

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Mechanische Wärme-Theorie

Holtzmann, Karl Heinrich Alexander

Stuttgart, 1866

Grundsätze der Wärmetheorie

[urn:nbn:de:bsz:31-272364](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-272364)

wendet werden muss, um die Wärmemenge Eins zu erhalten, heisst das mechanische Aequivalent der Wärmeeinheit oder das Arbeitsäquivalent der Wärme, wogegen man die Wärmemenge, welche die Arbeit Eins gibt, das Wärmeäquivalent der Arbeit nennt. Ist das letzte gleich A, so ist das Arbeitsäquivalent der Wärme

$$\frac{1}{A}.$$

In dem Folgenden nehmen wir als Einheit der Wärme die, welche vermag, 1 Kilogramm Wasser von 0° auf 1° C. zu erwärmen, und als Einheit der Arbeit die, welche ein schweres Kilogramm auf 1^m Höhe zu erheben vermag. Als wahrscheinlichsten Werth des Arbeitsäquivalentes der Wärmeeinheit gebrauchen wir 423,2^{km}, woraus sich das Wärmeäquivalent der Arbeit gleich 0,002362 ergibt, was sagt, mit der Wärme, mit welcher 0,002362 Kilogramm Wasser von 0° auf 1° C. erwärmt werden, kann die Arbeit 1^{km} gewonnen werden.

Grundsätze der Wärmetheorie.

Innere Arbeit der Wärme.

7. Durch einen Druck, der allseitig auf einen Körper ausgeübt wird, sehen wir das Volumen dieses Körpers abnehmen und ihn zugleich wärmer werden. Die Abnahme des Volums muss mit einer Annäherung der einzelnen Atome des Körpers verknüpft sein, und diese Annäherung wird im Allgemeinen mit einem Zurückschieben der Kraft, welche die Theilchen in ihrer Entfernung erhalten hat, verbunden sein, also mit einer Arbeit im Innern des Körpers, einer inneren Arbeit. Neben dieser besteht aber noch die Wirkung, dass der Körper wärmer wird, dass sich seine Temperatur erhöht. Dieser zweite Theil der Wirkung des auf den Körper ausgeübten Druckes, der auf ihn von aussen verwendeten Arbeit, muss nun in etwas bestehen, was mit Arbeit äquivalent ist, und als solches kennt die Dynamik noch die lebendige Kraft, welche einer vermehrten Geschwindigkeit entspricht.

Wird ein Körper erwärmt, so vergrössert sich im Allgemeinen sein Volumen, wir sehen ihn bei steigender Temperatur sich aus-

dehnen. Durch passende Vergrößerung des Drucks auf seine Oberfläche können wir die Ausdehnung verhindern und das Volum lassen wie es früher war. Hier können die einzelnen Theile des Körpers vor und nach der Temperaturerhöhung in derselben gegenseitigen Lage sein wie früher; auch seine Oberfläche ist noch dieselbe wie anfänglich. Hier ist also eine Arbeit, welche durch die zugetretene Wärme in dem Körper oder an seiner Oberfläche hervorgebracht wurde, nicht vorhanden. Die ganze zugeführte Wärme wird darin ihre Wirkung haben, dass dem Körper Bewegung, lebendige Kraft, welche jener Wärme äquivalent ist, mitgetheilt wurde. Da wir aber den Körper in seiner Gesamtheit in Ruhe sehen, so kann diese Bewegung nur in der Bewegung der kleinsten Theile, der Atome bestehen, welche sich, wie die Atome selbst, dem Gesichtssinne entzieht. Wir haben uns hiernach in einem Körper die kleinsten Theilchen in Bewegung zudenken; wird der Körper wärmer, so werden diese Bewegungen lebhafter, die lebendige Kraft, welche durch diese Bewegungen in dem Körper ist, wird grösser, kühlt er sich ab, kleiner.

Soll ein Körper bei erhöhter Temperatur sein Volumen unverändert behalten, so muss man den Druck auf die Oberfläche vergrössern. Dies erklärt sich, wenn man annimmt, der Druck im Innern des Körpers rühre daher, dass die sich bewegenden Atome gegenseitig auf einander stossen; die Summe der in der Zeiteinheit auf die Flächeneinheit hierdurch ausgeübten Antriebe wird der Druck auf diese Flächeneinheit sein. Dieser wird aber grösser werden, wenn die Bewegung der Atome lebhafter wird, oder wenn sich die Zahl der Stösse in derselben Zeit vermehrt. Wird bei Erhöhung der Temperatur der äussere Druck nicht vergrössert, so dehnt sich der Körper aus, bis der aus jenen Stössen sich hierbei ergebende Druck mit der gegenseitigen Anziehungskraft der Atome und mit dem äusseren Drucke wieder im Gleichgewicht ist. Hier wird zur Entfernung der Angriffspunkte der gegenseitigen Anziehung und zum Zurückschieben des äusseren Drucks eine Arbeit verbraucht, und man hat also bei der Erwärmung unter diesen Umständen neben der Zuführung von lebendiger Kraft an die Atome des Körpers noch eine innere Arbeit wegen der gegenseitigen Anziehung der Atome, und eine äussere Arbeit wegen des äusseren Druckes

zu leisten; man muss also hier bei gleicher Temperaturerhöhung eine grössere äussere Arbeit oder deren Aequivalent, lebendige Kraft, verwenden, als dort, wo das Volum dasselbe bleibt, oder in der Sprache der Wärmelehre: die specifische Wärme eines Körpers bei constantem Drucke ist grösser, als die specifische Wärme bei constantem Volum, und zwar um das Aequivalent Wärme der bei constantem Drucke geleisteten inneren und äusseren Arbeit.

Es kann auch bei constantem Volum eine Aenderung der gegenseitigen Lage der Atome eintreten, welche zu ihrer Herstellung eine innere Arbeit in Anspruch nimmt, wie dies z. B. bei der Torsion eines festen Körpers der Fall ist. Das Eis zieht sich beim Schmelzen zusammen, andere feste Körper dehnen sich beim Schmelzen aus; es lässt sich ein Körper denken, bei dessen Uebergang aus dem festen in den tropfbarflüssigen Zustand eine Volumsänderung nicht eintritt. In dem flüssigen Zustande müssen wir eine andere Anordnung der Atome annehmen, als in dem festen; es wird eine innere Arbeit nothwendig sein, um diese Umsetzung der Theilchen zu bewerkstelligen, und dieser Aufwand an Arbeit kann dadurch geschehen, dass einem zweiten Körper von der lebendigen Kraft seiner Theilchen genommen und diese zu jener inneren Arbeit im ersten verwendet wird, dass Wärme von dem zweiten Körper auf den ersten übergeht und diesen schmilzt. Bei dem Schmelzen wird diese zugeführte Wärme ganz zu innerer Arbeit verwendet, ohne dass eine Temperaturerhöhung stattfindet; man sagt, die zugeleitete Wärme werde latent. Ein ähnliches Verhältniss tritt bei der Verdampfung ein.

Art der Bewegung der Atome.

8. Ueber die Art der Bewegung der Atome der Körper, durch welche uns diese Körper warm erscheinen, lehren uns die Wärmeerscheinungen sehr wenig, da sie uns nur die lebendige Kraft angeben, und diese bei den verschiedenartigsten Bewegungen dieselbe sein kann. Bei festen Körpern müssen die Bewegungen oscillatorische sein, da wir annehmen müssen, dass die Atome der festen Körper gegenseitig Gleichgewichtslagen haben, welche die Mittelpunkte jener oscillatorischen Bewegungen sind. Bei tropfbarflüssigen Körpern findet ein ähnliches Verhalten statt. Für gasförmige

Körper gehen unsere Kenntnisse etwas weiter; es wird später hiervon die Rede sein.

Sind zwei Körper in Berührung, so gleichen sie, wie die Erfahrung lehrt, ihre Temperatur aus, d. h. sie erlangen allmählig dieselbe Temperatur. Dabei geht Wärme von dem Körper mit höherer Temperatur zu dem mit niederer Temperatur über, d. h. die lebendige Kraft der Atome des ersten Körpers nimmt ab, die lebendige Kraft der Theilchen des zweiten nimmt zu. Dieser Uebergang von Wärme wird wohl durch den Aether, in welchem sich die gravitirenden Atome befinden, vermittelt. Er wird als eine unzusammendrückbare Flüssigkeit an den Schwingungen der Atome des einen Körpers theilnehmen und diese oscillatorische Bewegung allen in ihm befindlichen Massen mittheilen, wie wir sehen, dass auf Wasser schwimmende Körper die dem Wasser mitgetheilte Wellenbewegung in sofern mitmachen, als sie gleichzeitige Oscillationen mit den Wassertheilchen ausführen. Ein permanenter Zustand wird aber nur dann eintreten können, wenn alle Theile Schwingungen von gleicher Dauer und gleicher Amplitude machen, und darin würde also das Wesen der gleichen Temperatur zweier Körper bestehen, dass die Atome dieser beiden gleich lang dauernde und gleich weite Schwingungen machen. Die lebendigen Kräfte der Bewegungen der Atome des einen und der Atome des andern Körpers werden sich dann verhalten wie die Massen dieser Atome, d. h. wie die Atomgewichte, womit sich der Dulong'sche Satz — Atomgewicht mal spezifische Wärme = Constante — unmittelbar ergibt. Wenn dieser Satz nur beiläufig stattfindet, und wenn die Constante für die einfachen Stoffe eine andere ist, als für die zusammengesetzten, so kann dies seinen Grund darin haben, dass die Atome nicht nur Translationen erleiden, sondern auch Drehungen um die Schwerpunkte.

Wirkungsfuction von Kirchhoff.

9. Wird ein Körper, dessen Volum v und dessen Temperatur θ ist, welcher allseitig einem Zuge S auf die Flächeneinheit ausgesetzt ist, und welcher dabei unter obigen Verhältnissen im Gleichgewichte ist, dadurch in einen andern Zustand gebracht, dass er neuen Zugkräften unterworfen wird, und dass seinen Atomen noch

lebendige Kraft zugeführt wird, so wird die Gesamtwirkung der ihm zugeführten lebendigen Kraft und der auf ihn verwendeten Arbeit darin bestehen, dass er wärmer wird oder dass sich seine Temperatur erhöht, und dass seine Theile in eine andere Anordnung gebracht werden, was gewöhnlich mit einer Ausdehnung des Körpers verbunden ist.

Die Zuführung der lebendigen Kraft zu den Theilchen des Körpers kann dadurch geschehen, dass man ihn mit einem wärmeren Körper in Berührung bringt, in welchem Falle man sagt, es werde dem Körper Wärme zugeführt; oder dadurch, dass man ihn mit einem zweiten Körper reibt, in welchem Falle die Theile des Körpers in Schwingungen gerathen wie eine Saite, welche man mit dem Bogen streicht. Im zweiten Falle, dem man noch andere anreihen könnte, wird die lebendige Kraft der Theilchen durch eine auf den Körper verwendete mechanische Arbeit hervorgerufen, welche zur Ueberwindung der Reibung erfordert wird, wobei aber zu beachten ist, dass nicht diese ganze Arbeit auf den betrachteten Körper übergeht, sondern nur ein Theil, indem ein anderer Theil zur Erwärmung des reibenden Körpers aufgewendet wird.

Auch durch einen elektrischen Strom, welcher den Körper durchfließt, kann dieser erwärmt werden; ebenso durch Strahlung.

Wir betrachten nun in dem Folgenden einen Körper, welcher durch Berührung mit einem andern Körper Wärme empfängt oder an diesen abgibt, und welcher zugleich einem allseitig gleichen Zug auf seine Oberfläche ausgesetzt ist. Wird der Körper in anderer Weise erwärmt, so wird man das immer auf die obige Erwärmungsweise zurückführen können. Ist nun Q die von einem Körper B auf den Körper C übergegangene Wärmemenge und ist W die bei der Ausdehnung auf C übertragene Arbeit der allseitig an ihm angebrachten Zugkräfte, so ist AW die dieser Arbeit äquivalente Wärmemenge, wenn A das Wärmeäquivalent der Arbeitseinheit ist und alle auf den Körper verwendete lebendige Kraft und Arbeit, ausgedrückt in Wärmemenge ist:

$$Q + AW = U \quad (1)$$

und dies muss für das Gleichgewicht die Summe der in dem Körper C geleisteten inneren Arbeit und der in ihm hervorgerufenen lebendigen Kraft sein, beides wieder in Wärmeinheiten gemessen. Die-

ses U wird nur von dem Anfangszustande des Körpers C und dem Endzustande abhängen, nicht aber von der Art und Weise, wie er aus dem ersten Zustande in den letzten übergegangen ist, da dies sowohl für die Arbeit gilt, welche zur Ueberwindung der Anziehungskraft der Theilchen verwendet wurde, als für die Vermehrung der lebendigen Kraft der Theilchen, der Erhöhung der Temperatur.

Im Allgemeinen wird ein Körper unter dem allseitig an seiner Oberfläche auf die Einheit der Fläche angebrachten Zug S bei einer bestimmten Temperatur θ ein bestimmtes Volum v einnehmen, und S , v , θ sind daher in der Weise veränderliche Grössen, dass eine von ihnen bestimmt ist, wenn die beiden andern bekannt sind, welche unabhängige Veränderliche sind. Wir wählen als diese unabhängige Veränderlichen das Volum v und die Temperatur θ und betrachten S als eine Function dieser beiden. Volum und Temperatur characterisiren im Allgemeinen den Zustand eines Körpers. Doch können auch Fälle vorkommen, in welchen bei demselben Volum und bei derselben Temperatur verschiedene Zustände denkbar sind, wie z. B. beim Schmelzen. Solche Aenderungen des Zustandes schliessen wir vorerst aus unsern Betrachtungen aus.

Nach dem Obigen und mit der eben gemachten Beschränkung wird also U als eine Function des Volums und der Temperatur des Körpers C zu betrachten sein. Sie heisst bei Kirchhoff die Wirkungsfuction.

Die zugeführte Wärme hängt nicht von Volumen und Temperatur allein ab.

10. Soll in dem betrachteten Zustande des Körpers C die Temperatur θ um $d\theta$ und das Volum v um dv geändert werden, so wird man Wärme von einem zweiten Körper zuführen müssen, diese sei dQ , und die Zugkraft wird die Arbeit Sdv auf den Körper ausüben. Aus (I) wird man also haben

$$dQ + ASdv = \frac{dU}{d\theta} d\theta + \frac{dU}{dv} dv. \quad (2)$$

Aendert sich nur die Temperatur, während das Volumen ungeändert bleibt, so wird aus dieser Gleichung

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{dU}{d\theta} \quad (2a)$$

und dies ist, was man die spezifische Wärme des Körpers bei constantem Volum nennt, wenn die Masse des Körpers Eins ist, was in dem Folgenden immer vorausgesetzt sein soll.

Nennt man diese spezifische Wärme bei constantem Volumen c , so ist

$$\frac{dU}{d\theta} = c. \quad (3)$$

Ändert sich dagegen nur das Volumen und bleibt die Temperatur dieselbe, so hat man

$$\frac{dQ}{dv} + AS = \frac{dU}{dv}. \quad (3a)$$

Die spezifische Wärme bei constantem Druck, welche c_1 heißen soll, erhält man aus (2), wenn man die Bedingung des constanten Zuges einführt, d. h. wenn man

$$\frac{dS}{dv} dv + \frac{dS}{d\theta} d\theta = 0$$

setzt, woraus man $\frac{dv}{d\theta}$ zu nehmen hat. Man erhält so

$$\frac{dQ}{d\theta} + AS \frac{dv}{d\theta} = \frac{dU}{d\theta} + \frac{dU}{dv} \frac{dv}{d\theta}$$

oder

$$c_1 - c = \left(\frac{dU}{dv} - AS \right) \frac{dv}{d\theta} = - \left(\frac{dU}{dv} - AS \right) \frac{\frac{dS}{d\theta}}{\frac{dS}{dv}}. \quad (4)$$

Will man den thermischen Ausdehnungscoefficienten δ einführen, d. h. die Volumsvermehrung, welche das Volum Eins durch eine Temperaturerhöhung um 1° bei constantem Zuge S erleidet, so ist das hier gebrauchte dv gleich $v\delta d\theta$ und damit wird die Gleichung (4)

$$c_1 - c = \left(\frac{dU}{dv} - AS \right) v\delta \quad (5)$$

und zugleich hat man

$$\frac{dS}{d\theta} = -v\delta \frac{dS}{dv}. \quad (6)$$

Die Formel (5) sagt: „Wird ein Körper bei constantem Zuge um 1° erwärmt, so ist die innere Arbeit, welche hierbei geleistet wurde, weniger der auf den Körper verwendeten äusseren Arbeit,

beide in Wärme ausgedrückt, gleich der Differenz der specifischen Wärmen bei constantem Drucke und bei constantem Volumen.“

Aus (2 a) und (3 a) lässt sich noch U eliminiren, indem man (2 a) nach v und (3 a) nach θ ableitet und beide Gleichungen subtrahirt. Man erhält

$$\frac{d\left(\frac{dQ}{d\theta}\right)}{dv} - \frac{d\left(\frac{dQ}{dv}\right)}{d\theta} - \Delta \frac{dS}{d\theta} = 0. \quad (7)$$

Die beiden ersten Glieder heben sich nicht auf, weil Q keine Function von v und θ ist; in der Gleichung (1) ist zwar die Summe $Q + \Delta S$ eine Function von v und θ , nicht aber jeder einzelne Summand.

Wenn man einen Körper aus einem Zustande, der durch v_0, θ_0 gegeben sein soll, auf zwei verschiedenen Wegen in den durch v, θ gegebenen Zustand bringen kann, auf welchen die auf ihn verwendete äussere Arbeit nicht dieselbe ist, so muss nach der Formel (1) auch die zugeführte Wärme auf diesen beiden Wegen eine verschiedene sein, da U dasselbe bleibt. Es kann also Q keine Function von v, θ sein. Dass das Obige aber möglich ist, wird unten gezeigt werden.

Anwendung auf Gase.

Werth des Wärmeäquivalents.

11. Ehe wir die Bedeutung der Gleichung (7) betrachten, wollen wir die Formeln (2) bis (6) auf vollkommene Gase anwenden, d. h. auf Gase, welche das Boyle-GayLussac'sche Gesetz befolgen. Ist p der Druck eines solchen Gases, so ist nach diesem Gesetze

$$pv = \frac{R}{s} (a + \theta), \quad (a)$$

wo R und a Constanten für alle Gase sind, s aber die Dichte des betrachteten Gases gegen atmosphärische Luft. Ist p in Kilogrammen für den Quadratmeter ausgedrückt, v in Kubikmetern, so ist bekanntlich $R = 29,285$ und $a = 273$, wenn die Temperatur in Graden Celsius angegeben wird, p in dieser Formel ist gleich — S in den Formeln der vorhergehenden Nummer.