

Heinz Herwig
Andreas Moschallski

Wärmeübertragung

**Weitere Titel
aus dem Programm**

Strömungsmechanik A-Z

von H. Herwig

Thermodynamik für Ingenieure

herausgegeben von K. Langeheinecke

Übungsbuch Strömungsmechanik

von H. Oertel jr., M. Böhle und U. Dohrmann

Strömungsmechanik

von H. Oertel jr. und M. Böhle

**Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler
Band 2**

Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium

von L. Papula

**Energietechnik. Systeme zur Energieumwandlung.
Kompaktwissen für Studium und Beruf**

von R. A. Zahoransky

Heinz Herwig
Andreas Moschallski

Wärmeübertragung

Physikalische Grundlagen
Illustrierende Beispiele
Übungsaufgaben mit Musterlösungen

Mit 108 Abbildungen und 37 Tabellen

Studium Technik



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

1. Auflage September 2006

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006

Lektorat: Thomas Zipsner

Der Vieweg Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.
www.vieweg.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de
Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN-10 3-8348-0060-0
ISBN-13 978-3-8348-0060-2

Vorwort

Das Fachgebiet der Wärmeübertragung gehört zu den klassischen Teilgebieten einer Ingenieurausbildung im Bereich Maschinenbau/Verfahrenstechnik. Entsprechend viele Lehrbücher sind auf dem Markt und es bedarf deshalb schon einer guten Begründung, warum ein weiteres hinzukommen soll.

Die kritische Durchsicht vorhandener Lehrbücher und die Erfahrung mit ihrem Einsatz in der Ingenieurausbildung an verschiedenen Universitäten haben die Autoren des vorliegenden Lehrbuches zu der Überzeugung geführt, dass ein in mehreren Aspekten „anderes“ Lehrbuch zur Wärmeübertragung geschrieben werden kann und sollte.

Die besonderen Merkmale dieses Buches sollen sein (und es ist der Beurteilung der Leserinnen und Leser vorbehalten, zu entscheiden, ob dies tatsächlich der Fall ist):

- *Eine konsequente Beschreibung und Erklärung des physikalischen Hintergrundes der jeweils betrachteten Wärmeübertragungssituationen.* In diesem Sinne geht es nicht primär darum, Berechnungsformeln bereitzustellen, sondern zu erklären, welcher physikalische Prozess bei der jeweiligen speziellen Wärmeübertragung abläuft und daraus Möglichkeiten der Berechnung abzuleiten.
- *Eine inhaltliche Verbindung zum Fachgebiet der Thermodynamik überall dort, wo dies von der Sache her als sinnvoll erscheint.* Es ist sehr erstaunlich, wie wenige Querverbindungen zwischen der Wärmeübertragung und der Thermodynamik in den Standard-Lehrbüchern vorhanden sind. Dies führt z. B. dazu, dass die physikalische Größe Entropie und ihre Vermehrung, die sog. Entropieproduktion, in vielen Lehrbüchern zur Wärmeübertragung gar nicht vorkommen, obwohl mit ihrer Hilfe erst bestimmte wichtige Teilaspekte der Physik der Wärmeübertragung beschrieben und erklärt werden können.
- *Eine Beschränkung auf die grundlegenden und wichtigsten Mechanismen der Wärmeübertragung, die eine Behandlung im Rahmen einer einsemestrigen Vorlesung gestattet.* Dies erfordert eine sorgfältige Auswahl der für das generelle Verständnis entscheidenden Aspekte und verbietet eine umfangreiche „Faktensammlung“ zu im Detail verschiedenen, aber doch ähnlichen Fällen. Die in begrenzter Anzahl aufgenommenen sog. ILLUSTRIERENDEN BEISPIELE sind sorgfältig danach ausgewählt worden, dass sie zum weiteren physikalischen Verständnis der Vorgänge beitragen können. Zusätzlich sind am Ende der Kapitel 5 bis 8 Übungsaufgaben (mit Lösungen) aufgeführt, die den Leserinnen und Lesern die Möglichkeit bieten, selbstständig Berechnungen vorzunehmen. Arbeitsblätter am Ende des Buches sollen den schnellen Einstieg in die Lösung konkreter Probleme erleichtern.

Das vorliegende Buch wendet sich an Studierende der Fachrichtungen Maschinenbau, Verfahrenstechnik und Physik an Universitäten und Fachhochschulen sowie an Ingenieurinnen und Ingenieure in der industriellen Praxis, die ihr Fachwissen auffrischen oder erweitern wollen.

Erkenntnisgewinn unterschiedlichster Art, so auch in Bezug auf die Physik der Wärmeübertragung, kann Freude bereiten oder sogar Spaß machen! Versuchen Sie es einmal, liebe Leserinnen und Leser!

Danksagung

Dieses Buch konnte in der vorliegenden Form nur entstehen, weil wir die tatkräftige Unterstützung mehrerer Studenten hatten, die mit großem Einsatz zum Gelingen beigetragen haben.

Die Hauptlast hat dabei Herr Eike Wolgast getragen, der \LaTeX geradezu „virtuos“ beherrscht. Zusätzliche Unterstützung kam von Herrn Henning Olbert, der maßgeblich die Bilder erstellte. Darüber hinaus ist Frau Moldenhauer zu nennen, die auch die unleserlichste Handschrift in einen sinnvollen Text verwandeln kann.

Der Verlag hat uns bei der Erstellung des Manuskriptes stets tatkräftig unterstützt.

Allen sei herzlich gedankt!

Formale Besonderheiten in diesem Buch

Auf folgende Besonderheiten bei der Gestaltung des Buches soll an dieser Stelle hingewiesen werden:

- Alle dimensionsbehafteten Größen sind konsequent mit einem * versehen worden. Größen ohne * sind dimensionslos.
- Bei der Angabe von Dimensionen bedeutet ein schräger Bruchstrich, dass alle folgenden Größen im Nenner stehen. In diesem Sinne hat also z. B. $[\text{kg}/\text{ms}]$ die Bedeutung von $[\text{kg}/(\text{ms})]$.
- Für Temperaturangaben gilt folgende Vereinbarung:
 - absolute (thermodynamische) Temperatur: T^* in K (Kelvin),
 - Celsius-Temperatur: t^* in $^{\circ}\text{C}$; mit $t^* = (T^* - 273,15\text{K})^{\circ}\text{C}/\text{K}$.
- Die weiterführenden Literaturangaben sind in Form von Fußnoten angegeben.
- In den einzelnen Kapiteln sind ILLUSTRIERENDE BEISPIELE aufgeführt, bei denen das Hauptaugenmerk auf der Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge und nicht auf der konkreten Berechnung liegt.
- Am Ende der Kapitel 5 bis 8 sind *Übungsaufgaben* mit Kurzlösungen angegeben, die den Leserinnen und Lesern die Möglichkeit bieten, selbstständig Berechnungen durchzuführen. Am Ende des jeweiligen Kapitels sind die Lösungswege mit ausführlichen Erläuterungen dokumentiert.
- Im Anhang des Buches sind *Arbeitsblätter* zu den einzelnen Themengebieten zusammengestellt, die den schnellen Einstieg in die Lösung von Aufgaben ermöglichen sollen.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der illustrierenden Beispiele	XIII
Formelzeichen	XV
1 Einführende Beispiele	1
1.1 Zwei Beispiele aus dem Alltag	1
1.2 Zwei Beispiele aus technischen Anwendungen	2
2 Begriffs- und Zielbestimmung	3
2.1 Was ist „Wärme“?	3
2.2 Was ist „Wärmeübertragung“?	4
2.3 Was ist eine „gute Wärmeübertragung“?	4
2.4 Was soll das Fachgebiet „Wärmeübertragung“ leisten können?	6
3 Dimensionsanalytische Überlegungen	9
3.1 Vorüberlegungen	9
3.2 Das Π -Theorem	9
3.3 Anwendung des Π -Theorems auf Probleme der Wärmeübertragung	11
4 Allgemeine Betrachtungen zum Wärmeübergang an Systemgrenzen	15
4.1 Kurz-Charakterisierung verschiedener Formen der Wärmeübertragung	15
4.2 Leitungsbasierter Energietransport über eine Systemgrenze	15
4.3 Thermische Randbedingungen, konjugierte Probleme	17
4.4 Entropieproduktion bei der Wärmeübertragung	19
4.5 Der Grenzfall reversibler Wärmeübertragung	20
5 Wärmeleitung	21
5.1 Energiebilanz	21
5.2 Fourier-Ansatz als konstitutive Gleichung	23
5.3 Stationäre, eindimensionale Wärmeleitung	25
5.4 Instationäre Wärmeleitung, Einfluss der Biot-Zahl	28
5.5 Instationäre Wärmeleitung in einer halbbunendlichen ebenen Wand	31
5.6 Übungsaufgaben zur Wärmeleitung	38
5.6.1 Übungsaufgaben und Ergebnisse	38
5.6.2 Lösungswege	42
6 Konvektiver Wärmeübergang	53
6.1 Die Physik des konvektiven Wärmeüberganges	53
6.1.1 Konvektiver Wärmeübergang für $\lambda^* \rightarrow \infty$	56
6.1.2 Konvektiver Wärmeübergang bei homogenen Geschwindigkeitsprofilen	57
6.1.3 Konvektiver Wärmeübergang bei turbulenten Strömungen	58

6.1.4	Wärmeübergang bei natürlicher Konvektion entlang von Wänden	61
6.1.5	Systematik bei konvektiven Wärmeübergängen	63
6.2	Grundgleichungen zur Beschreibung des konvektiven Wärmeüberganges	63
6.2.1	Grundgleichungen für konstante Stoffwerte	65
6.2.2	Bezugszustand für konstante Stoffwerte	66
6.2.3	Berücksichtigung variabler Stoffwerte	67
6.3	Erzwungene Konvektion, laminare Strömung	68
6.3.1	Wärmeübergang bei Körperumströmungen, laminar	69
6.3.2	Wärmeübergang bei Durchströmungen, laminar	74
6.4	Erzwungene Konvektion, turbulente Strömung	78
6.4.1	Wärmeübergang bei Körperumströmungen, turbulent	78
6.4.2	Wärmeübergang bei Durchströmungen, turbulent	82
6.5	Natürliche Konvektion bei Körperumströmungen, laminar	85
6.6	Wärmedurchgang	88
6.7	Komplexe, technisch bedeutende konvektive Wärmeübergangs-Situationen	90
6.7.1	Wärmeübergang am querangeströmten Kreiszyylinder	90
6.7.2	Wärmeübergang an querangeströmten Kreiszyylinder-Bündeln	92
6.7.3	Wärmeübergang bei Prallstrahlen	93
6.8	Bewertungskriterien für konvektive Wärmeübergänge	95
6.8.1	Ökonomische Analyse konvektiver Wärmeübertragung	97
6.8.2	Exergetische Analyse konvektiver Wärmeübertragung	98
6.9	Übungsaufgaben zur konvektiven Wärmeübertragung	106
6.9.1	Übungsaufgaben und Ergebnisse	106
6.9.2	Lösungswege	109
7	Zweiphasen-Wärmeübergang	117
7.1	Die Physik des Zweiphasen-Wärmeüberganges	117
7.2	Dimensionsanalyse und Systematik bei Zweiphasen-Wärmeübergängen	120
7.3	Kondensation	122
7.3.1	Filmkondensation	122
7.3.2	Tropfenkondensation	125
7.3.3	Strömungskondensation	127
7.4	Sieden	128
7.4.1	Behältersieden	128
7.4.2	Strömungssieden	135
7.5	Übungsaufgaben zum Zweiphasen-Wärmeübergang	142
7.5.1	Übungsaufgaben und Ergebnisse	142
7.5.2	Lösungswege	143
8	Wärmeübergang durch Strahlung	147
8.1	Die Physik elektromagnetischer Energieübertragung (Wärmestrahlung)	147
8.2	Globalbilanzen	149
8.2.1	Generelles Vorgehen	150
8.3	Ideales Strahlungsverhalten / Schwarze Körper	151
8.3.1	Das Emissionsverhalten Schwarzer Körper	151
8.3.2	Das Absorptionsverhalten Schwarzer Körper	155
8.3.3	Die Realisierung Schwarzer Körper / Hohlraumstrahlung	156

8.4	Reales Strahlungsverhalten / Reale Körper	156
8.4.1	Das Emissionsverhalten realer Körper im Vergleich zum Schwarzen Körper	158
8.4.2	Das Absorptionsverhalten realer Körper im Vergleich zum Schwarzen Körper	159
8.4.3	Das Reflexionsverhalten realer Körper	161
8.4.4	Das Transmissionsverhalten realer Körper	163
8.5	Strahlungsaustausch zwischen Körpern	164
8.5.1	Sichtfaktoren für zwei Flächen im Strahlungsaustausch	164
8.5.2	Strahlungsaustausch zwischen zwei Schwarzen Körpern	166
8.5.3	Strahlungsaustausch zwischen grauen Lambert-Strahlern	167
8.6	Gasstrahlung	169
8.6.1	Die optische Dicke von Gasschichten	169
8.6.2	Absorption und Emission von Gasräumen	170
8.7	Besonderheiten bei der Solarstrahlung	171
8.7.1	Extraterrestrische Solarstrahlung	171
8.7.2	Terrestrische Solarstrahlung	173
8.8	Übungsaufgaben zum Wärmeübergang durch Strahlung	176
8.8.1	Übungsaufgaben und Ergebnisse	176
8.8.2	Lösungswege	180
9	Wärmetechnische Apparate	189
9.1	Wärmeübertrager	189
9.1.1	Bauformen	189
9.1.2	Globalanalyse	190
9.1.3	Verschmutzungen (Fouling)	191
9.2	Kondensatoren	192
9.2.1	Bauformen	193
9.3	Verdampfer	194
9.3.1	Bauformen	195
9.4	Wärmespeicher	195
9.4.1	Auswahl- und Auslegungskriterien	196
9.4.2	Bauformen und Speichermedien	198
10	Messung von Temperaturen und Wärmeströmen	203
10.1	Temperaturmessungen	203
10.1.1	Berührungsbehafte Messmethoden	203
10.1.2	Berührungsfreie Messmethoden	206
10.1.3	Temperaturmessungen an Körperoberflächen	207
10.2	Wärmestrommessungen	208
10.2.1	Messprinzipien	208
11	Schlussbetrachtung	211
A	Arbeitsblätter	213
B	Stoffwerte	239
C	Standard-Werke zur Wärmeübertragung	243

Verzeichnis der illustrierenden Beispiele

ILLUSTRIERERENDES BEISPIEL 5.1: Messung des mittleren Wärmeübergangskoeffizienten	34
ILLUSTRIERERENDES BEISPIEL 5.2: Wärmeleitungsgeschwindigkeit	35
ILLUSTRIERERENDES BEISPIEL 5.3: Elektrische kontra Warmwasser-Fußbodenheizung	36
ILLUSTRIERERENDES BEISPIEL 6.1: Minimale Entropieproduktion	100
ILLUSTRIERERENDES BEISPIEL 6.2: Verbesserter Wärmeübergang am Rohr durch eine Wärmedämmung des Rohres	101
ILLUSTRIERERENDES BEISPIEL 6.3: Wärmeübergangsmessungen am kalten Körper	102
ILLUSTRIERERENDES BEISPIEL 6.4: Gefühlte Temperatur	103
ILLUSTRIERERENDES BEISPIEL 7.1: Nukiyamas berühmtes Siedeexperiment	139
ILLUSTRIERERENDES BEISPIEL 7.2: Verdunstungskühlung, oder: warum Menschen schwitzen?	141
ILLUSTRIERERENDES BEISPIEL 8.1: Die Erde als Treibhaus	175
ILLUSTRIERERENDES BEISPIEL 9.1: Wärmerohr	199

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

Symbol	Dimension	Bedeutung
a^*	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
\dot{a}^*	W/m^2	spezifische Einstrahlung
\dot{a}_λ^*	$\text{W}/\text{m}^3\text{sr}$	spezifische spektrale Einstrahlung
$\dot{a}_{\lambda,s}^*$	$\text{W}/\text{m}^3\text{sr}$	spezifische spektrale Einstrahlung des Schwarzen Körpers
\dot{a}_s^*	W/m^2	hemisphärische spektrale Einstrahlung des Schwarzen Körpers
$\dot{a}_{\lambda\omega}^*$	$\text{W}/\text{m}^3\text{sr}$	spezifische spektrale Einstrahlungsdichte
$\dot{a}_{\lambda\omega,s}^*$	$\text{W}/\text{m}^3\text{sr}$	spezifische spektrale Einstrahlungsdichte des Schwarzen Körpers
A^*	m^2	wärmeübertragende Fläche
B^*	m	Breite
Bi	-	Biot-Zahl
Bo	-	Bond-Zahl
c_1^*	W/m^2	Schwarzkörper-Konstante
c_2^*	m K	Schwarzkörper-Konstante
c_3^*	m K	Konstante
c^*	$\text{kJ}/\text{kg K}$	spezifische Wärmekapazität
c_s^*	m/s	Schallgeschwindigkeit
c_0^*	m/s	Lichtgeschwindigkeit
D^*	m	Durchmesser
\dot{e}^*	W/m^2	spezifische Ausstrahlung
\dot{e}_λ^*	$\text{W}/\text{m}^3\text{sr}$	spezifische spektrale Ausstrahlung
$\dot{e}_{\lambda,s}^*$	$\text{W}/\text{m}^3\text{sr}$	spezifische spektrale Ausstrahlung des Schwarzen Körpers
\dot{e}_s^*	W/m^2	hemisphärische spezifische Ausstrahlung des Schwarzen Körpers
$\dot{e}_{\lambda\omega}^*$	$\text{W}/\text{m}^3\text{sr}$	spezifische spektrale Ausstrahlungsdichte
E_0^*	W/m^2	Solarkonstante
Ec	-	Eckert-Zahl
f^*	$1/\text{s}$	Frequenz
F_{12}	-	Sichtfaktor
F_{21}	-	Sichtfaktor
Fr	-	Froude-Zahl
g^*	m/s^2	Erdbeschleunigung
Gr	-	Grashof-Zahl
$\hat{G}r$	-	Grashof-Zahl
Δh_V^*	kJ/kg	spezifische Verdampfungsenthalpie
H	-	dimensionslose Höhe

Symbol	Dimension	Bedeutung
H^*	m	Höhe
j^*	W	Einstrahlungsleistung
Ja	-	Jacobs-Zahl
k	-	dimensionslose Rauheit
k^*	W/m ²	Wärmedurchgangskoeffizient
k^*	m	charakteristische Rauheitshöhe
k_G^*	1/m	spektraler Absorptionskoeffizient
$\dot{k}_{\lambda\omega}^*$	W/m ³ sr	normal-spezifische spektrale Einstrahlungsdichte
\dot{k}_{ω}^*	W/m ² sr	normal-spezifische Einstrahlungsdichte
L^*	m	Länge
$\dot{i}_{\lambda\omega}^*$	W/m ³ sr	normal-spezifische spektrale Ausstrahlungsdichte
$\dot{i}_{\lambda\omega,s}^*$	W/m ³ sr	normal-spezifische spektrale Ausstrahlungsdichte des Schwarzen Körpers
\dot{i}_{ω}^*	W/m ² sr	normal-spezifische Ausstrahlungsdichte
$\dot{i}_{\omega,s}^*$	W/m ² sr	normal-spezifische Ausstrahlungsdichte des Schwarzen Körpers
m	-	Anzahl der Einflussgrößen
\dot{m}^*	kg/s	Massenstrom
Ma	-	Mach-Zahl
n^*	m	Koordinate
Nu	-	Nußelt-Zahl
p^*	N/m ²	Druck
p_{DS}^*	N/m ²	Sättigungs-Dampfpartialdruck
Pr	-	Prandtl-Zahl
\dot{q}^*	W/m ²	Wärmestromdichte
\dot{Q}^*	W	Wärmestrom
r	-	Rückgewinnfaktor
r^*	m	Radius
r	-	Reflexionsgrad bzw. hemisphärischer Gesamt-Reflexionsgrad
r_{λ}	-	hemisphärischer spektraler Reflexionsgrad
$r_{\lambda\omega}$	-	gerichteter spektraler Reflexionsgrad
r_{ω}	-	gerichteter Gesamt-Reflexionsgrad
R	-	dimensionsloser Radius
R^*	Ω	elektrischer Widerstand
\dot{R}^*	W	Abstrahlungsleistung
R_{α}^*	K/W	Wärmeübergangswiderstand
R_k^*	K/W	Wärmedurchgangswiderstand
R_{λ}^*	K/W	Wärmeleitwiderstand
Re	-	Reynolds-Zahl
s^*	m	Schichtdicke
St	-	Stanton-Zahl
t^*	°C	Temperatur
T^*	K	Temperatur

Symbol	Dimension	Bedeutung
T_{km}^*	K	kalorische Mitteltemperatur
ΔT^*	K	Temperaturdifferenz
ΔT_{B}^*	K	Bezugstemperaturdifferenz
ΔT_{m}^*	K	mittlere Temperaturdifferenz
$\Delta_{\ln} T^*$	K	logarithmische mittlere Temperaturdifferenz
Tu	%	Turbulenzgrad
U^*	m	Umfang
u^*	m/s	Geschwindigkeit
\hat{U}	-	auf u_{∞}^* bezogene Geschwindigkeit
\hat{U}^*	mV	Thermospannung
V^*	m ³	Volumen
x	-	dimensionslose Koordinate
x^*	m	Koordinate
x_{th}	-	thermodynamischer Dampfgehalt
\tilde{x}	-	transformierte Koordinate
y^*	m	Koordinate
z^*	m	Koordinate

Griechische Buchstaben

Symbol	Dimension	Bedeutung
α^*	W/m ² K	Wärmeübergangskoeffizient
α	-	Absorptionsgrad bzw. hemisphärischer Gesamt-Absorptionsgrad
α_{λ}	-	hemisphärischer spektraler Absorptionsgrad
$\alpha_{\lambda\omega}$	-	gerichteter spektraler Absorptionsgrad
α_{ω}	-	gerichteter Gesamt-Absorptionsgrad
β^*	1/K	isobarer thermischer Ausdehnungskoeffizient
δ^*	m	Strömungsgrenzschichtdicke
δ_{T}^*	m	Temperaturgrenzschichtdicke
δ_{W}^*	m	Wandschicht
ε	-	Emissionsgrad bzw. hemisphärischer Gesamt-Emissionsgrad
ε_{A}	-	Thermokraft-Koeffizient
ε_{B}	-	Thermokraft-Koeffizient
ε_{λ}	-	hemisphärischer spektraler Emissionsgrad
$\varepsilon_{\lambda\omega}$	-	gerichteter spektraler Emissionsgrad
$\varepsilon_{\lambda\omega,n}$	-	gerichteter spektraler Emissionsgrad in Normalenrichtung
ε_{ω}	-	gerichteter Gesamt-Emissionsgrad
$\varepsilon_{\omega,n}$	-	gerichteter Gesamt-Emissionsgrad in Normalenrichtung
ε_{12}	-	Strahlungsaustauschzahl
η^*	kg/m s	(molekulare) dynamische Viskosität
η_{L}	-	Ladegrad
η_{S}	-	Speichernutzungsgrad
η_{t}^*	kg/m s	turbulente dynamische Viskosität

Symbol	Dimension	Bedeutung
η_{eff}^*	kg/m s	effektive dynamische Viskosität
κ	-	Isentropenexponent
κ_G	-	optische Dicke einer Gasschicht
λ^*	W/mK	(molekulare) Wärmeleitfähigkeit
λ_t^*	W/mK	turbulente Wärmeleitfähigkeit
λ_{eff}^*	W/mK	effektive Wärmeleitfähigkeit
λ^*	μm	Wellenlänge
ρ^*	kg/m ³	Dichte
ρ	-	Reflexionsanteil
σ^*	W/m ² K ⁴	Stefan-Boltzmann-Konstante
σ_j^*	N/m	Grenzflächenspannung
τ	-	Transmissionsanteil
τ^*	s	Zeit
τ_λ	-	spektraler Transmissionsgrad
Θ	-	dimensionslose Temperatur

Indizes

Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung
a	außen	M	massenbezogen
ad	adiabat	max	maximal
B	Bezug	PS	Parallelschaltung
d	dampfförmig	Ref	Referenz
<i>D</i>	Durchmesser	RS	Reihenschaltung
f	flüssig	S	Schwarzer Körper, Siede-
g	gasförmig	therm	thermisch
ges	gesamt	trans	Transmission
h	hydraulisch	U	Umgebung
i	innen	V	Verdampfung
<i>j</i>	Variablenindex	V	volumenbezogen
krit	kritisch	W	Wand
K	Körper	∞	ungestörte Anströmung
<i>L</i>	(Bezugs-)Länge	0	zur Zeit $\tau^* = 0$