
Wärme- und Stoffübertragung

Hans Dieter Baehr · Karl Stephan

Wärme- und Stoffübertragung

10. Auflage

 Springer Vieweg

Hans Dieter Baehr
Bochum, Deutschland

Karl Stephan
Institut für Technische Thermodynamik und
Thermische Verfahrenstechnik
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

ISBN 978-3-662-58440-8 ISBN 978-3-662-58441-5 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58441-5>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 1994, 1996, 1998, 2004, 2006, 2008, 2010, 2013, 2016, 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur zehnten Auflage

Nach dem Tod meines 2014 verstorbenen Kollegen, Doktorvaters und Freundes Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. Hans Dieter Baehr blieb die Neubearbeitung dieser wie schon die der beiden vorigen Auflagen mir überlassen.

Unser gemeinsames Anliegen ist aber unverändert geblieben, nämlich durch das Buch mit den Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung vertraut zu machen, zugleich aber auch zu zeigen, wie man damit praktische Probleme lösen kann. Auch mit der neuen Auflage bleibt dieses bewährte Konzept erhalten.

Neu bearbeitet und damit neueren Erkenntnissen angepasst sind die Kapitel „Erstarren und Schmelzen geometrisch einfacher Körper“ sowie „Überlagerung von freier und erzwungener Strömung“.

Darüber hinaus habe ich Änderungen an mehreren Stellen vorgenommen: Wie in früheren Auflagen besonders in den Kapiteln, die auf Messungen basierende Korrelationen enthalten. Sie geben nun den neuesten Stand unserer Kenntnisse wieder. Ebenso sind auch die Stoffwerttabellen überarbeitet und auf den neuesten Stand unserer Kenntnisse gebracht worden. Das Literaturverzeichnis wurde durch Aufnahme neuer Publikationen aktualisiert.

Dank schulde ich weiterhin den Lesern, Freunden und Kollegen, die mich auf Druckfehler aufmerksam machten und wertvolle Ratschläge gaben. Besonders dankbar bin ich Prof. Dr.-Ing. Peter Stephan, Technische Universität Darmstadt, für seine Hilfe bei der Vorbereitung dieser Auflage.

Möge das Buch auch künftig Wissenschaftlern und Ingenieuren in der Praxis nützlich sein. Den Studierenden soll es helfen, die Gesetze der Wärme- und Stoffübertragung zu verstehen und sie befähigen, diese zur Lösung der vielfältigen praktischen Probleme erfolgreich anzuwenden.

Stuttgart
im Frühjahr 2019

K. Stephan

Vorwort zur ersten Auflage

Dieses Buch ist aus Vorlesungen über Wärme- und Stoffübertragung entstanden, die wir seit vielen Jahren an den Universitäten Hannover bzw. Stuttgart gehalten haben. Es wendet sich an Studenten des Maschinenbaus und der Verfahrenstechnik an Universitäten und Fachhochschulen, aber auch an Studierende verwandter Fachrichtungen wie Elektrotechnik, Physik und Chemie. Unser Buch ist einerseits als Lehrbuch zum Gebrauch neben den Vorlesungen konzipiert; es soll den Studenten mit den Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung vertraut machen und ihn befähigen, dieses Wissen zur Lösung technischer Probleme einzusetzen. Andererseits haben wir das Buch breiter angelegt, die Theorie der Wärme- und Stoffübertragung systematisch entwickelt und die Lösungsmethoden wichtiger Wärme- und Stoffübertragungsprobleme ausführlich dargestellt. Daher dürfte es auch Wissenschaftlern und Ingenieuren in der Praxis bei der Weiterbildung und als Nachschlagewerk bei der Lösung ihrer Aufgaben gute Dienste leisten. Wir haben den Stoff durch ausführliche Rechenbeispiele erläutert und am Ende eines jeden Kapitels eine Reihe von Übungsaufgaben zusammengestellt. Dies soll auch das Selbststudium erleichtern.

Viele Vorgänge der Wärme- und Stoffübertragung und die zugehörigen Apparate lassen sich bereits mit Hilfe der Bilanzgleichungen unter Verwendung von Wärme- und Stoffübertragungskoeffizienten quantitativ erfassen, ohne dass ein tieferes Eindringen in die Theorie der Wärme- und Stoffübertragung erforderlich ist. Solche Vorgänge haben wir im ersten Kapitel behandelt, das auch die grundlegenden Begriffe und die Grundgesetze der Wärme- und Stoffübertragung enthält. Der Student erhält einen Überblick über die verschiedenartigen Vorgänge der Wärme- und Stoffübertragung und lernt zu einem frühen Zeitpunkt, praktische Probleme zu lösen und die Apparate zur Wärme- und Stoffübertragung zu berechnen. Dadurch wird auch die Motivation erhöht, sich eingehender mit der Theorie zu befassen, die Gegenstand der folgenden Kapitel ist.

Im zweiten Kapitel behandeln wir die stationäre und instationäre Wärmeleitung und die Diffusion in ruhenden Medien. Es werden die grundlegenden Differentialgleichungen zur Berechnung von Temperaturfeldern hergeleitet. Wir zeigen, wie man sie in praktischen Fällen unter Anwendung analytischer und numerischer Methoden löst. Neben den

analytischen Verfahren der Laplace-Transformation und des klassischen Separationsansatzes stellen wir die für die Praxis wichtigen Differenzenverfahren ausführlich dar. Viele der für die Wärmeleitung gewonnenen Ergebnisse lassen sich wegen der hier bestehenden Analogie auf die Diffusion übertragen, und die mathematischen Lösungsansätze sind für beide Gebiete gleich.

Das dritte Kapitel ist der konvektiven Wärme- und Stoffübertragung gewidmet. Hier steht die Herleitung der Bilanzgleichungen für Masse, Impuls und Energie strömender reiner Fluide und Mehrstoffgemische im Vordergrund, ehe die Materialgesetze eingeführt und die maßgebenden Differentialgleichungen für Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsfelder hergeleitet werden. Als typische Anwendungen behandeln wir Wärme- und Stoffübergang an überströmten Körpern und in durchströmten Kanälen, in Haufwerken und Wirbelschichten, ebenso die freie Konvektion und die Überlagerung von freier und erzwungener Strömung. Eine Einführung in den Wärmeübergang bei kompressibler Strömung beschließt dieses Kapitel.

Im vierten Kapitel wird die Wärme- und Stoffübertragung beim Kondensieren und beim Sieden in freier und erzwungener Strömung behandelt. Die Darstellung lehnt sich an das Buch „Wärmeübergang beim Kondensieren und beim Sieden“ (Berlin: Springer-Verlag 1988) von K. Stephan an. Dabei werden nicht nur reine Stoffe betrachtet; auch die Kondensation und das Sieden von Stoffgemischen wird in angemessenem Umfang erörtert.

Die Wärmestrahlung ist Gegenstand des fünften Kapitels. Es unterscheidet sich von vielen anderen Darstellungen dadurch, dass zuerst die strahlungsphysikalischen Größen zur quantitativen Beschreibung der Richtungs- und Wellenlängenabhängigkeit der Strahlung umfassend und eingehend behandelt werden. Erst nach einer strengen Formulierung des Kirchhoffschen Gesetzes wird der ideale Strahler, der Schwarze Körper, eingeführt. Danach werden die Materialgesetze realer Strahler besprochen. Als Anwendungen werden die Solarstrahlung und die Wärmeübertragung durch Strahlung eingehend behandelt. Eine Einführung in die Gasstrahlung, technisch wichtig für Brennkammern und Feuerungen, schließt das Kapitel ab.

Die Wärme- und Stoffübertragung gehört an Universitäten und Fachhochschulen in der Regel zum Hauptstudium. Wir haben daher Kenntnisse in Höherer Mathematik vorausgesetzt, wie sie bis zur Diplom-Vorprüfung gelehrt werden. Für den, der sich nur mit den Grundbegriffen und einfacheren technischen Anwendungen der Wärme- und Stoffübertragung vertraut machen möchte, dürfte bereits das Studium des ersten Kapitels ausreichen. Von Diplomingenieuren des Maschinenbaus und der Verfahrenstechnik werden weitergehende Kenntnisse erwartet. Der Maschineningenieur sollte mit den Grundlagen der Wärmeleitung, der konvektiven Wärmeübertragung und der Strahlung vertraut sein, und er sollte über Grundkenntnisse der Stoffübertragung verfügen. Der Verfahreningenieur benötigt neben einem vertieften Wissen auf diesen Gebieten auch gute Kenntnisse der Wärme- und Stoffübertragung in mehrphasigen Strömungen. Die zur Verfügung stehende Vorlesungszeit wird in der Regel nicht ausreichen, um den gesamten

Stoff dieses Buches zu behandeln. Es ist aber wichtig, dass der Student ein breites Wissen der Grundlagen und Methoden erwirbt. Es genügt dann, dieses an ausgewählten Beispielen zu vertiefen und so die Lösung von Problemen zu üben.

Beim Abfassen des Manuskripts haben wir uns die Arbeit geteilt. H. D. Baehr hat die Erstschrift der Abschn. 1.1 bis 1.3, 2.1 bis 2.4 und des Kap. 5 besorgt, K. Stephan die der Abschn. 1.4 bis 1.7, 2.5 und 2.6 sowie der Kap. 3 und 4. Gleichwohl hat durch gegenseitige Korrektur jedes Kapitel Änderungen erfahren, so dass jeder von uns in gleicher Weise für das ganze Buch verantwortlich ist.

Bei der Anfertigung des Manuskripts und der zahlreichen Abbildungen haben uns einige unserer Mitarbeiter, vor allem die Herren Dipl.-Ing. F. Harms-Watzenberg, Hannover, und S. Winkler, Stuttgart, geholfen. Ihnen allen danken wir auch an dieser Stelle. Die hervorragende Beherrschung des elektronischen Textsatzsystems durch Herrn Harms-Watzenberg hat es uns ermöglicht, dem Verlag eine reproduktionsfähige Druckvorlage zu liefern. Auch dadurch war es möglich, trotz des erheblichen Umfangs unseres Buches einen für ein Lehrbuch noch akzeptablen Preis zu erreichen.

Hannover und Stuttgart
Herbst 1993

Hans Dieter Baehr
K. Stephan

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung. Technische Anwendungen.	1
1.1	Die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung	1
1.1.1	Wärmeleitung	2
1.1.2	Stationäre, geometrisch eindimensionale Wärmeleitung	5
1.1.3	Konvektiver Wärmeübergang, Wärmeübergangskoeffizient	10
1.1.4	Die Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten. Dimensionslose Kennzahlen	17
1.1.5	Wärmestrahlung	28
1.1.6	Strahlungsaustausch	30
1.2	Wärmedurchgang	34
1.2.1	Der Wärmedurchgangskoeffizient	34
1.2.2	Mehrschichtige Wände	37
1.2.3	Wärmedurchgang durch Wände mit vergrößerter Oberfläche	38
1.2.4	Abkühlung und Erwärmung dünnwandiger Behälter	42
1.3	Wärmeübertrager	45
1.3.1	Bauarten und Stromführungen	45
1.3.2	Allgemeine Berechnungsgleichungen. Dimensionslose Kennzahlen	49
1.3.3	Gegenstrom- und Gleichstrom-Wärmeübertrager	54
1.3.4	Kreuzstrom-Wärmeübertrager	62
1.3.5	Betriebscharakteristiken für weitere Stromführungen. Diagramme	70
1.4	Die verschiedenen Arten der Stoffübertragung	71
1.4.1	Diffusion	73
1.4.2	Einseitige Diffusion, äquimolare Diffusion	81
1.4.3	Konvektiver Stoffübergang	85

1.5	Stoffübergangstheorien	89
1.5.1	Die Filmtheorie	89
1.5.2	Die Grenzschichttheorie	93
1.5.3	Die Penetrations- und die Oberflächenerneuerungstheorie	95
1.5.4	Anwendung der Filmtheorie auf die Verdunstungskühlung	97
1.6	Stoffdurchgang.	101
1.7	Stoffübertrager	104
1.7.1	Die Mengenbilanzen	105
1.7.2	Konzentrationsverlauf und Höhe von Stoffaustauschkolonnen	108
1.8	Aufgaben	112
	Literatur.	118
2	Wärmeleitung und Diffusion	121
2.1	Die Wärmeleitungsgleichung.	121
2.1.1	Die Herleitung der Differentialgleichung für das Temperaturfeld.	122
2.1.2	Die Wärmeleitungsgleichung für einen Körper mit konstanten Stoffwerten	125
2.1.3	Die Randbedingungen	128
2.1.4	Temperaturabhängige Stoffwerte.	131
2.1.5	Ähnliche Temperaturfelder	132
2.2	Stationäre Wärmeleitung	136
2.2.1	Geometrisch eindimensionale Wärmeleitung mit Wärmequellen	136
2.2.2	Wärmeleitung in Längsrichtung eines Stabes	140
2.2.3	Der Temperaturverlauf in Rippen und Nadeln.	145
2.2.4	Der Rippenwirkungsgrad.	151
2.2.5	Geometrisch mehrdimensionaler Wärmefluss.	154
2.3	Instationäre Wärmeleitung.	161
2.3.1	Lösungsmethoden	162
2.3.2	Die Laplace-Transformation	163
2.3.3	Der einseitig unendlich ausgedehnte Körper.	171
2.3.4	Abkühlung und Erwärmung einfacher Körper bei eindimensionalem Wärmefluss	181
2.3.5	Abkühlung und Erwärmung bei mehrdimensionalem Wärmefluss	196
2.3.6	Erstarren und Schmelzen geometrisch einfacher Körper	202
2.3.7	Wärmequellen	212

2.4	Numerische Lösung von Wärmeleitproblemen mit Differenzenverfahren	219
2.4.1	Das einfache explizite Differenzenverfahren für instationäre Wärmeleitprobleme	220
2.4.2	Die Diskretisierung der Randbedingungen	224
2.4.3	Das implizite Differenzenverfahren von J. Crank und P. Nicolson	231
2.4.4	Nichtkartesische Koordinaten. Temperaturabhängige Stoffwerte.	235
2.4.5	Instationäre ebene und räumliche Temperaturfelder	239
2.4.6	Stationäre Temperaturfelder	243
2.5	Numerische Lösung von Wärmeleitproblemen mit der Finite-Element-Methode	252
2.5.1	Die Finite-Element-Methode für stationäre, geometrisch eindimensionale Temperaturfelder	253
2.5.2	Die Finite-Element-Methode für ebene stationäre Temperaturfelder	258
2.5.3	Die Finite-Element-Methode für instationäre, geometrisch eindimensionale Wärmeleitprobleme	265
2.5.4	Erweiterung auf instationäre, geometrisch zweidimensionale Wärmeleitprobleme	270
2.6	Diffusion	272
2.6.1	Bemerkungen über ruhende Systeme	272
2.6.2	Die Herleitung der Differentialgleichung für das Konzentrationsfeld.	275
2.6.3	Vereinfachungen	280
2.6.4	Randbedingungen	282
2.6.5	Stationäre Diffusion mit katalytischer Oberflächenreaktion	285
2.6.6	Stationäre Diffusion mit homogener chemischer Reaktion.	290
2.6.7	Instationäre Diffusion	295
2.7	Aufgaben	299
	Literatur.	308
3	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Einphasige Strömungen	313
3.1	Vorbemerkungen: Die längsangeströmte ebene Platte bei reibungsfreier Strömung.	314
3.2	Die Bilanzgleichungen.	318
3.2.1	Das Reynoldssche Transporttheorem.	319
3.2.2	Die Massenbilanz.	321
3.2.3	Die Impulsbilanz	325
3.2.4	Die Energiebilanz	337
3.2.5	Zusammenfassung	349

3.3	Einfluss der Reynolds-Zahl auf die Strömung	352
3.4	Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichungen	355
3.4.1	Schleichende Strömungen	355
3.4.2	Reibungsfreie Strömungen	356
3.4.3	Grenzschichtströmungen	356
3.5	Die Grenzschichtgleichungen	358
3.5.1	Die Strömungsgrenzschicht	358
3.5.2	Die Temperaturgrenzschicht	361
3.5.3	Die Konzentrationsgrenzschicht	366
3.5.4	Allgemeine Bemerkungen zur Lösung der Grenzschichtgleichungen.	366
3.6	Einfluss der Turbulenz auf den Wärme- und Stoffübergang	370
3.6.1	Turbulente Strömungen an festen Wänden	375
3.7	Überströmte Körper	379
3.7.1	Die parallel angeströmte ebene Platte	379
3.7.2	Der quer angeströmte Zylinder	396
3.7.3	Quer angeströmte Rohrbündel.	401
3.7.4	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang an überströmten Körpern	405
3.8	Durchströmte Kanäle, Haufwerke, Wirbelschichten	409
3.8.1	Die laminare Rohrströmung	409
3.8.2	Die turbulente Rohrströmung	424
3.8.3	Haufwerke	426
3.8.4	Poröse Körper	430
3.8.5	Wirbelschichten	445
3.8.6	Einige empirische Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang in durchströmten Kanälen, Haufwerken und Wirbelschichten	456
3.9	Freie Strömung.	459
3.9.1	Die Impulsgleichung	462
3.9.2	Wärmeübergang an einer senkrechten Wand bei laminarer Strömung	466
3.9.3	Einige empirische Gleichungen für den Wärmeübergang bei freier Strömung	471
3.9.4	Stoffübergang bei freier Strömung	474
3.10	Überlagerung von freier und erzwungener Strömung	479
3.11	Kompressible Strömungen	481
3.11.1	Das Temperaturfeld in einer kompressiblen Strömung	482
3.11.2	Berechnung des Wärmeübergangs.	489
3.12	Aufgaben	492
	Literatur	499

4 Konvektiver Wärme- und Stoffübergang. Strömungen mit Phasenumwandlungen	503
4.1 Wärmeübergang beim Kondensieren	504
4.1.1 Die verschiedenen Arten der Kondensation	504
4.1.2 Die Nußeltsche Wasserhauttheorie	506
4.1.3 Abweichungen von der Nußeltschen Wasserhauttheorie	511
4.1.4 Einfluss nicht kondensierbarer Gase	516
4.1.5 Filmkondensation mit turbulenter Wasserhaut	523
4.1.6 Kondensation strömender Dämpfe	526
4.1.7 Tropfenkondensation	533
4.1.8 Kondensation von Dampfgemischen	536
4.1.9 Einige empirische Gleichungen	548
4.2 Wärmeübergang beim Sieden	550
4.2.1 Die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung	551
4.2.2 Die Entstehung von Dampfblasen	556
4.2.3 Mechanismen der Wärmeübertragung beim Sieden in freier Strömung	559
4.2.4 Blasenfrequenz und Abreißdurchmesser	563
4.2.5 Die Nukijama-Kurve	565
4.2.6 Stabilität beim Sieden in freier Strömung	567
4.2.7 Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten beim Sieden in freier Strömung	571
4.2.8 Einige empirische Gleichungen zum Wärmeübergang beim Blasensieden in freier Strömung	574
4.2.9 Zweiphasige Strömungen	579
4.2.10 Wärmeübergang beim Sieden von Gemischen	604
4.3 Aufgaben	610
Literatur	612
5 Wärmestrahlung	617
5.1 Grundlagen. Strahlungsphysikalische Größen	618
5.1.1 Temperaturstrahlung	618
5.1.2 Ausstrahlung	620
5.1.3 Bestrahlung	630
5.1.4 Absorption von Strahlung	633
5.1.5 Reflexion von Strahlung	638
5.1.6 Hohlraumstrahlung. Gesetz von Kirchhoff	641
5.2 Die Strahlung des Schwarzen Körpers	644
5.2.1 Definition und Realisierung des Schwarzen Körpers	644
5.2.2 Die spektrale Strahldichte und die spektrale spezifische Ausstrahlung	646
5.2.3 Die spezifische Ausstrahlung und die Ausstrahlung in einem Wellenlängenbereich	649

5.3	Strahlungseigenschaften realer Körper	654
5.3.1	Emissionsgrade	654
5.3.2	Die Beziehungen zwischen Emissions-, Absorptions- und Reflexionsgraden. Der graue Lambert-Strahler	657
5.3.3	Emissionsgrade realer Körper	662
5.3.4	Strahlungsdurchlässige Körper	669
5.4	Solarstrahlung	675
5.4.1	Extraterrestrische Solarstrahlung	675
5.4.2	Die Schwächung der Solarstrahlung in der Erdatmosphäre	678
5.4.3	Direkte Solarstrahlung am Erdboden	685
5.4.4	Diffuse Solarstrahlung und Globalstrahlung	687
5.4.5	Absorptionsgrade für Solarstrahlung	690
5.5	Strahlungsaustausch	692
5.5.1	Sichtfaktoren	693
5.5.2	Strahlungsaustausch zwischen Schwarzen Körpern	699
5.5.3	Strahlungsaustausch zwischen grauen Lambert-Strahlern	703
5.5.4	Strahlungsschutzschirme	716
5.6	Gasstrahlung	721
5.6.1	Absorptionskoeffizient und optische Dicke	722
5.6.2	Absorptions- und Emissionsgrade	724
5.6.3	Ergebnisse für den Emissionsgrad	728
5.6.4	Emissionsgrade und gleichwertige Schichtdicken von Gasräumen	729
5.6.5	Strahlungsaustausch in einem gasgefüllten Hohlraum	736
5.7	Aufgaben	741
	Literatur	747
Anhang A: Ergänzungen		751
Anhang B: Stoffwerte		761
Anhang C: Lösungen der Aufgaben		777
Sachverzeichnis		801

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung	SI-Einheit
A	Fläche	m^2
A_m	mittlere Fläche	m^2
A_q	Querschnittsfläche	m^2
A_R	Rippen-Oberfläche	m^2
a	Temperaturleitfähigkeit	m^2/s
a	hemisphärischer Gesamt-Absorptionsgrad	–
a_λ	spektraler Absorptionsgrad	–
a_λ	gerichteter spektraler Absorptionsgrad	–
a_t	turbulente Temperaturleitfähigkeit	m^2/s
a^*	volumenbezogene Oberfläche	m^2/m^3
b	Wärmeindringkoeffizient, $b = \sqrt{\lambda c \rho}$	$W s^{1/2} / (m^2 K)$
b	Laplace-Konstante, $b = \sqrt{2\sigma/g(\rho_L - \rho_G)}$	m
C	Verhältnis der Wärmekapazitätsströme	–
c	spez. Wärmekapazität	$J/(kg K)$
c	Stoffmengenkonzentration	mol/m^3
c	Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektromagnetischer m/s	Wellen
c_0	Vakuum-Lichtgeschwindigkeit	m/s
c_f	Reibungsbeiwert	–
c_p	spez. isobare Wärmekapazität	$J/(kg K)$
c_W	Widerstandsbeiwert	–
D	binärer Diffusionskoeffizient	m^2/s
D_t	turbulenter Diffusionskoeffizient	m^2/s
d	Durchmesser	m
d_A	Abreißdurchmesser von Dampfblasen	m

d_h	hydraulischer Durchmesser	m
E	Bestrahlungsstärke	W/m ²
E_0	Solarkonstante	W/m ²
E_λ	spektrale Bestrahlungsstärke	W/(m ² μm)
e	Einheitsvektor	–
F	Kraft	N
F_A	Auftriebskraft	N
F_W	Widerstandskraft	N
F_{ij}	Sichtfaktor zwischen den Flächen i und j	–
$F(0, \lambda T)$	Anteilsfunktion der schwarzen Strahlung	–
f	Frequenz von Dampfblasen	1/s
f_j	volumenbezogene Kraft	N/m ³
g	Fallbeschleunigung	m/s ²
H	Höhe	m
H	Helligkeit	W/m ²
H	Enthalpie	J
\dot{H}	Enthalpiestrom	J/s
h	Planck-Konstante	J s
h	spez. Enthalpie	J/kg
h_g	spez. Gesamtenthalpie, $h_g = h + w^2/2$	J/kg
h_i	partielle spez. Enthalpie	J/kg
Δh_v	spez. Verdampfungsenthalpie	J/kg
$\Delta \tilde{h}_v$	molare Verdampfungsenthalpie	J/mol
I	Impuls kg	m/s
I	Strahlstärke	W/(m ² sr)
j	Diffusionsstromdichte	mol/(m ² s)
j^*	Diffusionsstromdichte im Schwerpunktssystem	kg/(m ² s)
u_j	Diffusionsstromdichte im Teilchenbezugssystem	mol/(m ² s)
K	Bestrahlungsdichte	W/(m ² sr)
K	Permeabilität	(m ²)
K_λ	spektrale Bestrahlungsdichte	W/(m ² μm)
k	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² K)
k	Absorptionszahl	–
k	Boltzmann-Konstante	J/K
k_G	spektraler Absorptionskoeffizient	1/m
k_H	Henry-Koeffizient	N/m ²
k_j	massebezogene Kraft	N/kg
k_1	Geschwindigkeitskonstante einer homogenen Reaktion erster Ordnung	1/s

k_1', k_1''	Geschwindigkeitskonstante einer homogenen (heterogenen) Reaktion erster Ordnung	m/s
K_n''	Geschwindigkeitskonstante einer heterogenen Reaktion n -ter Ordnung	$\frac{\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})}{(\text{mol}/\text{m}^3)^n}$
L	Länge	m
L	Strahldichte	W/(m ² sr)
L_λ	spektrale Strahldichte	W/(m ² μm sr)
L_0	Bezugslänge	m
L_S	Löslichkeit	mol/(m ³ Pa)
l	Länge, Mischungsweg	m
M	Masse	kg
M	Modul, $M = a \Delta t / \Delta x^2$	–
M	spez. Ausstrahlung	W/m ²
M_λ	spektrale spez. Ausstrahlung	W/(m ² μm)
\dot{M}	Massenstrom	kg/s
\tilde{M}	molare Masse, Molmasse	kg/mol
m	optische Masse	kg/m ²
m_r	relative optische Masse	–
\dot{m}	Massenstromdichte	kg/(m ² s)
N	Stoffmenge	mol
N_i	dimensionslose Übertragungsfähigkeit (number of transfer units) des Stoffstroms i	–
\dot{N}	Stoffmengenstrom	mol/s
n	Brechzahl	–
\mathbf{n}	Normalenvektor	–
\dot{n}	Stoffmengenstromdichte	mol/(m ² s)
P	Leistung	W
P_{diss}	dissipierte Leistung	W
p	Druck	Pa
p^+	dimensionsloser Druck	–
Q	Wärme	J
\dot{Q}	Wärmestrom	W
\dot{q}	Wärmestromdichte	W/m ²
R	Radius	m
R_L	Wärmeleitwiderstand	K/W
R_m	molare (universelle) Gaskonstante	J/(mol K)
r	radiale Koordinate	m
r	hemisphärischer Gesamt-Reflexionsgrad	–

r_λ	spektraler Reflexionsgrad	–
r'_λ	gerichteter spektraler Reflexionsgrad	–
r_e	spez. elektrischer Widerstand	$\Omega \text{ m}$
r^+	dimensionslose radiale Koordinate	–
\dot{r}	Reaktionsrate	$\text{mol}/(\text{m}^3 \text{ s})$
S	Abschwächungsfaktor beim Strömungssieden	–
S	Entropie	J/K
s	spez. Entropie	$\text{J}/(\text{kg K})$
s	Parameter der Laplace-Transformation	$1/\text{s}$
s	Schichtdicke	m
s	Schlupf-Faktor, $s = w_G/w_L$	–
s_1	Längsteilung	m
s_q	Querteilung	m
T	thermodynamische Temperatur	K
T_e	Eigentemperatur	K
T_{St}	Staupunkttemperatur	K
t	Zeit	s
t^+	dimensionslose Zeit	–
t_k	Abkühlzeit, Kühldauer	s
t_j	Spannungsvektor	N/m^2
t_R	Relaxationszeit, $t_R = 1/k_1$	s
t_D	Relaxationszeit der Diffusion, $t_D = L^2/D$	s
U	Umfang	m
U	innere Energie	J
u	mittlere molare Geschwindigkeit	m/s
u	spez. innere Energie	J/kg
u	Laplace-Transformierte der Temperatur	K
V	Volumen	m^3
V_A	Abreißvolumen von Dampfblasen	m^3
v	spez. Volumen	m^3/kg
W	Arbeit	J
\dot{W}	Leistungsdichte	W/m^3
\dot{W}_i	Wärmekapazitätsstrom des Fluids i	W/K
w	Geschwindigkeit	m/s
w_0	Bezugsgeschwindigkeit	m/s
w_S	Schallgeschwindigkeit	m/s
w_τ	Schubspannungsgeschwindigkeit, $w_\tau \sqrt{\tau_0/\rho}$	m/s
w'	Schwankungsgeschwindigkeit	m/s
w^+	dimensionslose Geschwindigkeit	–
X	Beladung Lockhart-Martinelli-Parameter	–

\tilde{X}	molare Beladung in der Flüssigphase	–
x	Koordinate	m
\tilde{x}	Molanteil in der Flüssigkeit	–
x^+	dimensionslose x -Koordinate	–
x^*	Strömungsdampfgehalt, $x^* = \dot{M}_G / \dot{M}_L$	–
x_{th}^*	thermodynamischer Dampfgehalt	–
\tilde{Y}	molare Beladung in der Gasphase	–
y	Koordinate	m
\tilde{y}	Molanteil in der Gasphase	–
y^+	dimensionslose y -Koordinate	–
z	Anzahl	–
z	axiale Koordinate	m
z^+	dimensionslose z -Koordinate	–
z_R	Rohrreihenzahl	–

Griechische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung	(SI-Einheit)
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
α_m	mittlerer Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
β	Stoffübergangskoeffizient	m/s
β	Polarwinkel, Zenitwinkel	rad
β_0	Randwinkel	rad
\dot{I}	Massen-Produktionsrate	kg/(m ³ s)
γ_T	thermischer Ausdehnungskoeffizient	1/K
γ_ξ	Stoffausdehnungskoeffizient	–
$\dot{\gamma}$	molare Produktionsrate	mol/(m ³ s)
Δ	Differenz	–
δ	Dicke Grenzschichtdicke	m
δ_{ij}	Kronecker-Symbol	–
ε	Hohlraumanteil	–
ε	volumetrischer Dampfgehalt	–
ε^*	volumetrischer Strömungsdampfgehalt	–
ε	hemisphärischer Gesamt-Emissionsgrad	–
ε_λ	hemisphärischer spektraler Emissionsgrad	–
ε'_λ	gerichteter spektraler Emissionsgrad	–
ε_D	turbulenter Diffusionskoeffizient	m ² /s
ε_i	dimensionslose Temperaturänderung des Stoffstroms i	–
$\dot{\varepsilon}_{ii}$	Dilatation	1/s
$\dot{\varepsilon}_{ji}$	Verzerrungstensor	1/s
ε_p	Lückengrad	–

ε_t	turbulente Viskosität	m^2/s
ζ	Widerstandsbeiwert	–
ζ	Volumenviskosität	$\text{kg}/(\text{m s})$
η	dynamische Viskosität	$\text{kg}/(\text{m s})$
η_R	Rippenwirkungsgrad	–
Θ	Übertemperatur	K
ϑ	Temperatur	K
ϑ^+	dimensionslose Temperatur	–
κ	Isentropenexponent	–
κ_G	optische Dicke einer Gasschicht	–
Λ	Wellenlänge einer Schwingung	m
λ	Wellenlänge	m
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/(\text{K m})$
λ_t	turbulente Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/(\text{K m})$
μ	Diffusionswiderstandsfaktor	–
ν	kinematische Viskosität	m^2/s
ν	Frequenz	1/s
ρ	Dichte	kg/m^3
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$
σ	Grenzflächenspannung	N/m
ξ	Massenanteil	–
τ	Transmissionsgrad	–
τ_λ	spektraler Transmissionsgrad	–
τ	Schubspannung	N/m^2
τ_{ji}	Schubspannungstensor	N/m^2
Φ	Strahlungsleistung, Strahlungsfluss	W
Φ	Dissipationsleistung	W/m^3
φ	Winkel, Azimutwinkel	rad
Ψ	Stromfunktion	m^2/s
ω	Raumwinkel	sr
ω	Bezugsgeschwindigkeit	m/s
$\dot{\omega}$	Leistungsdichte	W/m^2

Indizes

Zeichen	Bedeutung
A	Stoff A
a	außen, Austrittsquerschnitt
abs	absorbiert
B	Stoff B
b	Bestrahlung
dgl	durchgelassen

diss	dissipiert
E	Exzess, Überschuss, Erzeugnis, Erstarrung
e	Eintrittquerschnitt, Eigentemperatur
eff	effektiv
eq	Gleichgewicht
F	Fluid, Feed
G	Gas
g	geodätisch
I	an der Phasengrenze
i	innen
id	ideal
K	Stoff K, Kühlmittel, Kondensator
L	Flüssigkeit, Luft
lam	laminar
m	mittel, molar (stoffmengenbezogen)
max	Maximum
min	Minimum
<i>n</i>	Normalrichtung
P	Partikel
r	Reibung
ref	reflektiert, Referenzzustand
S	Festkörper, Sumpfprodukt, Sonne
s	Schwarzer Körper, Sättigung
tot	total
turb	turbulent
U	Umgebung
<i>u</i>	im Teilchenbezugssystem
V	Verdampfer
W	Wand, Wasser
α	Anfang
δ	an der Stelle $= \delta$
λ	spektral
ω	Ende
0	hervorgehobener Zustand an der Stelle $= 0$
∞	in sehr großem Abstand; im Unendlichen

Dimensionslose Kennzahlen

$Ar = [(q_S - q_F)/q_F](d_p^3 g / \nu^2)$	Archimedes-Zahl
$Bi = \alpha L / \lambda$	Biot-Zahl
$Bi_D = \beta L / D$	Biot-Zahl für die Stoffübertragung
$Bo = \dot{q} / (\dot{m} \Delta h_v)$	Siedekennzahl (boiling number)

$Da = K_1''L/D$	Damköhler-Zahl (für heterogene Reaktion 1. Ordnung)
$Ec = w^2/(c_{\Delta\vartheta p})$	Eckert-Zahl
$Fo = at/L^2$	Fourier-Zahl
$Fr = w^2/(gx)$	Froude-Zahl
$Ga = gL^3/\nu^2$	Galilei-Zahl
$Gr = g\beta\Delta\vartheta L^3/\nu^2$	Grashof-Zahl
$Ha = (k_1L^2/D)^2$	Hatta-Zahl
$Le = a/D$	Lewis-Zahl
$Ma = w/w_s$	Mach-Zahl
$Nu = \alpha L/\lambda$	Nußelt-Zahl
$Pe = wL/a$	Péclet-Zahl
$Ph = h_E/c(\vartheta_E - \vartheta_0)$	Phasenübergangszahl
$Pr = \nu/a$	Prandtl-Zahl
$Ra = GrPr$	Rayleigh-Zahl
$Re = wL/\nu$	Reynolds-Zahl
$Sc = \nu/D$	Schmidt-Zahl
$Sh = \beta L/D$	Sherwood-Zahl
$St = \alpha/(w\varrho c_p)$	Stanton-Zahl
$St = 1/Ph$	Stefan-Zahl