

Alfons Mersmann · Matthias Kind ·
Johann Stichtlmair

Thermische Verfahrenstechnik

Grundlagen und Methoden

2., wesentlich erweiterte und aktualisierte Auflage
mit 428 Abbildungen

 Springer

Professor Dr.-Ing. Alfons Mersmann
Kolumbusstr. 5b
81543 München

Professor Dr.-Ing. Matthias Kind
Universität Karlsruhe
Institut für Thermische Verfahrenstechnik
76128 Karlsruhe
matthias.kind@ciw.uni-karlsruhe.de

Professor Dr.-Ing Johann Stichtlmaier
Universität München
Lehrstuhl für Fluidverfahrenstechnik
Boltzmannstr. 15
85747 Garching
johann.stichtlmaier@fvt.mw.tum.de

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 10 3-540-23648-1 Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN 13 978-3-540-23648-1 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Ver- vielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepub-lik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005
Printed in Germany

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 je- dermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschrif- ten oder Richtlinien (z. B. din, vdi, vde) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es emp- fiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Einbandgestaltung: medionet AG, Berlin
Satz: Druckvorlage des Autors
Gedruckt auf säurefreiem Papier 68/3020/m - 5 4 3 2 1 0

Vorwort

Vor einem Vierteljahrhundert ist die erste Auflage dieses Buches erschienen. Das Buch - damals konventionell in Bleiletttern gedruckt - war als preiswertes Lehrbuch für Studenten konzipiert. Heute nach 25 Jahren ist unsere Welt einerseits schnelllebiger und andererseits grundsätzlicher geworden. So haben sich die Autoren dieser zweiten Auflage gefragt: Soll man im Internet-Zeitalter noch Bücher schreiben und, wenn ja, wie und für wen und in welcher Sprache?

Das vorliegende Buch ist unsere Antwort auf diese Fragen. Wir hoffen, dass sich sowohl studentische Anfänger als auch erfahrene Ingenieure und Naturwissenschaftler mit der Darstellung des Themas anfreunden und aus dem Buch Nutzen ziehen werden. Wir haben das Buch so konzipiert, dass man es zwar von der ersten bis zur letzten Seite lesen könnte. Da es aber solche Leser kaum geben wird, eignet sich das Buch auch als Nachschlage- und Vertiefungswerk für Anfänger und Experten.

Auch wenn heute das Konzept der Unit Operations oft als überholt angesehen wird, haben wir es in Teilen des Buches als grobe Orientierung beibehalten. Denn es gibt ja nicht nur die intelligent-abstrahierenden Leser, sondern auch solche, die über konkrete Problemstellungen den Weg zur Thermischen Verfahrenstechnik finden wollen. Der Umfang des Werkes ist für Studenten innerhalb der Regelstudienzeit sicher zu groß und für den Spezialisten eher zu gering. Die verwendeten Formelzeichen stellen einen Kompromiss dar zwischen dem, was national und international üblich ist. Beim Literaturverzeichnis haben wir uns auf Wichtiges beschränkt, um den Lesefluss nicht zu beeinträchtigen.

Wir kommen zur Frage zurück: Soll man noch Bücher schreiben? Seit Gutenberg werden Bücher gedruckt und gelesen. Goethe schrieb vor mehr als zwei Jahrhunderten:

Denn was man Schwarz auf Weiß besitzt, kann man getrost nach Hause tragen.

Goethe konnte noch nicht wissen, dass es heute Computer, Kopierer und Internet gibt. Sonst hätte er vielleicht geschrieben:

Denn was im Elektronenhirn gespeichert, bleibt erhalten, doch leider nicht im Menschenhirn mit manchen leeren Falten.

Wir meinen, dass nicht der computergläubige, sondern der denkende Mensch vor *Schwarz auf Weiß* eine kritische Distanz zum Anliegen der Thermischen Verfahrenstechnik erlangen kann.

München, im April 2005

A. Mersmann, M. Kind, J. Stichlmair

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XIII
Einleitung	1
1 Phasengleichgewichte	5
1.1 Flüssigkeit/Gas-Systeme	6
1.1.1 Verhalten reiner Stoffe	6
1.1.1.1 Dampfdruck	7
1.1.1.2 Dampfdruck an stark gekrümmten Flüssigkeitsflächen	12
1.1.2 Verhalten von binären Gemischen	14
1.1.2.1 Dampfdruck binärer verdünnter Lösungen	14
1.1.2.2 Gefrierpunktniedrigung	23
1.1.2.3 Das Raoult'sche Gesetz	24
1.1.2.4 Das Henry'sche Gesetz	26
1.1.3 Verhalten idealer Gemische	27
1.1.4 Reales Verhalten von Flüssigkeitsgemischen	34
1.1.4.1 Die Gibbs-Duhem-Gleichung	37
1.1.4.2 Phasenumwandlungs-, Mischungs- und Bindungswärmen	44
1.1.4.3 Exzessgrößen	50
1.1.4.4 Aktivität und Aktivitätskoeffizient	52
1.1.4.5 Fugazität und Fugazitätskoeffizient, Gleichgewichtskonstante	54
1.2 Flüssigkeit/Flüssigkeit-Systeme	57
1.3 Flüssigkeit/Feststoff-Systeme	62
1.4 Sorptionsgleichgewichte	68
1.4.1 Sorption einer Komponente	68
1.4.2 Phasenänderungs- und Bindungswärme	74
1.4.3 Adsorption von zwei und mehr Komponenten	76
1.4.4 Voraussage von Einkomponenten-Adsorptions-Isothermen	81
1.4.5 Molekülbasierte Voraussage von Adsorptionsisothermen	84
1.4.6 Voraussage von Mehrkomponenten-Adsorptions-Gleichgewichten	88
1.5 Enthalpie-Konzentrations-Diagramm	96

2	Grundlagen der Ein- und Mehrphasenströmung	111
2.1	Einige Gesetze der Einphasenströmung	112
2.1.1	Massenerhaltungssatz und Kontinuitätsgleichung	112
2.1.2	Wirbelfreie Bewegung und Wirbelbewegung	113
2.1.3	Das zähe Fluid	114
2.1.4	Navier-Stokes-, Euler- und Bernoulli-Gleichungen	114
2.1.5	Laminare und turbulente Strömung in Rohren und Öffnungen	117
2.1.6	Das turbulente Strömungsfeld	122
2.1.7	Molekularströmung und Molekulardiffusion	123
2.1.8	Filmströmung an senkrechten Wänden	125
2.2	Gegenstrom von Gas und Flüssigkeit im senkrechten Rohr	128
2.3	Ähnlichkeitstheorie und Kennzahlen, Bedeutung der Kennzahlen	130
2.4	Kennzeichnung von Partikelsystemen	132
2.5	Durchströmte Festbetten	136
2.6	Disperse Systeme im Erdschwerefeld	137
2.6.1	Die Endsteig- oder Endfallgeschwindigkeit einzelner Teilchen	140
2.6.2	Volumenanteile (Fließbetten, Sprüh-, Blasen- und Tropfensäulen)	144
2.7	Erzwungene Großraumströmungen in Rührwerken	149
3	Bilanzierung, Wärme- und Stoffübertragung	163
3.1	Einführung	163
3.2	Bilanzierung	164
3.2.1	Grundlagen	164
3.2.2	Beispiele für Bilanzierungen ohne kinetische Vorgänge	169
3.2.2.1	Beispiel: Füllen eines Behälters	169
3.2.2.2	Beispiel: Behälter mit Ablauf	170
3.2.2.3	Beispiel: Temperaturverlauf eines gerührten Behälters	172
3.2.2.4	Beispiel: Isotherme Verdunstung von Wasser	174
3.2.2.5	Beispiel: Bilanzierung einer Kristallisationsanlage	176
3.3	Wärme- und Stoffübertragung	182
3.3.1	Kinetische Ansätze	182
3.3.2	Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten	187
3.3.2.1	Wärme- und Stoffübertragung bei erzwungener Konvektion	187
3.3.2.2	Wärme- und Stoffübertragung in Partikelsystemen	189
3.3.2.3	Wärme- und Stoffübertragung bei freier Konvektion	192
3.3.2.4	Wärmeübertragung an fluidisierte Systeme	194
3.3.2.5	Instationäre Wärme- und Stoffübertragung	195
3.3.2.6	Wärmeübergang an kondensierende Dämpfe	197

3.3.2.7	Wärmeübergang bei der Verdampfung von reinen Flüssigkeiten	199
3.3.3	Beispiele für Bilanzierungen mit kinetischen Vorgängen	204
3.3.3.1	Beispiel: Dampfbeheizter Rührkessel	204
3.3.3.2	Beispiel: Flüssigkeitsgekühlter Rührkessel	207
3.3.3.3	Beispiel: Instationärer Stofftransport in Kugeln	210
3.3.3.4	Beispiel: Isotherme Verdunstung eines binären Gemisches	214
3.3.3.5	Beispiel: Bilanzierung eines Rohrbündel-Wärmeübertragers	219
4	Destillation, Rektifikation, Absorption	225
4.1	Destillation	226
4.1.1	Grundlagen	226
4.1.1.1	Betriebsweisen	226
4.1.1.2	Phasengleichgewicht	227
4.1.1.3	Siedepunkt, Taupunkt	233
4.1.2	Kontinuierliche geschlossene Destillation	235
4.1.2.1	Binäre Gemische	236
4.1.2.2	Vielstoffgemische	237
4.1.2.3	Flashdestillation	238
4.1.3	Diskontinuierliche offene Destillation, Batchdestillation	240
4.1.3.1	Batchdestillation binärer Gemische	240
4.1.3.2	Batchdestillation ternärer Gemische	243
4.2	Rektifikation	244
4.2.1	Grundlagen	245
4.2.2	Kontinuierliche Rektifikation	248
4.2.2.1	Rektifikation binärer Gemische	248
4.2.2.2	Rektifikation ternärer Gemische	262
4.2.2.3	Rektifikation von Vielstoffgemischen	277
4.2.2.4	Reaktivrektifikation	280
4.2.3	Batchrektifikation	284
4.2.3.1	Batchrektifikation binärer Gemische	285
4.2.3.2	Batchrektifikation ternärer Gemische	289
4.2.3.3	Batchreaktivrektifikation	293
4.3	Absorption, Desorption	296
4.3.1	Absorptionsgleichgewicht	297
4.3.2	Physikalische Absorption	299
4.3.2.1	Minimale Waschmittelmenge	299
4.3.2.2	Minimale Strippgasmenge	300
4.3.2.3	Graphische Bestimmung der Zahl der Gleichgewichtsstufen	300
4.3.2.4	Vergleich zwischen Absorption/Desorption und Rektifikation	304
4.3.3	Chemische Absorption, Chemisorption	305
4.4	Gestaltung und Dimensionierung von Stoffaustauschkolonnen	310
4.4.1	Bodenkolonnen	310

4.4.1.1	Arbeitsbereich von Bodenkolonnen	312
4.4.1.2	Zweiphasenströmung auf Kolonnenböden	315
4.4.1.3	Stoffübergang in der Zweiphasenschicht auf Kolonnenböden	322
4.4.2	Packungskolonnen	324
4.4.2.1	Arbeitsbereich von Packungskolonnen	328
4.4.2.2	Zweiphasenströmung in Packungskolonnen	330
4.4.2.3	Stoffübergang in Packungskolonnen	336
5	Extraktion	345
5.1	Phasengleichgewicht	346
5.1.1	Wahl des Extraktionsmittels	349
5.2	Thermodynamische Berechnung der Extraktion	350
5.2.1	Einstufige Extraktion	351
5.2.2	Vielstufige Kreuzstrom-Extraktion	353
5.2.3	Vielstufige Gegenstrom-Extraktion	354
5.3	Bauformen von Extraktionsapparaten	358
5.3.1	Apparate für die Solventextraktion	358
5.3.2	Wahl der dispersen Phase	363
5.3.3	Phasenscheider	364
5.4	Dimensionierung von Flüssig/flüssig-Extraktoren	368
5.4.1	Fluiddynamische Auslegung	368
5.4.2	Stoffübergang in Extraktionsapparaten	376
6	Verdampfen und Kondensieren	385
6.1	Verdampferbauarten	386
6.2	Vielstufenverdampfung	391
6.3	Kondensatorbauarten	399
6.4	Auslegung von Verdampfern und Kondensatoren	401
6.5	Brüdenverdichtung	408
6.6	Verdampfungsverfahren	409
7	Kristallisation	413
7.1	Grundlagen und Gleichgewichte	413
7.1.1	Grundlagen	414
7.1.2	Gleichgewichte	417
7.2	Kristallisationsverfahren und -apparate	418
7.2.1	Kühlungskristallisation	419

7.2.2	Verdampfungskristallisation	420
7.2.3	Vakuumkristallisation	421
7.2.4	Verdrängungs- und Reaktionskristallisation	422
7.2.5	Kristallisationsapparate	423
7.2.5.1	Kristallisation aus Lösungen	423
7.2.5.2	Kristallisation aus Schmelzen	427
7.3	Bilanzen	434
7.3.1	Stoffbilanz des kontinuierlich betriebenen Kristallisators	434
7.3.2	Stoffbilanz des Batch-Kristallisators	439
7.3.3	Energiebilanz des kontinuierlich betriebenen Kristallisators	442
7.3.4	Anzahlbilanz	444
7.4	Kristallisationskinetik	448
7.4.1	Keimbildung und metastabiler Bereich	448
7.4.1.1	Aktivierete Keimbildung	449
7.4.1.2	Heterogene Keimbildung	454
7.4.1.3	Abriebskeimbildung	457
7.4.2	Kristallwachstum	458
7.4.2.1	Diffusionskontrolliertes Kristallwachstum	460
7.4.2.2	Integrationskontrolliertes Kristallwachstum	460
7.4.2.3	Wachstum mit Diffusions- und Integrationswiderstand	462
7.4.3	Aggregation und Agglomeration	465
7.4.4	Keimbildung und -Wachstum in MSM-PR-Kristallisatoren	474
7.5	Auslegung von Kristallisatoren	476
8	Adsorption	483
8.1	Technische Adsorbentien	483
8.2	Adsorptionsapparate	487
8.3	Sorptionsgleichgewichte	493
8.4	Ein- und mehrstufige Adsorber	494
8.4.1	Die einstufige Apparatur	494
8.4.2	Die Kreuzstromschaltung	495
8.4.3	Die Gegenstromschaltung	497
8.5	Adsorptionskinetik	499
8.5.1	Vereinfachte Lösungen für das Festbett	504
8.5.2	Vereinfachte Lösung für das Einzelpartikel	509
8.5.3	Kinetische Transportkoeffizienten	512
8.5.4	Der adiabate Festbettadsorber	518
8.6	Regenerieren der Adsorbentien	524
8.7	Adsorptionsverfahren	527

9	Trocknung	533
9.1	Bauarten von Trocknern	534
9.2	Trocknungsgüter und Trocknungsmittel	539
9.2.1	Trocknungsgüter	539
9.2.2	Trocknungsmittel	544
9.2.3	Trocknen durch Strahlung	544
9.3	Die einstufige Apparatur im Enthalpie-Beladungs- Diagramm	545
9.4	Bilanzen einer mehrstufigen Apparatur	551
9.5	Strömungs- und wärmetechnische Auslegung	553
9.6	Trocknungsverlauf	554
9.6.1	I. Trocknungsabschnitt	555
9.6.2	Der Knickpunkt	558
9.6.3	II. Trocknungsabschnitt	559
9.7	Einige Trocknungsverfahren	564
10	Konzeptuelle Prozessentwicklung	569
10.1	Prozesse zur Zerlegung binärer Stoffgemische	571
10.2	Prozesse zur Zerlegung zeotroper Mehrkomponentengemische	578
10.2.1	Basisprozesse zur Zerlegung ternärer Gemische	579
10.2.2	Prozesse mit Seitenkolonnen	583
10.2.3	Thermische Kopplung	589
10.3	Prozesse zur Zerlegung azeotroper Gemische	593
10.3.1	Prozesse zur Zerlegung von Heteroazeotropen	593
10.3.2	Druckwechselrektifikation	595
10.3.3	Zerlegung azeotroper Gemische unter Verwendung eines Entrainers	597
10.4	Hybridprozesse zur Zerlegung azeotroper Gemische	602
10.5	Reaktivrektifikation	610
	Literaturverzeichnis	613
	Sachverzeichnis	635

Formelzeichen

A		Konstante
A	m^2	Fläche, Austauschfläche
a	m^2/m^3	volumenbezogene Phasengrenzfläche
a	m	Amplitude
a		Aktivität
B	$kmol$	(Boden-, Sumpf-) Produkt
\dot{B}	$kmol/s$	(Boden-, Sumpf-) Produktstrom
b	m	Breite
C_s	$W/(m^2 \cdot K^4)$	Strahlungszahl
c	kg/m^3	Massenkonzentration
\tilde{c}	$kmol/m^3$	Molkonzentration
c_p	$kJ/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
\tilde{c}_p	$kJ/(kmol \cdot K)$	molare Wärmekapazität bei konstantem Druck
c_v	$kJ/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
\tilde{c}_v	$kJ/(kmol \cdot K)$	molare Wärmekapazität bei konstantem Volumen
c_w		Widerstandsbeiwert
D	$kmol$	(Kopf-) Produkt, Destillat
\dot{D}	$kmol/s$	(Kopf-) Produktstrom, Destillatstrom
D	m	Durchmesser (größerer-, Apparate-)
D	m^2/s	Dispersionskoeffizient
D_{AB}, D_{ij}	m^2/s	molekularer Diffusionskoeffizient
d	m	Durchmesser (kleinerer-, Kugel-, Teilchen-, Rohr-, Rührer)
d_h	m	hydraulischer Durchmesser
d_p	m	Partikeldurchmesser
d_{32}	m	Sauterdurchmesser ($d_{32} = \Sigma n \cdot d^3 / \Sigma n \cdot d^2$)
E	kJ	Energie
E		Effizienz, Beschleunigungsfaktor
E	kg	Extrakt
\dot{E}	kg/s	Extraktstrom
e	As	Elementarladung ($e = 1,06 \cdot 10^{-19} As$)
F	N	Kraft
F	$kmol$	Zulauf (Feed)
\dot{F}	$kmol/s$	Zulaufstrom (Feedstrom)
\tilde{F}	kJ	freie innere Energie
f_i	$kJ/kmol$	partielle molare freie innere Energie

f		Freiheitsgrad
f	Pa	Fugazität
f	m^2	Querschnittsfläche
f	$1/s$	Frequenz
G	$kmol$	Gas, G-Phase
\dot{G}	$kmol/s$	Gasstrom, G-Phasenstrom
G	kJ	freie Enthalpie
g	kJ/kg	spezifische freie Enthalpie
\tilde{g}	$kJ/kmol$	molare freie Enthalpie
\tilde{g}_i	$kJ/kmol$	partielle molare freie Enthalpie
H	m	Abstand, Gesamthöhe
h	m	Höhe
H	kJ	Enthalpie
\underline{h}	kJ/kg	spezifische Enthalpie
\tilde{h}	$kJ/kmol$	molare Enthalpie
\tilde{h}_i	$kJ/kmol$	partielle molare Enthalpie
$\Delta \underline{h}_i$	$kJ/kmol$	partielle molare Mischungsenthalpie
$\Delta \underline{h}_{iB}$	$kJ/kmol$	partielle molare Bindungsenthalpie
Δh	kJ/kg	spezifische Phasenänderungsenthalpie, Verdampfungsenthalpie
$\Delta \tilde{h}$	$kJ/kmol$	molare Phasenänderungsenthalpie
I	$kg \cdot m/s$	Impuls
K		Gleichgewichtskonstante
k		Zahl der Komponenten
k	kJ/K	Boltzmannkonstante ($k = 1,38 \cdot 10^{-26} kJ/K$)
k	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmedurchgangskoeffizient
k	$kmol/(m^2 \cdot s)$	Stoffübergangskoeffizient
k_d	m/s	Stoffübergangskoeffizient
L	m	(Gesamt-) Länge
l	m	Länge
L	$kmol$	Flüssigkeit (L-Phase)
\dot{L}	$kmol/s$	Flüssigkeitsstrom (L-Phasenstrom)
M	kg	Masse
\dot{M}	kg/s	Massenstrom
\tilde{M}	$kg/kmol$	molare Masse
\dot{m}	$kg/(m^2 \cdot s)$	Massenstromdichte
N		Zahl (Übergangseinheiten, Molekülschichten)
N	$1/m^3$	Zahl der Teilchen pro Volumen
N_A	$1/kmol$	Avogadro-Konstante oder Loschmidt-Konstante ($N_A = 6,022 \cdot 10^{26} 1/kmol$)
N	$kmol$	Stoffmenge
\dot{N}	$kmol/s$	Stoffmengenstrom
\dot{n}	$kmol/(m^2 \cdot s)$	Stoffstromdichte
n		Zahl (Trennstufen, Teilchen)

n	$1/s$	Drehfrequenz
P	W	Leistung
p		Zahl der Phasen
p	Pa	Gesamtdruck
p_c	Pa	kritischer Druck
p_i	Pa	Partialdruck der Komponente i
p_i^o	Pa	Dampfdruck der Komponente i
p_r		reduzierter Druck
Δp	Pa	Druckdifferenz, -verlust
Q	kJ	Wärme
\dot{Q}	$kJ/s = kW$	Wärmestrom
\dot{q}	W/m^2	Wärmestromdichte
R	m	Radius (Rohr-, Kugel-, Partikel-)
R		Rückflussverhältnis
R	kg	Raffinat
\dot{R}	k/s	Raffinatstrom
\tilde{R}	$kJ/(kmol \cdot K)$	allgemeine Gaskonstante ($\tilde{R} = 8,314 kJ/(kmol \cdot K)$)
R_i	$kJ/(kg \cdot K)$	spezielle Gaskonstante der Komponente i ($R_i = \tilde{R}/M_i$)
r	m	Radius
r	kJ/kg	spezifische Verdampfungswärme
\tilde{r}	$kJ/kmol$	molare Verdampfungswärme
S	kg	Feststoff (Solid)
\dot{S}	k/s	Feststoffstrom
S	kJ/K	Entropie
s	$kJ/(kg \cdot K)$	spezifische Entropie
\tilde{s}	$kJ/(kmol \cdot K)$	molare Entropie
s_i	$kJ/(kmol \cdot K)$	partielle molare Entropie der Komponente i
s	m	Dicke, Lauflänge
T	$kg \cdot m^2/s^2$	Drehmoment
T	kg	Trägerstoff
\dot{T}	kg/s	Trägerstoffstrom
T	K	absolute Temperatur
T_b	K	Siedetemperatur bei Normaldruck
T_c	K	kritische Temperatur
T_r		reduzierte Temperatur
T_s	K	Schmelztemperatur eines reinen Stoffes
t	s	Zeit
U	kJ	innere Energie
u	kJ/kg	spezifische innere Energie
\tilde{u}	$kJ/kmol$	molare innere Energie
\tilde{u}_i	$kJ/kmol$	partielle molare innere Energie
u	m/s	Geschwindigkeit (x-Koordinate)

V	m^3	Volumen
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
\dot{v}	$m^3/(m^2 \cdot s)$	Volumenstromdichte
v	m/s	Geschwindigkeit (y-Koordinate)
v	m^3/kg	spezifisches Volumen
\tilde{v}	$m^3/kmol$	molares Volumen
\tilde{v}_i	$m^3/kmol$	partielles molares Volumen
W	kJ	Arbeit
\dot{W}	W	Leistung = Arbeit pro Zeit
w	kJ/kg	spezifische Arbeit
w	m/s	Geschwindigkeit (z-Koordinate)
w_o	m/s	Geschwindigkeit in einer Öffnung (Loch, Blende, Düse)
w_s	m/s	Sink- bzw. Steiggeschwindigkeit eines Einzelpartikels
w_{ss}	m/s	Sink- bzw. Steiggeschwindigkeit eines Partikelschwarms
X_i	kg/kg	Massenbeladung der Komponente i (Adsorbat-, Flüssig-, Raffinatphase)
\tilde{X}_i	$kmol/kmol$	Molbeladung der Komponente i (Adsorbat-, Flüssig-, Raffinatphase)
x_i	kg/kg	Massenanteil der Komponente i (Adsorbat-, Flüssig-, Raffinatphase)
\tilde{x}_i	$kmol/kmol$	Molanteil der Komponente i (Adsorbat-, Flüssig-, Raffinatphase)
x	m	karthesische Koordinate
Y_i	kg/kg	Massenbeladung der Komponente i (Adsorptiv-, Gas-, Extraktphase)
\tilde{Y}_i	$kmol/kmol$	Molbeladung der Komponente i (Adsorptiv-, Gas-, Extraktphase)
y_i	kg/kg	Massenanteil der Komponente i (Adsorptiv-, Gas-, Extraktphase)
\tilde{y}_i	$kmol/kmol$	Molanteil der Komponente i (Adsorptiv-, Gas-, Extraktphase)
y	m	karthesische Koordinate
Z		Realgasfaktor
z	m	karthesische Koordinate
z_i	kg/kg	Massenanteil der Komponente i im Mehrphasensystem
\tilde{z}_i	$kmol/kmol$	Molanteil der Komponente i im Mehrphasensystem

Griechische Symbole

α relative Flüchtigkeit

α		Dissoziationsgrad
α	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmeübergangskoeffizient
β	m/s	Stoffübergangskoeffizient
β_h	m/s	Stoffübergangskoeffizient, halbdurchlässig
β	$1/K$	räumlicher Ausdehnungskoeffizient
γ		Aktivitätskoeffizient
δ	m	Dicke, Filmdicke
ε	W/kg	spezifische Leistung
ε		Lückenvolumen
ε_c		Volumenanteil der kontinuierlichen Phase
ε_d		Volumenanteil der dispersen Phase
η	$Pa \cdot s$	dynamische Viskosität
ϑ	$^{\circ}C$	Celsius-Temperatur
Λ	m	mittlere freie Weglänge
λ	$W/(m \cdot K)$	Wärmeleitfähigkeit
μ	$kJ/kmol$	chemisches Potential
ρ	kg/m^3	Dichte
$\tilde{\rho}$	$kmol/m^3$	molare Dichte
σ	$J/m^2 = N/m$	Ober-, Grenzflächenspannung
τ	Pa	Schubspannung
τ	s	Verweilzeit
φ		Fugazitätskoeffizient
φ		relative Sättigung
φ		relativer freier Querschnitt, Volumenanteil
ω	$1/s$	Winkelgeschwindigkeit

Indices

A	(Ober-) Fläche
a	Aktivität
ads	Adsorption
agg	Agglomeration
anh	Anhydrat
AS	Avoidance of settling
at	Atom
ax	axial
BCF	Burton-Cabrera-Frank
BL	Bottom Lifting
$B + S$	Birth and spread
b	boiling
c	kristallin, kritisch
$circ$	Zirkulation
col	Kollision
dif	Diffusion

<i>dis</i>	Disruption, Dispersion
<i>eff</i>	effektiv
<i>for</i>	foreign
<i>G</i>	Gas
<i>g</i>	geometrisch
<i>h</i>	halbdurchlässig
<i>het</i>	heterogen
<i>hom</i>	homogen
<i>hyd</i>	Hydrat
<i>I</i>	Interface
<i>i</i>	Komponente i
<i>id</i>	ideal
<i>L</i>	Flüssigphase (Liquid)
<i>lam</i>	laminar
<i>m</i>	Molekül, molar
<i>macro</i>	Makro
<i>max</i>	Maximalwert
<i>micro</i>	Mikro
<i>min</i>	Minimum
<i>opt</i>	optimal
<i>p</i>	Partikel
<i>PN</i>	Polynuklear
<i>rel</i>	relativ
<i>S</i>	Feststoff (Solid)
<i>s</i>	Sinken, Seed
<i>ss</i>	Sinken im Schwarm
<i>sus</i>	Suspension
<i>T</i>	total
<i>tot</i>	total
<i>turb</i>	turbulent
<i>V</i>	Vickers, Volumen
<i>vdW</i>	van der Waals
<i>w</i>	Geschwindigkeit
<i>α</i>	Beginn
<i>ω</i>	Ende

Dimensionslose Kennzahlen

Strömungskennzahlen

$$Ar = \frac{d^3 \cdot g \cdot \rho_c \cdot \Delta\rho}{\eta_c^2} = \frac{Re^2}{Fr^*} \quad \text{Archimedes-Zahl}$$

$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot w^2}$	Euler-Zahl
$Fo_E = \frac{D_E \cdot t}{L^2}$	Dispersions-Fourier-Zahl
$Fr = \frac{w^2}{d \cdot g}$	Froude-Zahl
$Fr^* = \frac{w^2 \cdot \rho_c}{d \cdot g \cdot \Delta \rho}$	modifizierte Froude-Zahl im Zweiphasensystem
$Ga = \frac{d^3 \cdot \rho^2 \cdot g}{\eta^2} = \frac{Re^2}{Fr}$	Galilei-Zahl
$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\eta}$	Reynolds-Zahl
$We = \frac{w^2 \cdot d \cdot \rho}{\sigma}$	Weber-Zahl
$\frac{We}{Fr} = \frac{d^2 \cdot \rho \cdot g}{\sigma}$	Bond-Zahl (in US-Literatur)
$\frac{We}{Fr^*} = \frac{d^2 \cdot \Delta \rho \cdot g}{\sigma}$	modifizierte Kennzahl im Zweiphasensystem
$Sr = \frac{L \cdot f}{w}$	Strouhal-Zahl

Kennzahlen der Wärme- und Stoffübertragung

$Fo = \frac{\lambda \cdot t}{\rho \cdot c \cdot s^2}$	Fourier-Zahl der Wärmeübertragung
$Fo^* = \frac{D \cdot t}{s^2}$	Fourier-Zahl der Stoffübertragung
$Gr = \frac{L^3 \cdot g \cdot \Delta \vartheta \cdot \rho^2 \cdot \beta}{\eta_c^2}$	Grashof-Zahl der Wärmeübertragung
$Le = \frac{\lambda}{\rho \cdot D \cdot c}$	Lewis-Zahl
$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$	Nusselt-Zahl
$Pe = \frac{w \cdot L \cdot \rho \cdot c}{\lambda}$	Peclet-Zahl
$Ph = \frac{c_L \cdot (\vartheta_G - \vartheta_O)}{\Delta h_{LG}}$	Phasenwandlungszahl
$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda}$	Prandtl-Zahl

$Sc = \frac{\eta}{\rho \cdot D}$	Schmidt-Zahl
$Sh = \frac{\beta \cdot L}{D}$	Sherwood-Zahl
$Bo_c = \frac{w_c \cdot H}{(1 - \varepsilon_d) \cdot D_{ax,c}}$	Bodensteinzahl der kontinuierlichen Phase
$Bo_d = \frac{w_d \cdot H}{\varepsilon_d \cdot D_{ax,d}}$	Bodensteinzahl der dispersen Phase
$B^* = \left(\frac{\eta_L}{\rho_L \cdot g^2} \right)^{1/3} \cdot \frac{\varepsilon_d \cdot \dot{v}_L}{\varepsilon_c \cdot d_p}$	Dimensionslose Berieselungsdichte
$d_{p,max}^* = d_{p,max} \cdot \left(\frac{\rho_c^3 \cdot \varepsilon^2}{\sigma^3} \right)^{1/5}$	Maximaler Durchmesser fluider Partikel im turbulenten Feld
$Fl = \frac{\sigma^3 \cdot \rho^2}{\eta_c^4 \cdot \Delta\rho \cdot g}$	Fluidkennzahl disperser Systeme
$K_F = \frac{\sigma^3 \cdot \rho^2}{\eta^4 \cdot g}$	Filmkennzahl (Rieselfilm)
$K_w = \zeta \cdot \frac{\rho_G}{\rho_L} \cdot \frac{w_G^2}{(g \cdot \eta_L / \rho_L)^{2/3}}$	Kennzahl des Gas/Rieselfilm-Gegenstromes
$l_s^* = l_s \cdot \left(\frac{\rho_c^3 \cdot \varepsilon}{\eta_c^3} \right)^{1/4}$	Dimensionsloses Mikromass der Turbulenz
$Ne = \frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5}$	Leistungszahl eines Rührers
$N_v = \frac{\dot{V}_{circ}}{n \cdot d^3}$	Volumenstromzahl eines Rührers
$NTU = \int \frac{dy}{y^* - y}$	Zahl der Übergangseinheiten
$n \cdot t$	Durchmischungskennzahl
$P^* = \frac{d_m \cdot k_d}{D_{AB}} \cdot \left(\frac{c^*}{\rho_c} \right)^{2/3} \ln \frac{\rho_c}{c^*}$	Kristallisationsparameter
$t_{macro}^* = t_{macro} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{D^2} \right)^{1/3}$	Dimensionslose Makromischzeit

$$t_{micro}^* = t_{micro} \cdot \left(\frac{\rho_L \cdot \varepsilon}{\eta_L} \right)^{1/2}$$
 Dimensionslose Mikromischzeit

$$\dot{v}_d^* = \dot{v}_d \cdot \left(\frac{\rho_c^2}{\sigma \cdot \Delta\rho \cdot g} \right)^{1/4}$$
 Dimensionslose Volumenstromdichte in Blasen- und Tropfensäulen

$$\eta = \frac{X - X^*}{X_{Kn} - X^*}$$
 Dimensionslose Gutsfeuchte