

Lehrbuch der technischen Physik.

(Mechanik, Wärmelehre, Optik.)

II. Teil: Wärmelehre.

Für den Gebrauch an technischen Mittelschulen und
zum Selbststudium.

Von

Dipl.-Ing. **Paul Müller,**

Oberlehrer an der Kgl. höheren Maschinenbauschule Aachen.

Mit 67 Figuren.



BERLIN W
VERLAG VON M. KRAYN
1912.

Vorwort.

Dem im ersten Teil gegebenen Vorwort brauchen hier nur wenige Bemerkungen hinzugefügt zu werden. Es kann kein Zweifel darüber bestehen, daß der in diesen Lehrbüchern behandelte Stoff nicht in seinem ganzen Umfang im Physikunterricht der technischen Mittelschulen behandelt werden kann. So sind auch die im vorliegenden zweiten Teile enthaltenen Erörterungen aus dem Gebiete der Wärmemechanik nur aufgenommen worden, um eine engere Beziehung zwischen dem Lehrstoff der Physik und seinem theoretischen Ausbau schaffen zu helfen. Dieses Bestreben erscheint begründet durch den Hinweis auf die Tatsache, daß in den üblichen Lehrplänen die Behandlung der Wärmemechanik zeitlich in einem weiten Abstand vom Physikunterricht sich findet. Aber auch dem in der Praxis stehenden Techniker wird es willkommen sein, seine Kenntnisse über dieses Gebiet in geeignetem Zusammenhange gelegentlich wieder auffrischen zu können. Auch in dieser Beziehung hofft der Verfasser, keine ganz überflüssige Arbeit getan zu haben.

Für den vorliegenden zweiten Teil wurden dem Verfasser wieder in entgegenkommendster Weise eine Anzahl Klischees von der Firma Ernst Leybolds Nachfolger, Köln, zur Verfügung gestellt, ebenso auch von den Firmen Schäffer & Budenberg, Magdeburg-Buckau und Wilhelm Lambrecht, Göttingen. Den Firmen sei auch an dieser Stelle verbindlichster Dank ausgesprochen! Herrn Kollegen Hatzfeld ist Verfasser für die Überlassung einiger Zeichnungen zu Dank verpflichtet!

Aachen, Dezember 1911.

Dipl.-Ing. Paul Müller.

Inhaltsverzeichnis.

II. Teil: Wärmelehre.

	Seite
I. Kapitel. Grundbegriffe, Wesen der Wärme.	
§ 1. Wärme und Temperatur	1
§ 2. Die Quellen der Wärme	3
§ 3. Das Wesen der Wärme	4
II. Kapitel. Wärmeleitung und Wärmestrahlung.	
§ 1. Wärmeleitung	6
§ 2. Wärmestrahlung	9
III. Kapitel. Ausdehnung durch die Wärme; Thermometer.	
§ 1. Ausdehnung der festen Körper	12
§ 2. Ausdehnung der Flüssigkeiten	16
§ 3. Ausdehnung der Gase	19
§ 4. Die Thermometer	26
IV. Kapitel. Spezifische Wärme. Änderung des Aggregatzustandes.	
§ 1. Spezifische Wärme	33
§ 2. Schmelzen, Erstarren	36
§ 3. Verdampfen, Kondensieren	39
V. Kapitel. Kalorimetrie.	
§ 1. Die Mischkalorimeter	42
§ 2. Eiskalorimeter, Dampfkalorimeter	53
§ 3. Andere Verfahren der Kalorimetrie	56
VI. Kapitel. Wärme und Arbeit.	
§ 1. Das mechanische Wärmeäquivalent	58
§ 2. Zustandsänderungen und mechanische Arbeit	64
§ 3. Kreisprozesse	71
§ 4. Die Entropie	75
VII. Kapitel. Von den Dämpfen.	
§ 1. Druck und Temperatur gesättigter Dämpfe	80

	Seite
§ 2. Überhitzung, kritische Temperatur, Kondensation, Gasverflüssigung	83
§ 3. Dampfdichte, spezifisches Gewicht und Volumen	90
§ 4. Wärmeverhältnisse	94
§ 5. Wärme und Strömungsenergie; Ausfluß	100
§ 6. Kälteerzeugung durch Anwendung von Dämpfen	105
§ 7. Daltonsches Gesetz; Luftfeuchtigkeit	110
Tabelle für gesättigten Wasserdampf	114/115

I. Kapitel.

Grundbegriffe; Wesen der Wärme.

§ 1. Wärme und Temperatur. Bevor wir der Frage über das Wesen der Wärme nähertreten, gilt es, über zwei Grundbegriffe der Wärmelehre, die im täglichen Sprachgebrauch oft verwechselt werden, völlige Klarheit zu gewinnen: Wärme und Temperatur. Wir machen folgenden Versuch: Vier in der äußeren Form gleiche Zylinder (Fig. 1) aus Eisen, Kupfer, Zinn und Blei von gleichem Gewicht (sie enthalten je nach dem spezifischen Gewicht größere oder kleinere Hohlräume!) werden durch Eintauchen in kochendes Wasser auf die gleiche Temperatur, nämlich 100°C , gebracht und dann gleichzeitig auf eine etwa 1 cm starke senkrecht stehende Wachsplatte gesetzt. Wir beobachten, daß die Zylinder das Wachs mehr oder weniger stark zum Schmelzen bringen und daß zum Schluß der Eisenzylinder am tiefsten eingedrungen ist, der Kupferzylinder um ein geringes weniger, Zinn bedeutend weniger und Blei nur um einige Millimeter. Wir wollen uns schon hier darüber klar sein, daß das Zerteilen der Wachsplatte mit Hilfe der Wärme ebenso als mechanische Arbeitsleistung aufzufassen ist, als wenn wir die Formänderung mit Hilfe eines Messers zuwege gebracht hätten. Die Größe dieser von den vier Zylindern verrichteten Arbeitsleistungen ist also sehr verschieden, obwohl Gewicht und Temperaturen bei allen gleich waren. Auch die Endtemperatur (Zimmertemperatur) ist die gleiche und wir erkennen das Naturgesetz:

Gleiche Gewichte verschiedener Stoffe nehmen bei der Erwärmung um gleiche Temperaturstufen verschiedene Wärmemengen auf, die sie bei der Abkühlung wieder abgeben.

Als Einheit der Temperatur gilt das Grad Celsius, d. i. der einhundertste Teil der Temperaturdifferenz zwischen Siedepunkt

und Eispunkt des Wassers. (S. Kap. III § 4.) — Eine Wärme-einheit oder Kalorie ist diejenige Wärmemenge, die zur Erwärmung eines kg Wasser um 1° C aufzuwenden ist. Es ist:

1 Kalorie, geschrieben: 1^{Cal} oder $1^{WE} = 1000$ Gramm-kalorien, geschrieben: 1000^{gcal} .

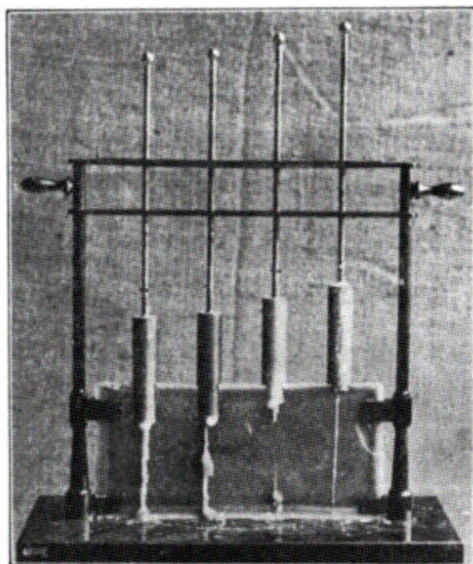


Fig. 1.

Beispiel: Um 6^{kg} ($\sim = 6^{ltr}$) Wasser von 15° auf 32° , also um 17° zu erwärmen, müssen wir aufwenden:

$$6^{kg} \cdot 17^{\circ} \cdot 1^{Cal/kg \cdot ^{\circ}} = 102^{Cal}.$$

Die Beziehung zwischen Wärme und Temperatur bei andern Stoffen ist durch den Begriff der spezifischen Wärme gegeben, d. i. diejenige Wärmemenge, die einem kg des betrachteten Stoffes zugeführt werden muß, um seine Temperatur um 1° C zu erhöhen. Die spezifische Wärme des Wassers ist also:

$1^{Cal/kg \cdot ^{\circ}}$. Über den Wert der spezifischen Wärme wichtiger Stoffe und ihre rechnerische Verwertung sind im Kap. IV § 1 und Kap. V nähere Angaben gemacht.

Es sei hier noch darauf hingewiesen, daß ein Gegensatz

zwischen den Begriffen: Wärme und Kälte im physikalischen Sinne nicht besteht; Kälteerzeugung ist Wärmeentziehung!

§ 2. Die Quellen der Wärme. Während die Wissenschaft bis zum Anfang des vorigen Jahrhunderts die Wärme als einen wägbaren Stoff betrachtete und von dieser Vorstellung ausgehende Hypothesen entwickelte, beruht die heutige Auffassung vom Wesen der Wärme auf der Grundlage des Energiegesetzes. Überall wo Wärme entsteht, muß ein gleichwertiger Betrag irgendeiner andern Energieform aufgewendet werden (und umgekehrt). Die Frage nach den Quellen der Wärme führt uns also auf die Betrachtung dieser andern Energieformen und deren Quellen zurück. Die wichtigsten Vorgänge der Wärmeerzeugung sind:

1. Die Verbrennung. Die Verbindung eines brennbaren Stoffes mit dem Sauerstoff der Luft ist ein chemischer Prozeß, bei dem chemische Energie verbraucht wird. Auch die langsame Verbrennung findet unter Wärmeentwicklung statt; so entsteht z. B. durch Oxydation des im Blute enthaltenen Kohlenstoffs unsere Körperwärme.

2. Die Vernichtung von Bewegungsenergie. Wenn wir die Leistung einer Maschine mit Hilfe des Pronyschen Zaums (Mech. Fig. 106) abbremsen, so entsteht eine starke Wärmeentwicklung. Im Kapitel VI wird gezeigt, wie man diese Wärme messen und ihrem Werte nach in Beziehung zu der abgebremsten mechanischen Arbeit bringen kann. Mittels des pneumatischen Feuerzeugs (Fig. 2) kann man durch die bei



Fig. 2.

der Kompression der eingeschlossenen Luft infolge der Reibung zwischen den Luftmolekülen erzeugte Wärme die Temperatur eines im Zylinder befindlichen Stückchens Feuerschwamm so hoch treiben, daß es sich entzündet. Auch die Entstehung von Wärme in einem vom elektrischen Strome durchflossenen Leitungsdraht kann als Folge des Widerstandes aufgefaßt werden, den der Leiter dem Durchfluß der Elektronen entgegensetzt, ähnlich so, wie auch an verengten Stellen einer

wasserdurchflossenen Rohrleitung Reibungswärme entsteht. (S. Mech. Kap. VII § 4.)

3. Die strahlende Energie der Sonne. Von der Sonne stammt letzten Endes alle und jede Energie, die uns auf der Erde zur Verfügung steht. Die zur Erzeugung von Verbrennungswärme benutzten Kohlen z. B. sind versteinerte Produkte einer vorzeitlichen Vegetation, die ohne Sonnenwärme nicht hätte bestehen können. Benutzen wir zur Gewinnung des wärmeerzeugenden elektrischen Stromes eine durch Wasserkraft betriebene Dynamomaschine, so war es die Sonne, die das Meerwasser verdunstet und als Regen im Gebirge wieder herabfallen ließ. Es bietet viel des Interessanten, die Spur einer jeden Energieform bis zur Sonne als Urquelle zurück zu verfolgen!

4. Die Wärme des Erdinnern. Auch dieser Energievorrat stammt, wie die Masse der Erde selbst, von der Sonne. Die äußeren Anzeichen einer sehr hohen Temperatur des Erdinnern, Vulkane, heiße Quellen, lassen sich mit der (nicht unbestrittenen) Hypothese erklären, das Innere der erkaltenden Erde sei noch weißglühend flüssig. Den Beobachtungen der Temperaturzunahme mit der Tiefe in Bergwerksschächten steht die Erfahrung gegenüber, daß auch bei wagerechtem Einbohren in Bergmassive, z. B. beim Bau langer Tunnels, die Temperatur bedeutend zunimmt. Hier spielt der Massendruck eine Rolle, der, als Äußerung einer Energieform betrachtet, auch wieder in der Massenenergie der Sonne seinen Ursprung hat.

§ 3. Das Wesen der Wärme. Die im § 2 erwähnte Stoffhypothese der Wärme wird mit der Überlegung hinfällig, daß wir ja durch Reibung beliebige Mengen dieses Stoffes erzeugen könnten, was mit unsern Vorstellungen von der Erhaltung des Stoffes unvereinbar ist. Diese Erkenntnis führt uns vielmehr auf die heute geltende Anschauung vom Wesen der Wärme, die zwar auch auf Hypothesen beruht, aber durch deren fruchtbare Konsequenzen volle Berechtigung gewinnt:

Wir denken uns die Wärme als einen Bewegungsvorgang, der sich zwischen den Molekülen der Körper bzw. des Weltäthers abspielt. (Über den Weltäther und seine Eigenschaften siehe Optik!) Wir stellen uns nach Clausius vor, daß die Moleküle in festen Körpern um stabile Gleichgewichtslagen schwingen, wobei die Art der Bewegung nicht näher zu be-

urteilen ist. Bei den Flüssigkeiten sind die Moleküle nicht mehr an Gleichgewichtslagen, wohl aber an den gegenseitigen Abstand gebunden. Hier stellen wir uns „wälzende“ Molekularbewegungen im Gegensatz zu den „vibrierenden“ Schwingungen in festen Körpern vor. Bei den Gasen endlich stellen wir uns ein regelloses Durcheinandereilen der Moleküle vor, bei dem sie so lange geradlinig fortschreiten, bis sie aneinanderprallen und dadurch aus ihrer Bewegungsrichtung abgelenkt werden oder von den Wänden des umschließenden Gefäßes abprallen. Diese Anschauung bildet die Grundlage der kinetischen Gastheorie, die auf rechnerischem Wege zu einer überraschenden Übereinstimmung mit den Gesetzen von Mariotte (Mech. Kap. I § 6), Dalton (Mech. Kap. VIII § 5 und W. Kap. III § 3, Kap. VII § 7), Gay-Lussac (Kap. III § 3) und anderen Gesetzen führt und damit die Berechtigung der Molekularhypothese erweist. Auf die kinetische Gastheorie selbst kann in diesem Buche nicht näher eingegangen werden.

II. Kapitel.

Wärmeleitung und Wärmestrahlung.

§ 1. Wärmeleitung. Wärmeleitung findet stets in der Richtung von Punkten höherer Temperatur — größerer Intensität der als Wärme bezeichneten Molekularschwingungen — nach solchen niedriger Temperatur statt. Wir unterscheiden innere und äußere Wärmeleitung, erstere zwischen den Molekülen desselben Körpers, letztere beim Übergang der Wärme aus einem Körper in einen benachbarten anderen.

a) Innere Wärmeleitung. Stellen wir uns einen Metallstab von 1^{cm} Querschnitt vor, der auf seiner ganzen Länge vollkommen wärmedicht¹⁾ (von einem schlechten Wärmeleiter umgeben) sei und mit den Stirnenden in je einem Wasserbad von den Temperaturen $t_1 = \text{konst.}$ bzw. $t_2 = \text{konst.}$ sich befinde, so wird, wenn $t_1 > t_2$ ist, ein Zustand stationärer Wärmeströmung eintreten, d. h. durch jeden Querschnitt des Stabes wird in der Sekunde die gleiche Wärmemenge hindurchströmen, während die Temperatur auf gleichen Teilstrecken um gleiche Beträge abnehmen und an den einzelnen Punkten konstant sein wird. Wählen wir die Länge des Stabes $l = t_1 - t_2^{cm}$ und bringen wir in Abständen von je 1^{cm} Thermometer an, so wird zwischen je zwei benachbarten Thermometern eine Temperaturdifferenz von 1° Celsius bestehen. Die Wärmemenge, die wir zur Erhaltung dieses Zustandes in jeder Sekunde am einen Ende zu- und am andern abführen müssen, bezeichnet die Wärmeleitungsfähigkeit λ des Stabmaterials. Nennen wir ferner: q^{cm} den Stabquerschnitt, $l^{cm} = t_1 - t_2^{cm}$ die Stablänge, n^{sec} die Zeitdauer des Wärmedurchganges, W^{gal} die zu- bzw.

¹⁾ Diese Forderung ist praktisch nicht zu erreichen, s. unter b.

abzuführende Wärmemenge, so wird mit $t_1 - t_2 = t$ und $\frac{t^0}{l_{cm}} =$ Temperaturgefälle bezogen auf die Längeneinheit:

$$\frac{W^{gal}}{q^{cm} \cdot n^{sec} \cdot \frac{t^0}{l_{cm}}} = \lambda^{\frac{gal}{cm \cdot sec \cdot ^0}} \dots\dots\dots Gl. I$$

Aufgabe 1. Welche Wärmemenge W^{gal} geht in $n = 60^{sec}$ durch eine Kupferscheibe von $5^{cm} \varnothing$ und $1,5^{cm}$ Dicke hindurch, wenn auf den beiden Seitenflächen die Temperaturen:

$t_1 = 100^0 = \text{konst.}$ und $t_2 = 10^0 = \text{konst.}$ herrschen?

Aus Gl. 1 folgt: mit $\lambda = 0,93$ (siehe Tabelle)

$$W = \frac{\lambda \cdot q \cdot n \cdot t}{l} = \frac{0,93 \cdot 5^2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 90}{4 \cdot 1,5} = 65800^{gal} = 65,8^{WE}$$

Um die Wärmeleitungsfähigkeit von Flüssigkeiten und Gasen zu ermitteln, muß die Zirkulation, die beim Erwärmen von unten infolge Aufsteigens des spezifisch leichteren warmen Wassers stets eintritt, vermieden werden. Eine senkrecht stehende Flüssigkeitssäule wird daher von oben erwärmt, so daß die Wärme nach unten „abfließt“. Bei solcher Anordnung kann man die geringe Wärmeleitungsfähigkeit des Wassers z. B. daran erkennen, daß ein mit Blei beschwertes Eisstück auf dem Boden eines wassergefüllten Reagenzglases nur langsam schmilzt, wenn das Wasser im oberen Teil des Glases durch umgeleiteten Dampf zum Sieden gebracht wird. — Ein auf Wärmeleitungsfähigkeit zu untersuchendes Gas bringt man in ein Glasgefäß, das man ganz in heißes Wasser taucht. Ein bis in die Mitte des Gefäßes geführtes Thermometer nimmt dann je nach der Leitungsfähigkeit des Gases eher oder später die Temperatur des Wassers an. Mit dem Drucke ändert sich die Leitungsfähigkeit eines Gases nur wenig. Die nachstehende Tabelle zeigt zunächst, daß die Metalle bei weitem die besten Wärmeleiter sind. Es besteht hier eine gewisse Übereinstimmung mit der elektrischen Leitungsfähigkeit. Besonders schlechte Wärmeleiter sind z. B. Holz, Kork, Seide usw. Darauf beruht die Verwendung dieser Stoffe zum Isolieren von Dampfleitungen usw. — Wollstoffe, Filz und andere Stoffe, die viel Luft enthalten, sind ebenfalls schlechte Wärmeleiter. Auch die isolierende Wirkung der Doppelfenster beruht auf der geringen Wärmeleitungsfähigkeit der Luft.