Stoff und Energie in Kap. 2, die Fluidodynamik in Kap. 3 und die Wärme- und Stoffübertragung in Kap. 4 vorgestellt. Diese Kapitel enthalten in knapper Fassung nur Angaben, welche für die Thermische Verfahrenstechnik wesentlich sind. Die große Bedeutung der Fluidodynamik ergibt sich daraus, daß alle Apparate der thermischen Trenntechnik einphasig, häufig aber zwei- oder mehrphasig durchströmt werden. Bei der Wärme- und Stoffübertragung wird unterstellt, daß die Analogie dieser Übertragungsvorgänge gültig ist. Hierdurch gelingt zwar eine knappe Darstellung, doch wird die allgemeine Problematik der kinetischen Ausgleichsvorgänge nur angedeutet. Dem Leser soll gezeigt werden, wie sich Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten für einfache, in zahlreichen Apparaten ablaufende Übertragungen berechnen oder mindestens abschätzen lassen.

Die den einzelnen Grundverfahren gewidmeten Kap. 5 bis 10 sind durch Kompromisse bezüglich der Breite und Tiefe der Darstellung gekennzeichnet. Es wurde versucht, kurz den Weg der Auslegung eines Apparates bezüglich des Durchmessers und der Länge oder Höhe anzudeuten. Je nach eigenem Forschungsschwerpunkt findet der Leser unterschiedlich detaillierte An-

gaben. Die Auslegung und Konstruktion richtet sich stets nach dem Stoffverhalten. Hierauf wird an einigen Stellen hingewiesen.

Die Formelzeichen wurden in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2761 gewählt und möglichst konsequent angewendet. Leider hat dies zu Abweichungen von z. T. eingeführten Bezeichnungen geführt. Eine einheitliche Nomenklatur auf dem Gebiet der Thermischen Trenntechnik ist erwünscht, um das schnellere Verständnis auf Tagungen und in der Literatur zu fördern.

Es ist mir eine angenehme Aufgabe, vielen zu danken, die direkt oder indirekt zum Buch beigetragen haben. Einige möchte ich mit Namen nennen. Die Grundlagen der Verfahrenstechnik haben mir die Professoren H. Hausen (Universität Hannover) und H. Glaser (früher Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen, heute Universität Stuttgart) vermittelt. Auch meine Intensivtätigkeit hat zum Buch beigetragen. Dann war ich in der glücklichen Lage, eine ausgezeichnete Vorlesung von meinem Lehrstuhlvorgänger, Professor F. Kneule übernehmen zu können. In den siebziger Jahren wurde die Vorlesung „Thermische Verfahrenstechnik“ unter Hilfe zahlreicher wissenschaftlicher Mitarbeiter stetig ergänzt. Einige haben aktiv im Anfangsstadium des Buches mitgewirkt:

Dr.-Ing. K. Martin: Kap. 9 „Adsorption“,

Dr.-Ing. D. Seifert: Kap. 6 „Kristallisation“,

Prof. Dr.-Ing. habil. J. Stihlmair: Kap. 7 „Rektifikation und Absorption“,

Dr.-Ing. E. Weisshuhn: Kap. 8 „Extraktion“,

Dr.-Ing. J. B. Zech: Kap. 4 „Wärme- und Stoffübertragung“.

Die Bilder des Buches wurden am Lehrstuhl B für Verfahrenstechnik gezeichnet. Herr Dipl. Ing. A. Munt hat sich intensiv um deren einheitliche Darstellung sowie um eine konsequente Ausrichtung des Werkes bemüht. Die Zeichnungen wurden zum überwiegenden Teil von Herrn cand. ing. R. Ploß ausgeführt. Frau Baumann hat mit gleichbleibender Geduld den Text mit den Gleichungen mehrmals geschrieben. Die Entwürfe wurden von den wissenschaftlichen Mitarbeitern kritisch gelesen und mit Verbesserungsvorschlägen versehen. Ihnen allen sei recht herzlich gedankt.

Mein Dank gilt auch dem Springer-Verlag für seine Geduld und die gute Ausstattung des Buches.

München, im Mai 1980

A. Mersmann

Symbolverzeichnis

Formelgrößen, lateinische Buchstaben

A	m^2	Fläche, Austauschfläche
a	m^2/m^3	volumenbezogene Phasengrenzfläche
a	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
a	m	Amplitude
a	—	Aktivität
B	$kg, kmol$	Sumpf (Boden-) produkt
\dot{B}	$kg/s, kmol/s$	Sumpfproduktstrom
B	$1/(m^4 s)$	Entstehungsrate
B_0	$1/(m^3 s)$	Keimbildungsrate
b	m	Breite
C, c	$kmol/m^3, kg/m^3$	Konzentration
C	$kJ/(kmol K)$	molare Wärmekapazität
C_s, C_1, C_2	$W/(K^4 m^2)$	Strahlungszahlen
c	$kJ/(kg K)$	spezifische Wärmekapazität
c_p	$kJ/(kg K)$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c_v	$kJ/(kg K)$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
c_w	—	Widerstandsbeiwert
D	$kg, kmol$	Kopfprodukt
\dot{D}	$kg/s, kmol/s$	Kopfproduktstrom
D	kg	Heizdampf
\dot{D}	kg/s	Heizdampfstrom
D	m	Durchmesser (größerer-, Apparate-)
D	$1/(m^4 s)$	Verlustrate
D	m^2/s	Diffusionskoeffizient
D_{eff}	m^2/s	effektiver Diffusionskoeffizient
D_E	m^2/s	Dispersionskoeffizient
d	m	Durchmesser (kleinerer-, Kugel-, Rohr-, Rührer-)
d_h	m	hydraulischer Durchmesser
d_0	m	Lochdurchmesser
d_p	m	Partikeldurchmesser
d_{32}	m	Sauterdurchmesser
E	kJ	Energie
E	—	Beschleunigungsfaktor

E_{GM}	—	Bodenverstärkungsverhältnis (<i>G</i> -Phase)
E_{OG}	—	Punktverstärkungsverhältnis
E_{LM}	—	Bodenverstärkungsverhältnis (<i>L</i> -Phase)
E/G	m^3/m^3	Mitreibrate
F	kg, kmol	Zulauf (feed)
\dot{F}	kg/s, kmol/s	Zulaufstrom
F	kJ	freie innere Energie
F_i	kJ/kmol	partielle molare freie innere Energie
F	$(m/s) \sqrt{kg/m^3}$	<i>F</i> -Faktor
F	N	Kraft
f	1/s	Frequenz
f	m^2	Querschnittsfläche
f	bar	Fugazität
f	kJ/kg	spezifische freie innere Energie
f	—	Freiheitsgrad
j	—	Formfaktor
G	kJ	freie Enthalpie
G_i	kJ/kmol	partielle molare freie Enthalpie
G	m/s	Kristallwachstumsgeschwindigkeit
G	kg, kmol	Gas (<i>G</i> -Phase)
\dot{G}	kg/s, kmol/s	Gasstrom (<i>G</i> -Phasenstrom)
G	m^3/s	Gasvolumenstrom
g	m/s^2	Erdbeschleunigung ($9,81 m/s^2$)
g	kJ/kg	spezifische freie Enthalpie
H	m	Bodenabstand, Höhe
H	kJ	Enthalpie
H	kJ/kmol	molare Enthalpie
H_i	kJ/kmol	partielle molare Enthalpie
ΔH_i	kJ/kmol	partielle molare Mischungsenthalpie
ΔH_{iB}	kJ/kmol	partielle molare Bindungsenthalpie
He	$\frac{N/m^2}{kmol/kmol}$	Henry-Koeffizient
H_G	m	Höhe einer gaseitigen Übergangseinheit
H_L	m	Höhe einer flüssigkeitsseitigen Übergangseinheit
H_{OG}	m	Höhe einer Übergangseinheit bezogen auf die Gasseite
H_{OL}	m	Höhe einer Übergangseinheit bezogen auf die Flüssigkeitsseite
h	kJ/kg	spezifische Enthalpie
$\overline{\Delta h}$	kJ/kg	spezifische integrale Lösungsenthalpie
Δh	kJ/kg	spezifische differentielle Lösungsenthalpie
h	m	Höhe, Abstand
h_z	m	Auslaufhöhe am Schacht
h_p	m	Druckverlusthöhe eines Bodens
h_L	m	Höhe der klaren Flüssigkeit

h_w	m	Wehrhöhe
Δh_{LG}	kJ/kg	spezifische Verdampfungsenthalpie
Δh_{SL}	kJ/kg	spezifische Schmelzenthalpie
Δh_{SG}	kJ/kg	spezifische Sublimationsenthalpie
I	kg m/s	Impuls
K	—	Gleichgewichtskonstante (y^*/x)
k	J/K	Boltzmannkonstante ($1,38054 \cdot 10^{-23}$ J/K)
k	W/(m ² s)	Wärmedurchgangskoeffizient
k	kmol/(m ² s)	Stoffübergangskoeffizient
k, k_r	hängt von der Reaktionsordnung ab	Geschwindigkeitskonstante, Reaktionskoeffizient
k	—	Zahl der Komponenten
L	kg, kmol	Flüssigkeit (L -Phase)
\dot{L}	kg/s, kmol/s	Flüssigkeitsstrom (L -Phasenstrom)
L	m	Länge
l	m	Länge
l_L	m	Flüssigkeitsweg
l_w	m	Wehrlänge
M	kg, kmol	Masse, Stoffmenge (einer Mischung)
\dot{M}	kg/s	Massenstrom
\bar{M}	kg/kmol	Molmasse, molare Masse
\dot{m}	kg/(m ² s)	Massenstromdichte
m	kg/kg, kmol/kmol	Steigungsmaß der Gleichgewichtslinie
m	—	Zahl der Ionen
N	—	Zahl der Teilchen (Kristalle)
\dot{N}	1/s	Zahl der Teilchen (Kristalle) pro Zeit
N_A	1/mol	Avogadro-Konstante (= Loschmidt-Konstante $6,022 \cdot 10^{23}$ 1/mol)
N, N_O	—	Zahl der Übergangseinheiten
n	—	Zahl der Trennstufen
n	1/s	Drehzahl
n, N	kmol	Stoffmenge
\dot{n}	kmol/(m ² s)	Stoffmengenstromdichte
n	1/m ⁴	Anzahldichte
P	W	Leistung
p	—	Zahl der Phasen
p	bar	Gesamtdruck
p_c	bar	kritischer Druck
p_i	bar	Partialdruck
p^0	bar	Sättigungsdruck (Dampfdruck)
p_r	—	reduzierter Druck
Δp	bar	Druckdifferenz, Druckverlust
Δp^0	bar	Dampfdruckerniedrigung
Q	kJ	Wärme
\dot{Q}	J/s oder W	Wärmestrom
q	kJ/kg	spezifische Wärme

\dot{q}	J/(m ² s) oder W/m ²	Wärmestromdichte
q	kJ/kg	spezifische Phasenänderungswärme
Q	kJ/kmol	molare Wärme
\dot{Q}_R	W	Wärmestrom durch Strahlung
R	kg, kmol	Rückfluß
\dot{R}	kg/s, kmol/s	Rückflußstrom
R	m	Rohr-, Kugelradius
R	kJ/(kg K)	Gaskonstante
\mathbf{R}	kJ/(kmol K)	allgemeine Gaskonstante ($\mathbf{R} = 8,31441$ kJ/(kmol K))
R	kJ/kmol	molare Verdampfungsenthalpie
r	kJ/kg	spezifische Verdampfungsenthalpie
r	m	Radius
S	kg, kmol	Feststoff
\dot{S}	kg/s, kmol/s	Feststoffstrom
S	kg, kmol	Seitenprodukt
\dot{S}	kg/s, kmol/s	Seitenproduktstrom
S	kJ/K	Entropie
S_i	kJ/(kmol K)	partielle molare Entropie
s	kJ/(kg K)	spezifische Entropie
s	m	Dicke
T	K	absolute Temperatur
T_c	K	kritische Temperatur
T_r	—	reduzierte Temperatur
T_s	K	Schmelztemperatur eines reinen Stoffes
T_b	K	Siedetemperatur bei Normaldruck
t	s	Zeit
t	m	Teilung
U	kJ	innere Energie
U_i	kJ/kmol	partielle molare innere Energie
u	kJ/kg	spezifische innere Energie
u	m/s	Geschwindigkeit (x -Koordinate)
V	m ³	Volumen
\dot{V}	m ³ /s	Volumenstrom
V_i	m ³ /kmol	partiell molares Volumen
v	m ³ /kg	spezifisches Volumen
v	—	Rücklaufverhältnis
v	m/s	Geschwindigkeit (y -Koordinate)
\dot{v}	m ³ /(m ² s)	Volumenstromdichte
\dot{v}_L	m ³ /(m ² s)	Berieselungsdichte
\bar{v}	m/s	mittlere Verschiebegeschwindigkeit einer Kristallfläche
W	kJ	Arbeit
w	m ² /s ² oder $\frac{Ws}{kg}$	spezifische Arbeit
w	m/s	Geschwindigkeit (z -Koordinate)

w	m/s	Geschwindigkeit bezogen auf den Querschnitt des leeren Apparates
w_0	m/s	Geschwindigkeit in einer Öffnung (Loch, Blende, Düse)
w_s	m/s	Sink- bzw. Steigggeschwindigkeit eines Einzelpartikels
w_{ss}	m/s	Sink- oder Steigggeschwindigkeit eines Partikelschwarms
w_{rel}	m/s	mittlere Relativgeschwindigkeit eines Schwarmes
X	kg/kg, kmol/kmol	Massen-, Molbeladung
x	kg/kg, kmol/kmol	Massen-, Molanteil
x	m	karthesische Koordinate
x	m	Teilchenabmessung
Y	kg/kg, kmol/kmol	Massen-, Molbeladung
y	kg/kg, kmol/kmol	Massen-, Molanteil
y	m	karthesische Koordinate
Z	—	Realgasfaktor
Z	m	wirksame Apparatelänge
Z'	m	Höhe einer Zweiphasenschicht auf einem Boden
z	kg/kg, kmol/kmol	Massen-, Molanteil von zwei Phasen
z	m	karthesische oder laufende Koordinate

Formelzeichen, griechische Buchstaben

α	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient
α	—	relative Flüchtigkeit
α	—	Dissoziationsgrad
α_i	m ³ /(m ³ bar)	Bunsenscher Absorptionskoeffizient
β	m/s	Stoffübergangskoeffizient
β	1/K	räumlicher Ausdehnungskoeffizient
β_h	m/s	Stoffübergangskoeffizient bei halbdurchlässiger Grenzfläche
γ	—	Aktivitätskoeffizient
δ	m	Dicke, Filmdicke
ε	—	Leistungszahl
ε	m ² /s ³ oder W/kg	massebezogene Leistung
ε	m ³ /m ³	relatives Lückenvolumen, Porosität, Volumenanteil
ε_c	m ³ /m ³	Volumenanteil der kontinuierlichen Phase
ε_d	m ³ /m ³	Volumenanteil der dispersen Phase
ζ	—	Widerstandszahl
η	kg/(m s)	dynamische Viskosität
η	—	dimensionslose Gutsfeuchte
η_d, η_r	—	Nutzfaktoren

ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Celsius-Temperatur
\varkappa	m^2/s	Feuchteleitkoeffizient
Λ	m	mittlere freie Weglänge
Δ	kJ/kmol	molare Phasenänderungswärme
Λ	—	Wilson-Parameter
λ	$\text{W}/(\text{m K})$	Wärmeleitfähigkeit
λ	—	Rohrreibungszahl
μ	kJ/kmol	chemisches Potential
μ	—	Kontraktionszahl
μ_{D}	—	Wegfaktor oder Diffusionswiderstands- zahl
ν	m^2/s	kinematische Viskosität
ξ	—	Widerstandszahl
π	—	3,14
π	—	Pol
ρ	kg/m^3	Dichte
σ	$\text{J}/\text{m}^2, \text{N}/\text{m}$	flächenbezogene Grenzflächenenergie (Grenzflächenspannung)
σ'	$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$	Verdunstungskoeffizient
τ	$\text{N}/\text{m}^2, \text{Pa}$	Schubspannung
τ	s	Verweilzeit, Mischzeit
Φ	m^2/s	Geschwindigkeitspotential
φ	—	relative Sättigung (Partialdruck- verhältnis)
φ	—	relativer freier Querschnitt
φ	—	Fugazitätskoeffizient

Strömungskennzahlen

$Ar = \frac{d^3 g \Delta \rho}{v_c^2 \rho_c} = \frac{Re^2}{Fr^*}$	Archimedes-Zahl
$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$	Euler-Zahl
$Fo_E = \frac{D_E t}{L^2}$	Dispersions-Fourier-Zahl
$Fr = \frac{w^2}{dg}$	Froude-Zahl
$Fr^* = \frac{w^2 \rho_c}{dg \Delta \rho}$	modifizierte Froude-Zahl im dispersen Zweiphasensystem
$Gal = \frac{d^3 g}{r^2} = \frac{Re^2}{Fr}$	Galilei-Zahl
$Re = \frac{wd \rho}{\eta}$	Reynolds-Zahl

$We = \frac{w^2 d_0}{\sigma}$	Weber-Zahl
$\frac{We}{Fr} = \frac{d^2 \rho g}{\sigma}$	Bond-Zahl (in US-Literatur)
$\frac{We}{Fr^*} = \frac{d^2 \Delta \rho g}{\sigma}$	modifizierte Kennzahl im dispersen Zweiphasensystem
$Sr = \frac{L f}{w}$	Strouhal-Zahl

Kennzahlen der Wärme- und Stoffübertragung

$Fo = \frac{at}{s^2}$	Fourier-Zahl der Wärmeübertragung
$Fo^* = \frac{Dt}{s^2}$	Fourier-Zahl der Stoffübertragung
$Gr = \frac{L^3 g \Delta \vartheta \beta}{v_c^2}$	Grashof-Zahl der Wärmeübertragung
$Le = \frac{a}{D}$	Lewis-Zahl
$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$	Nusselt-Zahl
$Pe = \frac{wL}{a}$	Peclet-Zahl
$Ph = \frac{c_L(\vartheta_G - \vartheta_0)}{\Delta h_{LG}}$	Phasenumwandlungszahl
$Pr = \frac{\nu}{a}$	Prandtl-Zahl
$Sc = \frac{\nu}{D}$	Schmidt-Zahl
$Sh = \frac{\beta L}{D}$	Sherwood-Zahl

Indices

a	das „andere“ Apparateende	c	kritischer Punkt
b	Siedepunkt (boiling point)	d	disperse Phase
B	Sumpfprodukt	D	Kopfprodukt
c	kontinuierliche Phase	e	das „eine“ Apparateende

eff	effektiv	0	Sättigungszustand, reiner Stoff
F	Zulauf	0	Durchtrittsöffnung
G	energiereiche Phase, Gas	p	Partikel
G	gasförmig, gaseitig	r	reduziert (auf kritischen Zustand bezogen)
ges	gesamt	rel	Relativ-
h	hydraulisch	real	real
h	halbdurchlässig	S	Feststoff
I	Grenzfläche (interface)	S	Schmelzpunkt
i	innen	s	Sink-, Steig-
i	Komponente i	ss	Sink-, Steig- eines Schwarms
id	ideal	w	Widerstands-
L	energiearme Phase, Flüssigkeit	x	} in Richtung der } karthesischen Koordinaten
L	Lösung	y	
L	flüssig, flüssigkeitsseitig	z	
L	Länge	α	Anfang (zeitlich)
m	mittel	ϑ	thermisch
max	maximal	ω	Ende (zeitlich)
min	minimal	∞	im Unendlichen
n	Stufe n , Boden n	*	Gleichgewichtszustand
O	Oberfläche		
O	„overall“		

Mathematische Operatorzeichen

d	gewöhnliches Differential
∂	partiell Differential
Δ	Divergenz
$\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}$	Nabla-Operator
grad $\varphi = \nabla \varphi$	Gradient von φ
div $\mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{v}$	Divergenz von \mathbf{v}
rot $\mathbf{v} = \nabla \times \mathbf{v}$	Rotation von \mathbf{v}
$\Delta \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}$	Laplace-Operator

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	XIII
Einleitung	1
1 Phasengleichgewichte	2
1.1 Verhalten reiner Stoffe	2
1.1.1 Dampfdruck reiner Stoffe	4
1.1.2 Dampfdruck reiner Stoffe an stark gekrümmten Flüssigkeitsoberflächen	8
1.2 Verhalten von binären Gemischen	9
1.2.1 Dampfdruck binärer verdünnter Lösungen	11
1.2.2 Gefrierpunktniedrigung	16
1.2.3 Das Raoultsche Gesetz	17
1.2.4 Das Henrysche Gesetz	19
1.3 Verhalten idealer Gemische	20
1.4 Reales Verhalten von Flüssigkeitsgemischen	26
1.4.1 Die Gibbs-Duhem-Gleichung	28
1.4.2 Phasenumwandlungs-, Mischungs- und Bindungswärmen	34
1.4.3 Exzeßgrößen	39
1.4.4 Aktivität und Aktivitätskoeffizient	40
1.4.5 Fugazität und Fugazitätskoeffizient, Gleichgewichtskonstante	41
1.5 Flüssigkeit/Flüssigkeit-Systeme	43
1.6 Flüssigkeit/Feststoff-Systeme	47
1.7 Sorptionsgleichgewichte	49
1.8 Enthalpie-Konzentrations-Diagramm	52
2 Erhaltungssatz für Masse, Stoff und Energie	61
2.1 Stofferhaltungssatz für den stationären und instationären Fall	61
2.1.1 Die einstufige Apparatur	61
2.1.2 Die mehrstufige Apparatur	67

2.2	Energieerhaltungssatz für den stationären und instationären Fall	67
2.2.1	Energiebilanz der einstufigen Apparatur für den stationären Fall	68
2.2.2	Energiebilanz eines einstufigen Verdampfers für den instationären Fall	72
2.3	Erhaltungssätze für den Stoff und die Energie kombinierter Apparaturen	72
2.3.1	Verdampfer-Kristallisator-Kombination	73
2.3.2	Extraktor-Rektifikator-Kombination	74
2.3.3	Trockner-Adsorber-Kombination	76
2.4	Strömungsvorgänge und Energieerhaltungssatz	77
3	Grundlagen der Ein- und Mehrphasenströmung	79
3.1	Einige Gesetze der Einphasenströmung	80
3.1.1	Massenerhaltungssatz und Kontinuitätsgleichung	80
3.1.2	Wirbelfreie Bewegung und Wirbelbewegung	81
3.1.3	Das zähe Fluid	81
3.1.4	Navier-Stokessche Bewegungsgleichung, Euler- und Bernoulli-Gleichung	82
3.1.5	Laminare und turbulente Strömung in Rohren und Öffnungen	84
3.1.6	Das turbulente Strömungsfeld	88
3.1.7	Molekularströmung und Molekulardiffusion	89
3.1.8	Filmströmung an senkrechten Wänden	91
3.2	Gegenstrom von Gas und Flüssigkeit im senkrechten Rohr	93
3.3	Ähnlichkeitstheorie und Kennzahlen, Bedeutung der Kennzahlen	94
3.4	Kennzeichen von Partikelsystemen	96
3.5	Durchströmte Festbetten	99
3.6	Strömung in dispersen Zweiphasensystemen aufgrund einer Dichtedifferenz $\Delta\rho$	100
3.6.1	Die Endsteig- oder Endfallgeschwindigkeit w_s einzelner Teilchen	102
3.6.2	Volumenanteil der dispersen Phase in Fließbetten, Sprühkolonnen sowie Blasen- und Tropfensäulen	105
3.7	Erzwungene ein- und zweiphasige Großraumströmungen in Rührwerken	109
4	Wärme- und Stoffübertragung	114
4.1	Wärme- und Stoffübertragung bei hintereinandergeschalteten Widerständen	117
4.2	Wärme- und Stoffübertragung im Gegenstrom	122

4.3	Wärme- und Stoffübertragung bei erzwungener Strömung (Platte und Rohr)	125
4.4	Analogie zwischen Wärme- und Stoffübertragung	128
4.5	Wärme- und Stoffübertragung in Partikelsystemen	129
4.6	Wärme- und Stoffübertragung bei freier Konvektion	131
4.7	Wärmeübertragung zwischen einer senkrechten Fläche und einem dispersen System, in welchem die Strömungsvorgänge durch den Dichteunterschied $\Delta\rho$ bestimmt sind	133
4.8	Instationäre Wärme- und Stoffübertragung	134
4.9	Wärmeübergang an kondensierende Dämpfe	138
4.10	Wärmeübergang bei der Verdampfung von reinen Flüssigkeiten	140
5	Verdampfen	145
5.1	Verdampferbauarten	145
5.2	Vielstufenverdampfung	149
5.3	Auslegung von Verdampfern	155
5.4	Auslegung von Kondensatoren	158
5.5	Brüdenverdichtung (Wärmepumpe)	159
5.6	Einige Verdampfungsverfahren (Meerwasserentsalzung)	160
6	Kristallisieren	162
6.1	Kristallisationsapparate	162
6.2	Kristallstruktur	168
6.3	Kristallisation als Grundverfahren	168
6.4	Bilanz des einstufigen Kristallisators	169
6.4.1	Stoffbilanz des einstufigen Kristallisators	169
6.4.2	Energiebilanz des einstufigen Kristallisators	172
6.5	Verfahrenstechnische Auslegung von Kristallisatoren	174
6.5.1	Kristallisationskinetik	175
6.5.2	Kornzahlkontrolle	181
6.6	Strömungs- und wärmetechnische Auslegung von Kristallisatoren	183
6.7	Spezielle Kristallisationsverfahren	184
6.7.1	Mehrstufige Gegenstrom-Vakuum-Kristallisationsanlage	184
6.7.2	Fraktionierende Kristallisation	184
6.7.3	Adduktive Kristallisation	185
6.7.4	Verdrängungskristallisation	186
6.7.5	Sublimation und Desublimation	186
6.7.6	Meerwasserentsalzung durch Gefrierverfahren	186

7 Destillieren, Rektifizieren, Absorbieren.	188
7.1 Rektifizier- und Absorptionsapparate	191
7.2 Die einstufige Destillationsapparatur (Differentialdestillation und Partialkondensation).	192
7.3 Kontinuierliche Rektifikation und Absorption binärer Gemische.	194
7.3.1 Stoffbilanz um eine Rektifizierkolonne	194
7.3.2 Stoffbilanz um eine Absorptions- oder Desorptionskolonne.	198
7.3.3 Einspeise- und Entnahmestellen von Kolonnen.	201
7.3.4 Zustand des zugeführten Gemisches bei der Rektifikation	203
7.3.5 Nichtisotherme Absorption	205
7.3.6 Wahl eines günstigen L/G -Verhältnisses	206
7.4 Rektifikation und Absorption von Vielstoffgemischen.	206
7.4.1 Kontinuierliche Rektifikation idealer Vielstoffgemische.	207
7.4.2 Kontinuierliche Rektifikation realer Vielstoffgemische	208
7.4.3 Die kontinuierliche Vielstoffabsorption	210
7.4.4 Rektifikation idealer ternärer Gemische im Dreieckskoordinatennetz	211
7.5 Trennvorgänge unter Berücksichtigung von Stoff- und Enthalpiebilanzen	213
7.5.1 Verhältnisse bei der Rektifikation	213
7.5.2 Verdunsten von Wasser im Kühlturm.	218
7.6 Auslegung von Kolonnenböden für Gas/Flüssigkeit-Kontaktapparate	219
7.6.1 Struktur der Zweiphasenschicht	222
7.6.2 Minimale Gasbelastung	223
7.6.3 Maximale Flüssigkeitsbelastung	223
7.6.4 Höhe und Flüssigkeitsinhalt der Zweiphasenschicht.	224
7.6.5 Phasengrenzfläche	225
7.7 Verstärkungsverhältnis von Bodenkolonnen.	226
7.7.1 Zusammenhang zwischen Verstärkungsverhältnis und Zahl der Übergangseinheiten.	228
7.8 Auslegung von Füllkörperkolonnen	232
7.8.1 Berechnung des Kolonnendurchmessers	233
7.8.2 Stoffübergang in Füllkörperkolonnen	236
7.9 Sonderverfahren der Rektifikation.	239
7.9.1 Azeotrope Rektifikation.	240
7.9.2 Extraktive Rektifikation	242
7.9.3 Schonende Rektifikation	244
7.9.4 Trägerdampfdestillation.	244
7.10 Einige Verfahren der physikalischen und chemischen Absorption	246