

ISBN 978-3-662-24115-8 ISBN 978-3-662-26227-6 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-26227-6

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

Copyright 1921 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1921.

Vorwort.

Aus dem großen Gebiete der technischen Wärmelehre läßt sich als ein Teilgebiet die Lehre von der Wärmeübertragung abspalten. Mit diesem Worte „Wärmeübertragung“ soll die Gesamtheit jener Erscheinungen bezeichnet werden, welche in der Überführung einer Wärmemenge von einer Stelle des Raumes nach einer anderen Stelle bestehen. Diese Erscheinungen, welche durch die Worte — Wärmeleitung, Wärmeübergang und Wärmestrahlung — gekennzeichnet sind, spielen in der gesamten anorganischen und organischen Natur eine überaus wichtige Rolle. Von besonderer Bedeutung sind sie für die Technik, wie das die nachstehenden drei Gruppen von Beispielen zeigen.

Die erste Gruppe umfaßt die Feuerungsanlagen mit ihren Nebeneinrichtungen, so die Dampfkessel mit ihren Überhitzern und Vorwärmern, die Kondensatoren, die gesamten Feuerungsanlagen der Ziegelei-, Zement-, Kalk-, Glas- und Porzellan-Industrien, der chemischen Industrie und des Hüttenwesens, die Winderhitzer der Eisenhüttenwerke, sowie überhaupt alle Arten von Regeneratoren und Rekuperatoren und die Apparate der Kälteindustrie und der Heizungs- und Lüftungstechnik.

Die zweite Gruppe betrifft jene Aufgaben, die in der Beseitigung einer schädlichen Erwärmung bestehen, so bei der Ableitung der Reibungswärme aus Lagern, bei der Kühlung der Zylinder von Verbrennungsmotoren und Kompressoren und insbesondere bei der Kühlung elektrischer Maschinen.

Bei der dritten Gruppe handelt es sich um die Aufgabe, einen Raum oder einen Körper gegen Wärmeaufnahme oder Wärmeabgabe möglichst zu schützen, also um die Aufgabe der Isolierung.

Die Aufgaben der Gruppe 1 und 2 verlangen möglichste Vermehrung, die Aufgaben der Gruppe 3 möglichste Beschränkung der Wärmeübertragung.

Durch zahlreiche theoretische und experimentelle Arbeiten ist die physikalische Natur der verschiedenen Arten der Wärmeübertragung ziemlich geklärt. Dagegen ist unsere Fähigkeit, die Vorgänge messend und vor allem rechnend zu verfolgen, nur sehr gering und doch ist es klar, daß es in all den obengenannten Fällen der Technik nicht genügt, wenn sie die Mittel kennt, welche die Wärmeübertragung steigern oder mindern, sondern sie will durch Rechnung die Wirkung einer Maßnahme zahlenmäßig vorausbestimmen können. Diesem dringenden Bedürfnis der Technik steht aber, wie schon oben erwähnt, die Unzulänglichkeit unseres Wissens entgegen. Daß dieses Mißverhältnis zwischen Bedürfnis und Fähigkeit immer noch besteht, muß bei der Bedeutung der gestellten Aufgabe befremden. Mit der Erklärung, der man häufig begegnet, daß lediglich ein Übersehen dieses Gebietes seitens der technischen Forschung vorliege und daß das Versäumte nun schleunigst nachzuholen sei, ist die Lage nicht gekennzeichnet. Die Gründe müssen

tiefer liegen; sie können erst am Schlusse des Buches eingehender besprochen werden. Wir müssen uns vorerst mit der kurzen Erklärung begnügen, daß sich die technische Forschung immer wieder durch die einfache Erscheinungsform der Vorgänge verleiten ließ, mit zu nahe liegenden Vorstellungen und zu einfachen rechnerischen Hilfsmitteln an die Probleme heranzutreten. Man wollte mit einfachen Faustformeln auskommen und die darin vorkommenden Beiwerte lediglich durch Versuchsreihen bestimmen, aber dabei hatte man sich noch nicht überzeugt, ob diese Formeln auch annähernd der Ausdruck der Naturgesetze sind — oder kürzer — man suchte Zahlenwerte noch bevor die Gesetze bekannt waren.

Erst die letzten beiden Jahrzehnte brachten Arbeiten, welche erkennen lassen, daß wir am Beginn eines neuen Fortschritts stehen. Diese Arbeiten zeigen aber, daß für jeden, der sich mit den Aufgaben der Wärmeübertragung befaßt, sei er Ingenieur oder technischer Physiker, die Notwendigkeit besteht, außer mit den Erfahrungen der Praxis auch mit den einschlägigen wissenschaftlichen Grundlagen vertraut zu sein. Der Erwerb dieser Kenntnisse ist aber dadurch ungemein erschwert, daß die einschlägigen Arbeiten in den verschiedensten Lehrbüchern und Zeitschriften der Technik, der Experimentalphysik, der theoretischen Physik und der reinen Mathematik verstreut sind und daß die Art der Darstellung je nach dem Leserkreis, für den die Arbeiten bestimmt sind, eine sehr verschiedene ist.

Aus dem Gesagten ist zu erkennen, daß eine Zusammenfassung und einheitliche Darstellung des ganzen Gebietes im Interesse der Technik liegt. Das vorliegende Buch ist ein Versuch, diesem Bedürfnis gerecht zu werden. Bei seiner Abfassung stellte ich mir die Aufgabe, unsere gegenwärtige Kenntnis von den Gesetzen der Wärmeleitung in festen Körpern, Flüssigkeiten und Gasen zusammenzustellen, soweit sie für die technische Forschung oder unmittelbar für die Praxis von Nutzen ist¹⁾. In Anbetracht der Eigenart des Gebietes kam es mir aber darauf an, auch die Grenzen und Lücken unseres Wissens klar hervortreten zu lassen. Deshalb habe ich die behandelten Probleme nicht ausschließlich nach Maßgabe ihrer Lösbarkeit gewählt, sondern mit Auswahl und in tunlichster Kürze auch solche Probleme besprochen, deren Lösung zur Zeit noch nicht gelingt.

Es darf hier die Bemerkung eingeschaltet werden, daß die mathematisch-physikalischen Methoden, die in diesem Buche entwickelt werden, auch bei der Lösung anderer technischer Aufgaben sinngemäße Anwendung finden können, so bei der Entgasung von Brennstoffen, ferner bei dem Auflösen fester Körper in Flüssigkeiten, bei der Trocknung feuchter Körper und überhaupt bei allen Vorgängen mit Diffusion.

An mathematischen Kenntnissen habe ich nur die Grundzüge der höheren Mathematik vorausgesetzt. Was darüber hinausgeht, wie etwa den Begriff der Randwertaufgaben, die Fourierschen Reihen

¹⁾ Meine ursprüngliche Absicht, auch die Vorgänge der Verdampfung und Kondensation und die Vorgänge der Wärmestrahlung zu behandeln, mußte ich aufgeben, da ich nach der jahrelangen Unterbrechung, die die Bearbeitung des Buches durch den Krieg erfahren hatte, bald zu einem Abschluß kommen mußte.

oder die Besselschen Funktionen, habe ich im Buche selbst entwickelt, denn ich wollte es unbedingt vermeiden, den Leser auf rein mathematische Lehrbücher verweisen zu müssen, deren Studium ihm neuerdings Zeit gekostet hätte. Allerdings dürfen diese Entwicklungen nicht in dem Sinne verstanden werden, wie der Mathematiker seine Lehrsätze darlegt und beweist. Es kam mir vielmehr darauf an, an Hand der besprochenen physikalischen Vorgänge Zweck und Methode eines mathematischen Verfahrens zu zeigen, soweit dies für das Verständnis des Buches notwendig ist. Wenn dann der Leser auf diese Weise das Wesen der mathematischen Operation erfaßt hat, dann wird es ihm viel leichter sein, an Hand der einschlägigen mathematischen Literatur sich noch weiter zu orientieren, falls er aus persönlichen Gründen hierzu das Bedürfnis haben sollte.

Die Formeln, die am Ende der Ableitungen sich ergeben, enthalten häufig Potenzfunktionen, Exponentialfunktionen, natürliche Logarithmen und Reihen; sie würden also zu umständlichen und zeitraubenden Zahlenrechnungen führen. Ich habe diesem Nachteil dadurch zu begegnen gesucht, daß ich die Formeln für die häufigst vorkommenden Gebiete durchgerechnet und die Ergebnisse in Zahlentabellen oder Kurvendarstellungen zusammengestellt habe. Ich hoffe damit vor allem einem Bedürfnis der Praxis entgegengekommen zu sein.

Auf den ersten Seiten des Anhangs findet der Leser eine Zusammenstellung der im Buch gebrauchten Buchstabenbezeichnungen. Ich habe mich natürlich zuerst bemüht, mit den vom Ausschuß für Einheit und Formelgrößen vorgeschlagenen Bezeichnungen auszukommen, mußte aber bald das Unmögliche dieses Vorhabens einsehen. Ich kam vielmehr zu der Überzeugung, daß es grundsätzlich nicht möglich ist, die gesamte Naturwissenschaft und Technik auf eine größere Zahl von Bezeichnungen festzulegen. Es hätte genügt, für die Dimensionen des Raumes, die Zeit und die Temperatur einheitliche Bezeichnungen festzulegen und im übrigen jedem Zweig der Technik, wie etwa dem Wasserkraftmaschinenbau oder der Elektrotechnik die Ausarbeitung eines gesonderten Systemes zu überlassen. Dies wäre möglich gewesen und hätte sich dann auch wirklich eingeführt. Ich habe nun versucht, unter Anpassung an die heute meist gebräuchlichen Bezeichnungen ein solches System für das Gebiet der Wärmeübertragung aufzustellen.

Bevor ich dieses Vorwort schließe, möchte ich noch der Jahre gedenken, in denen ich im Laboratorium für technische Physik an der Technischen Hochschule in München tätig war. Da die Wärmeübertragung zu den bevorzugten Arbeitsgebieten dieses Laboratoriums gehört, fand ich hier nicht nur die Einführung in die wissenschaftliche Behandlungsweise der Probleme, sondern auch einen ersten Einblick in die einschlägigen Bedürfnisse der Praxis. Ich ergreife die Gelegenheit, um meinem verehrten Lehrer, Herrn Professor Knoblauch, von dem ich auch noch in späteren Jahren vielfache Anregung erhalten habe, meinen verbindlichsten Dank auszusprechen.

München, im Oktober 1920.

H. Gröber.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Vorwort	III
Einleitung	1
I. Die Wärmeleitung in festen Körpern.	
A. Die mathematischen Grundlagen	3
1. Das Temperaturfeld und das Feld des Wärmeflusses	3
2. Die Ableitung der Differentialgleichung	9
3. Die Grenzbedingungen	10
B. Über die Lösung von Randwertaufgaben	14
1. Die einführende Aufgabe	15
2. Über das Aufsuchen partikulärer Lösungen	25
3. Über das Anpassen an die Oberflächenbedingung	30
4. Über das Anpassen an die Anfangsbedingung	32
C. Die zeitlich veränderlichen Temperaturfelder ohne Wärmequellen. Die Temperaturunterschiede streben dem Ausgleich zu	44
Aufgabe 1. Die Platte	44
„ 2. Der Zylinder	51
„ 3. Die Kugel	54
„ 1, 2 und 3. Besprechung	57
„ 4. Der allseitig unendlich ausgedehnte Körper	60
„ 5. Der einseitig unendlich ausgedehnte Körper	66
D. Die zeitlich veränderlichen Temperaturfelder ohne Wärmequellen. Temperaturen periodisch veränderlich	70
Allgemeines	71
Aufgabe 6. Der einseitig unendlich ausgedehnte Körper	72
„ 7. Die Platte	78
E. Die zeitlich konstanten Temperaturfelder ohne Wärmequellen	86
Allgemeines	86
Aufgabe 8. Platte	88
„ 9. Das Rohr	91
„ 10. Die Hohlkugel	95
„ 11. Eindringen der Wärme in den einseitig unendlich ausgedehnten Körper durch eine Kreisfläche	97
F. Die zeitlich konstanten Temperaturfelder mit Wärmequellen	101
Aufgabe 12. Der Zylinder	102
G. Verschiedene Sonderfälle	103
1. Das Feld ist von mehreren verschiedenartigen Körpern erfüllt	103
2. Der Körper ist nicht isotrop	108
3. λ und c_p sind von Druck und Temperatur abhängig	112
4. Vorgänge mit Änderung des Aggregatzustandes oder der chemischen Natur	113
H. Prinzip der Ähnlichkeit	117
1. Bestimmungsstücke des ersten Feldes	117
2. Das zweite Temperaturfeld	118
3. Die Ähnlichkeit beider Felder	120
4. Das Prinzip der Ähnlichkeit und der Wärmefluß	123
5. Ähnlichkeit bei Randwertaufgaben dritter Art	124
6. Schlußbemerkung	125
II. Die Wärmeleitung in Flüssigkeiten und Gasen und der Wärmeübergang	
A. Das allgemeine Problem	126
1. Grundbegriffe	126
2. Aufstellung der Differentialgleichungen	130

	Seite
3. Die Randwertangaben	144
4. Das allgemeine Strömungsproblem	146
B. Die Hydrodynamik	147
1. Allgemeines	147
2. Das Prinzip der Ähnlichkeit	149
3. Die vereinfachten Strömungszustände	154
4. Das Prinzip der Ähnlichkeit als Grundlage für Versuche	157
C. Die Wärmeleitung in strömenden Körpern bei aufgezwungener Strömung	166
1. Allgemeines	166
2. Die Strömung im geraden Rohr mit kreisförmigem Querschnitt	179
3. Strömung in gerader Leitung mit nicht kreisförmigem Querschnitt	212
4. Die Strömung in gekrümmter Leitung (Rohrkrümmer und Rohrspirale)	214
5. Die Strömung um einen Zylinder	216
6. Die Modellregel	217
7. Der Wärmedurchgang	219
D. Die Wärmeleitung in strömenden Körpern bei freier Strömung	231
1. Allgemeines	231
2. Die freie Abkühlung eines Körpers in einem Gas	236
Anhang	246
Schlußwort	266

Literatur-Angaben.

- Fourier, M., Analytische Theorie der Wärme. Deutsche Ausgabe von Weinstein. — Berlin. Springer. 1884.
- Enzyklopädie der math. Wissenschaften — Berlin u. Leipzig. Teubner.
- Weber, H., Die partiellen Differentialgleichungen der math. Physik. — 2 Bde. Braunschweig. Vieweg. 1910.
- Gans, R., Einführung in die Vektoranalysis. — Berlin-Leipzig. Teubner. 1909.
- Schafheitlin, P., Die Theorie der Besselschen Funktionen. Aus math. u. physik. Schriften für Ingen. u. Studier. — Bd. 4. Teubner. 1908.
- Jahnke u. Emde, Funktionentafeln mit Formeln und Kurven. Aus math. u. physik. Schriften f. Ingen. u. Studier. — Bd. 5. Teubner. 1909.
- Kraus, F., Die Grundgesetze der Wärmeleitung und ihre Anwendung auf plattenförmige Körper. — Berlin. Springer. 1917.
- Lamb, H., Lehrbuch der Hydrodynamik. — Teubner. 1907.
- Prandtl, L., Abriß der Lehre von der Flüssigkeits- und Gasbewegung. — Sonderdr. a d. Handwörterb. d. Naturw. Bd. 4. Jena Fischer. 1913.
- Nußelt, W., Die Wärmeleitfähigkeit von Wärmeisolistoffen. — Diss. München 1907 u. Mitt. über Forsch.-Arb. H. 63 u. 64.
- Derselbe, Der Wärmeübergang in Rohrleitungen. — Habil.-Schrift Dresden 1909 u. Mitt. über Forsch.-Arb. H. 89.
- Derselbe, Der Wärmeübergang im Rohr. — Zeitschr. d. Ver. deutsch. Ingen. 1917. S. 685.
- Derselbe, Grundgesetz des Wärmeüberganges. — Gesundh.-Ingen. 1915 S. 42.
- Derselbe, Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. — Zeitschr. d. Ver. deutsch. Ingen. 1916. S. 541.
- Knoblauch u. Hencky, Anleitung zu genauer, technischer Temperaturmessung. — München. Oldenbourg. 1919.
- Landolt-Börnstein-Roth, Physikalisch-chemische Tabellen. — Berlin. Springer. 1912.

Ausführliche Literaturübersicht bei:

- Soennecken, A., Der Wärmeübergang von Rohrwänden an strömendes Wasser. — Diss. München 1910.
- Poensgen, R., Über Wärmeübertragung von strömendem, überhitztem Wasserdampf an Rohrwandungen und von Heizgasen an Wasserdampf. — Diss. München 1914.

Verzeichnis der Zahlentafeln.

	Seite
1. Wurzeln der Gleichung: $\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{-\varepsilon}{h \cdot X}$	20
2. Wurzeln der Gleichung: $\operatorname{cotg} \delta = \frac{\delta}{h \cdot X}$	21
3. Wärmeverlust der Platte	51
4. Wurzeln der Gleichung: $\mu \cdot J_1(\mu) = \pm h R \cdot J_0(\mu)$	52
5. Wärmeverlust des Zylinders	54
6. Wurzeln der Gleichung $\nu \cdot \cos \nu = (1 - h \cdot R) \sin \nu$	55
7. Wärmeverlust der Kugel	56
8. Temperaturverlauf im einseitig unendlich ausgedehnten Körper	68
9. Werte von $\sqrt{1/\pi} \cdot \log \nu / \log e$	75
10. Werte von funkt $(h^2 \cdot a \cdot \tau_0)$	77
11. Werte von $\cos u \cdot \mathfrak{C}of u$ und $\sin u \cdot \mathfrak{S}in u$	80
12. Werte von funkt $\left(\frac{x}{X} \cdot M\right)$	83
13. Planparallele Platte mit periodischer Oberflächentemp.	84
13a. Kritische Geschwindigkeit (in Metern pro Sekunde)	164
14. Versuchswerte nach NuBeitl	194
15. Abhängigkeit der Werte Br von T_m bei Luft	204
16. Berechnung von Heiz- und Kühlrohren	210
17. Wärmeübergang im Rohrbündel	211
18. Wärmeübergang in Leitung mit rechteckigem Querschnitt	213
19. Wärmeaustausch im Gleichstrom	225
20. Wärmeaustausch im Gegenstrom	228
21. Durchschnittliche Temperaturdifferenz	230
22. Verhältnis: Gleichstrom/Gegenstrom	231
23. ε und \varkappa abhängig von der Atomzahl	237
24. Kenngröße Gr abhängig von t_w und t_r	240
25. Werte der Potenz $d^{0,75}$	242
26. Hilfstabelle für die Berechnung des Wärmeverlustes von Rohrleitungen	242
Anhang.	
27. Exponentialfunktion	250
28. Gaußsches Fehlerintegral	250
29. Besselsche Funktionen	251
30. Potenz: x^n ; $n = -0,16$	251
31. „ „ $n = -0,05$	252
32. „ „ $n = +0,21$	252
33. „ „ $n = +0,79$	253
34. „ „ $n = +0,95$	253
35. „ „ $n = +1,05$	253
36. „ „ $u = +1,16$	254
37. „ „ $n = +1,21$	254
38. „ „ $n = +1,79$	255
39. Spez. Gewicht, spez. Wärme, Wärmeleitfähigkeit usw. von festen Körpern und Flüssigkeiten	255
40. Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärme, spez. Gew. von Luft	262
41. Temperaturleitfähigkeit von Luft	263
42. Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärme, spez. Gew. und Temperaturleitfähigkeit von Wasserdampf	264
43. Zähigkeit von Flüssigkeiten und Gasen	265