

Wärme- und Stoffübertragung

Herausgegeben von Ulrich Grigull



Ulrich Grigull · Heinrich Sandner

Wärmeleitung

2. Auflage

Mit 52 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo Hong Kong 1990

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Grigull

Dr.-Ing. Heinrich Sandner

Lehrstuhl A für Thermodynamik, TU München
Arcisstr. 21, 8000 München 2

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Grigull

Lehrstuhl A für Thermodynamik, TU München
Arcisstr. 21, 8000 München 2

ISBN-13:978-3-540-52315-4 e-ISBN-13:978-3-642-84132-3

DOI: 10.1007/978-3-642-84132-3

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Grigull, Ulrich.

Wärmeleitung/Ulrich Grigull; Heinrich Sandner. – 2. Aufl. –

Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong: Springer, 1990

(Wärme- und Stoffübertragung)

ISBN-13:978-3-540-52315-4

NE: Sandner, Heinrich

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk 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.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Universitätsdruckerei H. Stürtz AG, Würzburg

2160/3020-543210

Vorwort zur zweiten Auflage

Dieses Buch behandelt die Lehre von der Wärmeleitung in etwa jenem Umfang, wie er in den Studienrichtungen Maschinenwesen, Verfahrenstechnik und Elektrotechnik an einer Technischen Universität gelehrt werden kann. Es werden keine speziellen Vorkenntnisse vorausgesetzt und auch die verwendeten mathematischen Hilfsmittel entsprechen im wesentlichen dem Stoff des normalen Unterrichts in den beschriebenen Fachrichtungen. Das Buch ist sowohl zum Gebrauch neben den Vorlesungen wie auch als Repetitorium vor Prüfungen gedacht, es soll aber auch dem in der Praxis tätigen Ingenieur bei der Lösung seiner Wärmeleitprobleme helfen.

Dem Leser soll vor allem gezeigt werden, daß für eine große Zahl technisch wichtiger Fragestellungen exakte und Näherungslösungen zur Verfügung stehen und daß sich in vielen Fällen erste Abschätzungen auf sehr elementare Weise durchführen lassen, sofern man auch komplizierte Lösungsfunktionen hinreichend aufbereitet. Erst damit nutzen wir die Vorarbeiten jener großen Mathematiker früherer Generationen, die einen beträchtlichen Vorrat an Lösungen und Lösungsmethoden bereitgestellt haben. Die Anwendungen solcher Methoden sind in diesem Buch an Beispielen gezeigt, die aus verschiedenen Bereichen von Wissenschaft und Technik stammen. Damit wird auch das breite Anwendungsgebiet der Wärmeleitung deutlich.

Die Anwendung der Theorie wird häufig dadurch erschwert, daß man die notwendigen Stoffgrößen nicht kennt, hier vor allem die Wärmeleitfähigkeit und die Temperaturleitfähigkeit. Dafür sind diesem Buch ausführliche Stoffwerttabellen beigegeben, die zum Teil auch die Temperaturabhängigkeit der Stoffgrößen berücksichtigen. Ein eigener Abschnitt führt in die Theorie der Transportgrößen ein.

Die physikalischen Gleichungen sind in diesem Buche grundsätzlich als Größengleichungen geschrieben; Ausnahmen sind besonders gekennzeichnet. In Zahlenbeispielen und -tabellen sind die Einheiten des Internationalen Einheitensystems (SI-Einheiten) und deren dezimale Teile und Vielfache verwendet. Umrechnungstabellen erleichtern die Benutzung älterer Literatur.

In diese zweite Auflage wurden einige Bemerkungen und Hinweise eingefügt, die dem Verständnis des Textes dienen sollen. Ferner wurden drei Beispiele neu aufgenommen, die die Anwendung der Theorie auf praktische Fälle zeigen. Sie betreffen den Wärmewiderstand eines exzen-

trisch verlegten Rohres, die Ermittlung der wirtschaftlichsten Isolierdicke sowie die Stabilitätsgrenzen einer exothermen chemischen Reaktion, zugleich als Beispiel einer stark temperaturabhängigen Wärmequelle.

Die Verfasser wünschen auch dieser Neuauflage eine günstige Aufnahme beim Leserkreis der Serie „Wärme- und Stoffübertragung“.

München, im Februar 1990

U. Grigull
H. Sandner

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Tabellen im Text	IX
Häufig verwendete Formelzeichen	X
1. Einführende Bemerkungen	1
1.1 Grundbegriffe	1
1.2 Fourier-Gleichung	1
1.3 Anfangs- und Randbedingungen	3
2. Transportkoeffizienten	5
2.1 Wärmeleitfähigkeit von Metallen und Metallegierungen	5
2.2 Transportphänomene in verdünnten Gasen	8
2.3 Wärmeleitung in geschichteten Körpern	10
2.3.1 Wärmestrom normal zur Schichtung	10
2.3.2 Wärmestrom parallel zur Schichtung	12
2.3.3 Vergleich zwischen λ_n und λ_p	13
2.4 Größenordnung von Wärmestromdichten und Koeffizienten	14
3. Stationäre eindimensionale Wärmeleitung	16
3.1 Einführende Bemerkungen	16
3.2 Péclet-Gleichungen	17
3.3 Quasistationäre Wärmeleitung	21
3.3.1 Wärmeverlust isolierter Rohre	21
3.3.2 Temperaturabfall in Rohrleitungen	21
3.3.3 Wirtschaftlichste Isolierdecke	22
3.3.4 Abkühlung von Behältern	25
3.3.5 Thermometer im beheizten Bad	26
3.4 Vergrößerte Oberflächen	27
4. Stationäre Wärmeleitung mit Wärmequellen	33
4.1 Konstante Wärmequellen	33
4.2 Stark temperaturabhängige Wärmequellen (Chemische Reaktionen)	35
5. Stationäre mehrdimensionale Wärmeleitung	42
5.1 Formkoeffizient und Formwiderstand	42
5.2 Transformation nach Kirchhoff	44
5.3 Konforme Abbildung	45
5.3.1 Exzentrische Rohre und verwandte Probleme	50
5.4 Fiktive Wärmequellen und -senken	55
5.5 Zeichnerische Verfahren	57
5.6 Relaxationsmethode	59
5.7 Experimentelle Analogieverfahren	62
5.7.1 Elektrolytischer Trog	62
5.7.2 Seifenhaut-Analogie	62
5.8 Zusammenstellung von Formkoeffizienten	63

6. Nichtstationäre eindimensionale Wärmeleitung	68
6.1 Grundlösungen der Fourier-Gleichung	68
6.2 Dimensionsanalyse	70
6.3 Halbbundlicher Körper	72
6.4 Zwei halbbundliche Körper in thermischem Kontakt	76
6.5 Theorem von Duhamel	78
6.6 Temperatenausgleich in einfachen Körpern	81
6.7 Näherungslösungen	86
6.8 Differenzenverfahren	90
6.9 Experimentelle Analogieverfahren	96
6.9.1 Das elektrische Analogiemodell (Beuken 1936)	97
6.9.2 Das hydraulische Modell (Moore 1935, Lukyanow 1936)	98
6.10 Laplace-Transformation	100
6.11 Temperatur periodisch veränderlich	105
7. Wärmeexplosionen	111
8. Kontinuierliche Wärmequellen	115
9. Wandernde Wärmequellen	118
10. Nichtstationäre mehrdimensionale Wärmeleitung	123
11. Nichtstationäre Wärmeleitung mit Phasenänderung	128
11.1 Die exakte Lösung nach Neumann	129
11.2 Die quasistationären Näherungslösungen	134
Literatur	140
Anhang	141
A Internationales Einheitensystem	141
B Umrechnung von Einheiten	143
C Fundamentalkonstanten der Physik	145
D Kenngrößen der Wärme- und Stoffübertragung	146
E Thermophysikalische Stoffgrößen von Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen	147
F Wärmeleitfähigkeit von Flüssigkeiten bei mäßigen Drücken	154
G Zahlentafeln mathematischer Funktionen	158
Sachverzeichnis	161

Verzeichnis der Tabellen im Text

Tabelle 2.1	Ordnungszahl Z , relative Atommasse A_r , charakteristische Temperatur θ , Schmelztemperatur T_s , Wärmeleitfähigkeit λ_θ und λ_{θ_1} nach Gleichung (2.6) und (2.7) von Metallen [2.2]	8
Tabelle 2.2	Transportgrößen von Gasen bei mäßigen Drücken	11
Tabelle 2.3	Wärmestromdichten q in W/m^2 oder W/cm^2	14
Tabelle 2.4	Wärmeleitfähigkeiten λ in W/Km und Temperaturleitfähigkeiten a in m^2/s	15
Tabelle 2.5	Wärmeübergangskoeffizienten α in W/Km^2	15
Tabelle 2.6	Wärmeeindringkoeffizienten $b = \lambda/a^{1/2} = (\lambda \rho c_p)^{1/2}$ in $Ws^{1/2}/Km^2$	15
Tabelle 3.1	Vergleich verschiedener Rippenmaterialien (bei $\vartheta = 20^\circ C$)	32
Tabelle 4.1	Konstanten der eindimensionalen Wärmeleitung	33
Tabelle 4.2	Zahlenwerte der Stabilitäts-Grenzparameter bei optimaler Kühlung ($\Omega = 0$)	41
Tabelle 5.1	Wärmeleitfähigkeit λ und integrale Wärmeleitfähigkeit A von Uran-dioxid als Funktion der Celsius-Temperatur [5.2]	45
Tabelle 5.2	Relaxationsverfahren für eine Ofenecke nach Bild 5.10	61
Tabelle 5.3	Formkoeffizienten für Kugel oder Scheibe im ausgedehnten Medium	67
Tabelle 6.1	Halbwertzeiten beim halbbunendlichen Körper	74
Tabelle 6.2	Werte der Gleichungen (6.41) bis (6.44) für die ebene Platte	87
Tabelle 6.3	Werte der Gleichungen (6.41) bis (6.43) und (6.45) für den Zylinder	87
Tabelle 6.4	Werte der Gleichungen (6.41) bis (6.43) und (6.46) für die Kugel	88
Tabelle 6.5	Halbwertzeiten bei der ebenen Platte	90
Tabelle 6.6	Berechnungsschema des numerischen Differenzenverfahrens mit $p = 1/2$	95
Tabelle 6.7	Operationen und Korrespondenzen der \mathcal{L} -Transformation	102
Tabelle 10.1	Modelle zur mehrdimensionalen Wärmeleitung	124
Tabelle 11.1	Stoffwerte von Wasser in flüssiger und fester Phase (Eis) bei $p = 1$ bar	134
Tabelle 11.2	Vergleich der Gefrierzeiten für einfache Körper.	139

Häufig verwendete Formelzeichen

(Dimensionslose Kenngrößen siehe Anhang D)

Zeichen	Bedeutung	SI-Einheit (als Beispiel)
a	Temperaturleitfähigkeit $a = \lambda / (\rho c_p)$	m^2/s
A	Fläche	m^2
b	Wärmeeindringkoeffizient $b = \sqrt{\lambda \rho c_p}$	$\text{Ws}^{1/2}/\text{K}\cdot\text{m}^2$
c_p, c_v	spezifische Wärmekapazität	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
d, D	Durchmesser	m
D	Diffusionskoeffizient	m^2/s
g	Fallbeschleunigung	m/s^2
h	spezifische Enthalpie	J/kg
H	Enthalpie	J
I	Stromstärke	A
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$\text{W}/\text{K}\cdot\text{m}^2$
l, L	Länge	m
m, M	Masse	kg
p	Druck	$\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$
p	Modul	1
q	Wärmestromdichte	W/m^2
Q	Wärmemenge	J
r, R	Radius	m
s	Laplace-Parameter	$1/\text{s}$
s	Strecke	m
S	Formkoeffizient	m
t	Zeit	s
T	thermodynamische Temperatur	K
u	Umfang	m
U	elektrische Spannung	V
V	Volumen	m^3
W	Leistungsdichte	W/m^3
x, y, z	kartesische Ortskoordinaten	m
X	Bezugslänge	m
α	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/\text{K}\cdot\text{m}^2$
δ	Eigenwert (Platte)	1
δ	Strecke	m
$\varepsilon_w, \varepsilon_\lambda, \varepsilon_\infty$	Rippenwirkungsgrade	$1 = \text{W}/\text{W}$
ξ, η, ζ	bezogene Ortskoordinaten	$1 = \text{m}/\text{m}$
η	dynamische Viskosität	$\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m} = \text{Pa}\cdot\text{s}$
ϑ	Temperatur, Temperaturdifferenz	K

Zeichen	Bedeutung	SI-Einheit (als Beispiel)
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/Km
ρ	Dichte	kg/m ³
ρ	bezogener Radius	l = m/m
τ	Zeit	s
φ	Winkel	rad = 1 = m/m
Φ	Wärmestrom	W
ψ	Stromfunktion	K