

# Die Wärmeübertragung

Ein Lehr- und Nachschlagebuch  
für den praktischen Gebrauch

von

**Dipl.-Ing. M. ten Bosch**

Professor an der eidgen. Technischen Hochschule  
in Zürich

Zweite, stark erweiterte Auflage

Mit 169 Textabbildungen  
69 Zahlentafeln und 53  
Anwendungsbeispielen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1927

ISBN 978-3-662-36005-7      ISBN 978-3-662-36835-0 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-36835-0

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung  
in fremde Sprachen, vorbehalten.

Copyright 1927 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg  
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1927  
Softcover reprint of the hardcover 2nd edition 1927

## Aus dem Vorwort zur ersten Auflage.

Die Gesetze der Wärmeübertragung bilden ein Kapitel der Thermodynamik, das in den Lehrbüchern nicht oder nur sehr stiefmütterlich behandelt wird. Darum herrscht auch in der Praxis im allgemeinen über die in jedem Falle anzuwendenden Konstanten noch große Unsicherheit.

Prof. Dr. Mollier hat Anfang 1897 in der Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure den damaligen Stand unseres Wissens über den Wärmedurchgang klargelegt. Hausbrand hat in seinem Buche „Verdampfen, Kondensieren, Kühlen“ eine große Anzahl Versuchsergebnisse und Erfahrungszahlen gesammelt. Wenn auch die neuen Versuche und Untersuchungen jeweilen erwähnt und berücksichtigt sind, so kommt der grundlegende Charakter, namentlich der Untersuchungen von Prof. Nusselt, darin nicht so zur Geltung, wie es ihrer hohen Bedeutung für die Wärmeübertragung gebührt. Diese Untersuchungen machen nämlich die vielen rein-empirischen Formeln, womit bisher in der Praxis gerechnet wurde, in vielen Fällen überflüssig. Solche Formeln können wohl für bestimmte Fälle und innerhalb enger Grenzen (welche aber meistens gar nicht angegeben werden) die Verhältnisse richtig darstellen, sind aber als allgemein gültige Gesetze unbrauchbar.

Es scheint daher sicher begründet, den gegenwärtigen Stand unseres Wissens über die Wärmeübertragung nochmals zusammenhängend zu erörtern, um dem Konstrukteur, dem es meist an Zeit und Gelegenheit fehlt, die neuen Untersuchungen jeweilen zu verfolgen, einen Leitfaden zu geben, welcher ihm beim Entwurf zu selbständigem Denken und Rechnen anregen soll.

Bisher war man immer bestrebt, Erfahrungswerte für die Wärmedurchgangszahlen zu sammeln. In einem Beispiel<sup>1)</sup> ist nun für einen ganz einfachen Fall nachgewiesen, wie aussichtslos es ist, diese Wärmedurchgangszahlen direkt in eine Formel oder Tabelle zu bringen. Eine Einsicht in die ziemlich verwickelten Verhältnisse wird nur dann erst möglich, wenn die Wärmedurchgangszahlen in ihren übrigens schon lange bekannten Einzelteilen zerlegt werden.

Diese Methode hat den bedeutenden Vorteil, daß der Einblick in den Einfluß der verschiedenen Faktoren gewährt bleibt; was für den Konstrukteur oft wichtiger ist, als die Kenntnis der genauen Zahlen selbst.

Zürich, Oktober 1921.

ten Bosch.

---

<sup>1)</sup> 2. Aufl., S. 219.

## Vorwort zur zweiten Auflage.

Bei der Neubearbeitung war derselbe Grundgedanke leitend, wie bei der Abfassung der ersten Auflage, nämlich dem Ingenieur möglichst zuverlässige Zahlenwerte für die Berechnung von Wärmeaustauschapparaten zu geben. Um dieses Ziel zu erreichen, war es notwendig, die theoretischen Grundlagen des Wärmeüberganges ausführlicher zu behandeln, wobei sich auch die Verwendung höherer Mathematik nicht vermeiden ließ. Die Faktoren, welche den Wärmeübergang beeinflussen, sind so zahlreich, daß eine sachgemäße Anwendung der Zahlenwerte erst nach gründlichem Studium der Theorie möglich ist. Durch eine theoretische Untersuchung<sup>1)</sup> ist es gelungen, eine allgemeine Formel für den Wärmeübergang von in Rohren strömenden Flüssigkeiten aufzustellen. Die Abweichungen von dieser allgemeinen Gleichung am Anfang des Rohres, durch Konvektionsströme, durch Wirbelung, usw. lassen sich ebenfalls abschätzen. Damit ist es nun möglich, für irgendeine Flüssigkeit die Wärmeübergangszahlen mit praktisch ausreichender Genauigkeit zu bestimmen.

Die Erweiterung der Theorie erforderte eine vollständige Umrechnung der vielen Zahlentafeln. Es wäre mir nicht möglich gewesen, diese umfangreiche Arbeit in so kurzer Zeit zu bewältigen, ohne die zuverlässige Hilfe meines Assistenten, Herr Dipl.-Ing. A. Kuhn, der die Zahlenrechnungen zu einem großen Teil durchgeführt hat. Es ist mir eine angenehme Pflicht, ihm auch hier für seine Mitarbeit zu danken.

Alle Abschnitte haben wesentliche Erweiterungen erfahren, und die neuesten Forschungen (u. a. Gasstrahlung) sind berücksichtigt. Die Anwendungsbeispiele wurden vermehrt, um für verschiedene Branchen die praktische Brauchbarkeit der gefundenen Zahlenwerte nachzuweisen. Bei elektrischen Apparaten, wo man durch geeignete Formgebung des Heizkörpers hohe Wärmeübergangszahlen erreichen kann, kommt man ebenfalls ohne empirische Formeln sehr gut aus.

Es würde mich freuen, wenn das Buch auch als Leitfaden für den Unterricht an Technischen Hochschulen für dieses Spezialgebiet der Thermodynamik Verwendung finden würde.

Zürich, November 1926.

ten Bosch.

---

<sup>1)</sup> Zuerst veröffentlicht in der Z. V. d. I. 1926, S. 911.

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung . . . . .	1
<b>I. Wärmestrahlung.</b>	
1. Entstehung, Vernichtung, Strahlungsgesetze . . . . .	2
2. Gasstrahlung . . . . .	9
3. Die gegenseitige Bestrahlung zweier Körper . . . . .	21
<b>II. Wärmeleitung und Wärmedurchgang für stationäre Wärmeströmungen.</b>	
1. Die allgemeinen Differentialgleichungen . . . . .	35
2. Die planparallele Platte . . . . .	37
3. Der Wärmedurchgang und die Wärmedurchgangszahl . . . . .	41
4. Die Wärmeleitzahlen . . . . .	43
5. Berücksichtigung der Veränderlichkeit der Wärmeleitzahl mit der Temperatur . . . . .	52
6. Das Rohr.	
a) Glatte Röhre . . . . .	55
b) Rippenrohre . . . . .	62
7. Wärmedurchgang bei veränderlichen Temperaturen.	
a) Die mittlere Temperaturdifferenz . . . . .	69
b) Der Temperaturverlauf . . . . .	71
c) Unstetigkeit . . . . .	80
8. Die Kugel . . . . .	84
<b>III. Die Theorie des Wärmeüberganges.</b>	
1. Ableitung einer allgemeinen Beziehung auf Grund des Ähnlichkeitsprinzips . . . . .	87
2. Zusammenhang zwischen Strömungswiderstand und Wärmeübergang . . . . .	97
3. Einfluß der Rohrlänge . . . . .	101
4. Einfluß der Temperatur . . . . .	106
5. Vergleich der Theorie mit den Versuchsergebnissen für die Strömung einer elastischen Flüssigkeit durch glatte, gerade und kreisförmige Röhren . . . . .	107
6. Der Wärmeübergang in tropfbaren Flüssigkeiten . . . . .	111
7. Einfluß der Abweichungen vom geraden, glatten und kreisförmigen Rohr.	
a) Künstlich erzeugte Wirbel . . . . .	118
b) Rauhe Röhren . . . . .	119
c) Gekrümmte Röhren (Rohrschlangen) . . . . .	120
d) Andere Querschnittsformen . . . . .	122
e) Ebene Platte . . . . .	124
8. Wärmeübergang bei der freien Strömung . . . . .	126
9. Wärmeübergang bei der Strömung senkrecht zur Rohrachse . . . . .	129
10. Wärmeübergang für kondensierenden Dampf . . . . .	146
11. Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl von der Zeit . . . . .	151
<b>IV. Die Wärmeübergangszahlen.</b>	
Allgemeine Bemerkungen . . . . .	152
1. Die Wärmeübergangszahlen für Luft . . . . .	157
a) Für die Strömung durch Röhren . . . . .	159
b) Für die freie Strömung . . . . .	166
c) Für die Strömung senkrecht zur Rohrachse . . . . .	173
d) Die Wärmeübergangszahlen für Rauchgase . . . . .	176
2. Die Wärmeübergangszahlen für überhitzten Wasserdampf . . . . .	180

	Seite
3. Die Wärmeübergangszahlen für die Kältemedien und für andere Gase.	
a) Ammoniak . . . . .	189
b) Kohlensäure . . . . .	190
c) Schweflige Säure . . . . .	193
d) Für andere Gase . . . . .	197
4. Die Wärmeübergangszahlen für Wasser.	
a) Für die Strömung durch Rohre . . . . .	198
b) Für die Strömung senkrecht zur Rohrachse . . . . .	202
c) Für siedendes Wasser . . . . .	205
5. Die Wärmeübergangszahlen für andere tropfbare Flüssigkeiten . . . . .	208
Anwendung auf Öl . . . . .	211
6. Die Wärmeübergangszahlen für kondensierenden Dampf . . . . .	214
Die Wärmedurchgangszahlen Dampf-Wasser . . . . .	219

#### V. Anwendungen.

1. Allgemeine Gesichtspunkte für die Konstruktion von Wärmeaustausch- apparaten . . . . .	221
a) Der Einfluß des Materials und der Verunreinigung . . . . .	222
b) Gleichstrom, Gegenstrom, Kreuzstrom . . . . .	225
c) Verhältnis zwischen Rohrdurchmesser und Länge . . . . .	227
2. Die Wärmeübertragung in einer Luftschicht . . . . .	231
3. Berechnung von Doppelrohrkondensatoren für Kältemaschinen . . . . .	236
4. Die Wärmeübertragung in Dampfkesseln . . . . .	239
a) Lokomotivkessel . . . . .	245
b) Flammrohrkessel . . . . .	255
c) Wasserrohrkessel . . . . .	257
5. Verdunstungskühlung . . . . .	259

#### VI. Nicht-stationäre Wärmeströmungen.

Die planparallele Platte . . . . .	272
Mit der Zeit veränderlicher Wärmeaustausch . . . . .	285

#### VII. Wärmequellen.

Elektrische Erwärmung . . . . .	292
---------------------------------	-----

Zahlentafel 15. Werte von $\ln x$ . . . . .	57
"  "  16. Werte von $e^x$ . . . . .	64
"  "  17. Zur Berechnung der mittleren Temperaturdifferenz . . . . .	71

## Buchstabenbezeichnung.

$\vartheta, \vartheta_m, \vartheta_w$ = Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ . $T, T_m, T_w$ = absolute Temperaturen. $\tau$ = Temperaturdifferenz. $\lambda$ = Wärmeleitzahl. $p$ = Druck. $\gamma$ = spezifisches Gewicht. $v$ = spezifisches Volumen. $g$ = Erdbeschleunigung. $\rho = \frac{\gamma}{g}$ = Dichte. $\eta$ = Zähigkeitszahl. $\nu = \frac{\eta}{g}$ = kin. Zähigkeit. $h$ = Stunden.	$c, c_p, c_m$ = spezifische Wärme. $a$ = Temperaturleitfähigkeit. $C_1, C_2, C_0$ = Konstanten. $Q, Q_s$ = Wärmemenge $\alpha$ = Wärmeübergangszahl (W.U.Z.). $k$ = Wärmedurchgangszahl. $w$ = Strömungsgeschwindigkeit. $\beta$ = Ausdehnungszahl. $l, L$ = Länge. $d$ = Rohrdurchmesser. $\delta$ = Wandstärke. $x, y, z$ = Koordinaten. $t$ = Zeit.
---	---

## Wärmeeinheiten.

Die in der Technik gebräuchliche Wärmeeinheit ist die Kilogrammkalorie (kcal), d. i. die Wärmemenge, welche erforderlich ist, um 1 kg Wasser um  $1^{\circ}\text{C}$  zu erwärmen, und zwar von  $14,5$  auf  $15,5^{\circ}\text{C}$  oder, was praktisch auf das gleiche herauskommt, der hundertste Teil der Wärmemenge, welche erforderlich ist, um 1 kg Wasser von  $0$  auf  $100^{\circ}$  zu erwärmen.

1 kcal	= 1000 gcal,
1 kcal	= 4,1842 KWsec = 427 kJm,
1 KWh	= 860 kcal,
1 kW	= 0,238 kcal/s,
1 kcal/h	= 1,17 Watt,
1 kcal/m <sup>2</sup> , h	= 0,000117 W/cm <sup>2</sup> ,
1 PSh	= 632 kcal.

1 B.T.U. (British Thermal Unit.) ist die Wärmemenge, welche erforderlich ist, um 1 Pfund Wasser um  $1^{\circ}$  Fahrenheit zu erwärmen.

$$1 \text{ B.T.U.} = 0,252 \text{ kcal.}$$

$$1 \frac{\text{B.T.U.}}{\text{Fu}\beta, \text{h}, ^{\circ}\text{F}} = 1,49 \text{ kcal/m, h, } ^{\circ}\text{C}.$$

$$1 \frac{\text{B.T.U.}}{\text{Fu}\beta^2, \text{h}, ^{\circ}\text{C}} = 4,86 \text{ kcal/m}^2, \text{ h, } ^{\circ}\text{C}.$$

### Berichtigung.

Auf S. 57, Gleichung (34) lies:

statt 
$$Q = \frac{2 \pi l}{\frac{1}{\alpha_i r_i} + \frac{1}{\alpha_a r_a} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_a}{r_i}} (\vartheta_I - \vartheta_A)$$

richtig 
$$Q = \frac{2 \pi l}{\frac{1}{\alpha_i r_i} + \frac{1}{\alpha_a r_a} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_a}{r_i}} (\vartheta_I' - \vartheta_A).$$