



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Lehrbuch der Experimentalphysik

Lommel, Eugen von

Leipzig, 1908

127. Mechanische Wärmetheorie

[urn:nbn:de:hbz:466:1-83789](#)

Ruß rascher schmilzt als der benachbarte, und daß, der Rußspur folgend, eine tiefe Rinne im Schnee sich bildet. Diejenigen Körper, welche die Wärmestrahlen am besten einsaugen, strahlen umgekehrt ihre Wärme auch am leichtesten wieder aus: das Ausstrahlungsvermögen wächst in demselben Verhältnis wie das Absorptionsvermögen. Heißes Wasser erkaltet in einem rußigen Topf rascher als in einem blanken. Ein Thermometer mit berußter Kugel steigt im Sonnenschein viel rascher und höher als ein ganz gleiches Thermometer mit blanker Kugel, kühlt sich aber auch im Schatten viel rascher ab. Verschiedene Thermometer zeigen an der Sonne verschiedene Temperaturen je nach ihrem Absorptionsvermögen; die Angaben eines von der Sonne beschienenen Thermometers sind daher für die Beurteilung der Lufttemperatur ganz wertlos.

Es versteht sich von selbst, daß nur Strahlen, welche in einen Körper eindringen, von ihm absorbiert werden und ihn erwärmen können. Ein glatt polierter Körper, der schon an seiner Oberfläche einen Teil der Strahlen zurückwirft, erwärmt sich bei gleicher Bestrahlung weniger, als wenn man ihm eine rauhe Oberfläche gibt. Andererseits strahlt ein warmer Körper seine Wärme reichlicher aus, wenn seine Oberfläche matt, als wenn sie poliert ist. In einer blank geputzten metallenen Kaffeekanne hält sich daher das Getränk längere Zeit heiß, als wenn die Oberfläche der Kanne unrein ist. Also auch in dieser Hinsicht erweisen sich die besten Einsauger zugleich als die besten Ausstrahler.

Auf dem gleichen Prinzip beruhen die „Dewarschen Flaschen“, deren man sich bedient, um flüssige Luft oder andere auf sehr tiefer Temperatur befindliche Stoffe unter möglichstem Schutz vor starker Wärmezufuhr und entsprechend schnellem Verdampfen aufzubewahren. Das sind doppelwandige Glasflaschen. Der Zwischenraum zwischen den beiden Wänden ist luftleer gemacht, um Wärmezufuhr durch die Leitung des Gases zu verhindern; die innere Wand des Zwischenraumes ist mit einem glänzenden Silberspiegel überzogen, der die Strahlung der wärmeren Umgebung in beträchtlichem Maße reflektiert. In derartigen Flaschen verdampft flüssige Luft nur sehr langsam und läßt sich stundenlang in ihnen aufbewahren.

Jeder Körper sendet Wärmestrahlen aus und empfängt solche von den umgebenden Körpern. Hat er mit diesen gleiche Temperatur erreicht, so ändert sich erfahrungsgemäß sein Erwärmungsgrad nicht mehr, obgleich die gegenseitige Zustrahlung fortdauert. Dies ist aber nur dann möglich, wenn er in gleicher Zeit ebensoviel Wärme aufnimmt als er ausstrahlt. Man hat diesen Satz das Prinzip des beweglichen Gleichgewichts der Wärme genannt (Prevost, 1809).

127. Mechanische Wärmetheorie. Erster Hauptsatz. Zur Erklärung der Wärmeerscheinungen nahm man früher einen eigentümlichen unwägbaren Wärmestoff an, welcher, indem er in die Körper in größerer oder geringerer Menge eindringe, ihre verschiedenen Erwärmungsgrade, ihre Ausdehnung, das Schmelzen und Verdampfen usw. hervorbringen sollte. Diese „Wärmestofftheorie“ vermochte jedoch weder von den Erscheinungen der Wärmestrahlung noch von der

Tatsache, daß durch Reibung oder überhaupt durch mechanische Arbeit Wärme erzeugt werden kann, befriedigende Rechenschaft zu geben. Die gegenwärtig allgemein anerkannte mechanische Wärmetheorie (Thermodynamik) dagegen nimmt an, daß Wärme eine Form der Energie sei, daß sie aus anderen Energieformen entstehen und sich in andere umsetzen kann, und um sich davon eine anschauliche Vorstellung zu bilden, hat man die weitere Hypothese hinzugenommen, daß Wärme geradezu Bewegungsenergie selbst sei, nämlich Bewegungsenergie der kleinsten Körperteilchen (Moleküle), deren Bewegungen zwar wegen der Kleinheit dieser Teilchen unserem Auge nicht sichtbar sind, auf unseren Gefühlssinn aber denjenigen Eindruck hervorbringen, welchen wir „Wärme“ nennen. Um zu erläutern, wie sich die Erzeugung von Wärme durch mechanische Arbeit nach dieser Vorstellung erklärt, betrachten wir einen Schmied, der ein Stück Eisen hämmert. Indem er den Hammer emporhebt, leistet er Arbeit, vermöge welcher der Hammer beim Herabfallen die Wucht erlangt, die ihn zur Bearbeitung des Eisens befähigt. Der niederfallende Hammer kommt nun, nachdem er das auf dem Amboß liegende Eisen berührt hat, zur Ruhe, seine fortschreitende Bewegung wird plötzlich gehemmt; die Wucht aber, die ihm innewohnte, ist keineswegs spurlos verschwunden, sondern sie ist in die getroffenen Körper übergegangen, indem sie in ihnen schwingende Bewegungen wachrief, in welchen sich die anscheinend verschwundene Wucht des Hammers ungeschmälert wiederfindet. Der Amboß gerät in heftige Erzitterungen, ähnlich denjenigen einer angeschlagenen Glocke, und sendet lauten Klang zu unserem Ohr. Im gehämmerten Eisen aber werden Schwingungen seiner Moleküle erregt, die wir als Wärme empfinden; das Eisen erwärmt sich und kann durch fortgesetztes Hämmern sogar zum Glühen gebracht werden. Die Arbeit, welche der Schmied bei jedem Hammerschlag leistet, ist um so größer, je schwerer sein Hammer ist, und je höher er ihn hebt. Wiegt der Hammer 1 kg, und wird er 1 m hoch gehoben, so beträgt die hierzu erforderliche Arbeitsgröße ein Meterkilogramm; durch dieselbe Größe wird die Wucht (Bewegungsenergie) gemessen, mit welcher der Hammer auf den Amboß trifft. Dieser Wucht entspricht nun genau die Menge der Wärme, welche beim Hämmern des Eisens (in diesem selbst, im Hammer, Amboß und in der Luft durch Fortpflanzung des Schalles) entwickelt wird.

Durch die Reibung, indem sie Bewegung hemmt, entsteht bekanntlich ebenfalls Wärme. Ein Metallknopf, an Holz oder Leder gerieben, wird heiß. Die Wilden machen Feuer, indem sie zwei Holzstücke aneinander reiben, und wir selbst, indem wir den Phosphor der Zündhölzchen durch Reibung auf seine Verbrennungstemperatur erhitzen. Wird ein Eisenbahnzug durch Bremsen zum Stehen gebracht, so erwärmen sich Räder und Bremsen.

Eine Untersuchung der zahlenmäßigen Beziehung, die bei der Erzeugung von Wärme durch Reibung zwischen der aufgewandten

Arbeit und der erzeugten Wärme besteht, ist zuerst von Joule (1850) mittels des in Fig. 126 abgebildeten Apparates ausgeführt worden. An der Spindel S sitzt ein messingnes Schaufelrad, das aus acht, in der ange deuteten Weise ausgeschnittenen Flügeln besteht. Dieser Apparat dreht sich in einem kupfernen Kessel G mit vier vertikalen feststehenden Zwischenwänden, durch deren passend geformte Ausschnitte die Schaufeln des Rades bei der Drehung hindurchtreten. Der Kessel ist mit Wasser gefüllt, das durch die beschriebene Vorrichtung bei der Drehung der Spindel sehr kräftig durcheinandergerührt und dadurch erwärmt wird. Aus der gemessenen Temperaturerhöhung nach einer bestimmten Anzahl von Umdrehungen und aus der Wärmekapazität des Apparates läßt sich die erzeugte Wärme berechnen. Die Arbeit andererseits, die aufgewandt werden mußte,

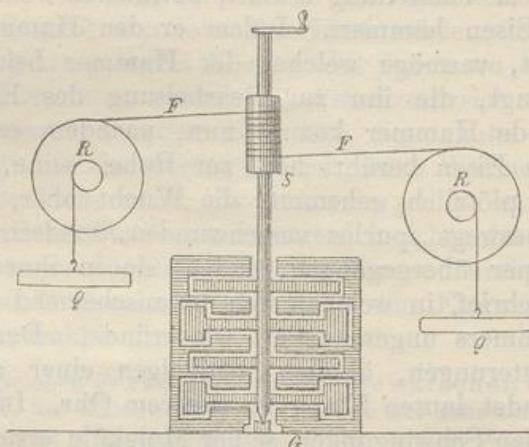


Fig. 126.

Joules Apparat zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents.

um jene Anzahl von Umdrehungen auszuführen, wurde dadurch gemessen, daß die Drehungen der Spindel unmittelbar durch die heruntersinkenden Gewichte Q mit Hilfe der Räder R und der Fäden F bewirkt wurden. Der Betrag der Gewichte in Kilogrammen multipliziert mit der Fallhöhe in Metern, die sie während jener Umdrehungen zurückgelegt haben, gibt die Arbeit in Meterkilogrammen (17). Solche Versuche, die Joule ausführte mit Wasser, mit Quecksilber und mit Reibung von Gußeisen auf Gußeisen, ergaben, daß in allen Fällen, um eine Wärmemenge von 1000 Grammkalorien oder eine Kilogrammkalorie zu erzeugen, eine Arbeitsleistung von 427 Meterkilogrammen erforderlich war. Diese Zahl von 427 Meterkilogrammen nennt man das mechanische Äquivalent der Wärme; sie drückt eine unabänderliche Größenbeziehung zwischen Wärme und Arbeit aus, die ganz unabhängig davon ist, durch welche mechanischen Prozesse, Reibung, Stoß oder dgl. die Wärme erzeugt wird. Sie gilt aber ebenso für die umgekehrte Umsetzung, für die Erzeugung von Arbeit durch Wärme. Daß eine solche möglich ist, zeigt uns ja jede

Dampfmaschine; die Energie der Bewegung, mit welcher ein Bahnzug dahinrollt, entsteht offenbar aus der Wärme des Feuers, welches unter dem Dampfkessel der Lokomotive unterhalten wird, und zwar verschwindet, wie Hirn durch Versuche an Dampfmaschinen nachgewiesen hat, für je 427 Meterkilogramm Arbeit, welche die Maschine durch Fortbewegung des Bahnzuges leistet, eine Wärmeeinheit, indem sie sich aus der Form unsichtbarer molekularer Bewegung in die Wucht sichtbar bewegter Massen umwandelt. Man bezeichnet den von Robert Mayer 1842 zuerst erkannten Satz von der Äquivalenz von Wärme und Arbeit als ersten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie.

Die Tatsache, daß Arbeit auf Kosten von Wärme geleistet werden kann, spielt eine wichtige Rolle bei der Erwärmung der Gase. Bei der oben beschriebenen Versuchsanordnung zur Bestimmung der spezifischen Wärmenden der Gase (108) setzt sich das erwärmte Gas mit dem äußeren Luftdruck ins Gleichgewicht, indem es sich diesem Drucke entgegen ausdehnt; für die hierbei zu leistende Arbeit wird, (ähnlich wie bei der Verdampfung) ein Teil der zugeführten Wärme verbraucht. Um dieselbe Gasmasse in einem starren Gefäß von unabänderlichem Rauminhalt ebenso stark zu erwärmen, wird weniger Wärme erforderlich, weil hier keine Ausdehnung stattfinden kann, und daher auch keine Arbeit zu leisten ist. Man unterscheidet daher bei den Gasen zwei verschiedene spezifische Wärmenden, nämlich jene größere spezifische Wärme bei konstantem Druck (c_p) und diese kleinere spezifische Wärme bei konstantem Volumen (c_v). Auch bei festen und flüssigen Körpern ist diese Unterscheidung zu machen; doch ist bei diesen die Differenz der beiden spezifischen Wärmenden im allgemeinen gering; bei den Gasen dagegen ist sie beträchtlich. Ein Gas, welches sich unter Überwindung eines Drucks und ohne äußere Wärmezufuhr (adiabatisch) ausdehnt, kühlt sich in erheblichem Maße ab, indem es die zur Arbeit nötige Wärme aus seinem eigenen Wärmevorrat entnimmt. Ist die Luft unter der Glocke der Luftpumpe mit Wasserdampf gesättigt, so entsteht schon beim ersten Kolbenzug infolge der Abkühlung Nebel, und ein gleichzeitig unter der Glocke befindliches Thermometer (z. B. Breguets Metallthermometer, Fig. 105) sinkt. Umgekehrt muß sich bei Verdichtung eines Gases Wärme entwickeln. Hierauf beruht das sogenannte pneumatische Feuerzeug: wird nämlich ein Kolben rasch in einen Luft enthaltenden Zylinder gestoßen, so erhitzt sich die zusammengepreßte Luft so stark, daß sich ein unten am Kolben angebrachtes Stückchen Zunder entzündet.

Die beschriebenen Vorgänge adiabatischer Abkühlung oder Erwärmung spielen eine große Rolle in der Atmosphäre. Aufsteigende Luftmassen dehnen sich aus, weil mit der Höhe der Druck abnimmt, kühlen sich dadurch ab und verdichten ihren Wasserdampf zu Wolken und Niederschlägen (Wolken des aufsteigenden Luftstromes, Kumuluswolken). Niedersinkende Luftmassen erwärmen sich und vermindern dadurch ihre relative Feuchtigkeit. (Erklärung des Föhns durch Hann und Helmholtz.)

Die direkte Bestimmung der spezifischen Wärme bei konstantem Volumen ist schwierig, weil das Gewicht eines in einer starren Hülle eingeschlossenen Gases im Verhältnis zu dem Gewicht der Hülle zu klein ist. Man kann aber das Verhältnis der beiden spezifischen Wärmen c_p und c_v finden, wenn man die kleine Temperaturerhöhung ϑ ermittelt, welche eine Luftmenge erfährt, wenn man sie rasch um soviel zusammenpreßt, wie sie sich bei der Erwärmung um 1° bei konstantem Druck ausgedehnt haben würde. Die im letzteren Fall erforderliche Wärmemenge c_p müßte dann hinreichen, um diese Luftmenge bei unveränderlichem Volumen um $1 + \vartheta$ Grade zu erwärmen, d. h. es muß, wenn c_v die spezifische Wärme bei konstantem Volumen bezeichnet, $c_p = c_v(1 + \vartheta)$ oder $\frac{c_p}{c_v} = 1 + \vartheta$ sein. Nach einer sehr sinnreichen Methode haben zuerst Clément und Desormes (1819) derartige Versuche ausgeführt. Für Luft ergibt sich aus den besten Versuchen das Verhältnis $c_p/c_v = 1,405$. Hiermit findet man die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Volumen:

$$c_v = \frac{c_p}{1,405} = \frac{0,2375}{1,405} = 0,1690.$$

Kennt man die Differenz der spezifischen Wärmen c_p und c_v , so kann man das mechanische Wärmeäquivalent daraus berechnen, indem man diese Wärmemengen gleich der Arbeit setzt, die das Gas bei seiner Ausdehnung leistet. Ein Kilogramm Luft von 0° und 760 mm Druck nimmt einen Raum von 0,773 Kubikmeter ein; in einem Zylinder von 1 Quadratmeter Querschnitt, welcher durch einen beweglichen Kolben verschlossen ist, dehnt sich diese Luftmenge bei 1° Erwärmung um $\frac{1}{273}$ ihres Volumens aus, und schiebt den Kolben, auf welchem pro Quadratzentimeter der äußere Lufdruck von 1,033 kg, also im ganzen ein Druck von 10 330 kg lastet, um 0,773/273 m zurück. Zu der hierbei geleisteten Arbeit von $10\,330 \cdot 0,773/273$ Meterkilogramm wurde eine Wärmemenge verbraucht, welche dem Unterschied der beiden spezifischen Wärmen gleich ist, also 0,0685 Wärmeinheiten. Die Arbeit einer Wärmeinheit beträgt also $(10\,330 \cdot 0,773) : (273 \cdot 0,0685) = 427$ Meterkilogramm. Auf diesem Wege hat Robert Mayer zuerst das mechanische Wärmeäquivalent zu berechnen versucht.

128. Aggregatzustände. Die Einsicht, daß die Wärme nicht etwa ein Stoff, sondern Arbeit oder Bewegungsenergie ist, in Verbindung mit der Annahme, daß die Körper aus individuellen kleinsten Teilchen (Molekülen) zusammengesetzt seien, gibt nun von den Wärmeerscheinungen, welche wir bisher als Erfahrungstatsachen kennen gelernt, eine zwar hypothetische, aber einheitliche und übersichtliche Erklärung.

Ein fester Körper ist anzusehen als eine Anhäufung (ein „Aggregat“) von Molekülen, welche, ohne sich unmittelbar zu berühren, durch die zwischen ihnen tätigen Molekularkräfte zu einem Ganzen zusammengehalten werden. Jedem Molekül ist durch das Zusammenwirken der von seinen Nachbarmolekülen ausgeübten Kräfte eine bestimmte Gleichgewichtslage angewiesen, aus welcher es nur durch die Einwirkung äußerer Kräfte entfernt und in eine neue Gleichgewichtslage übergeführt werden kann; hören diese äußeren Kräfte auf zu wirken, so wird es durch die Molekularkräfte wieder in die frühere Gleichgewichtslage zurückgetrieben; hieraus erklärt sich die den festen Körpern eigene Elastizität. Die Moleküle befinden sich aber in ihrer jeweiligen Gleichgewichtslage nicht in Ruhe, sondern vollführen um diese sehr rasche Schwingungen; die Wucht, mit