I.

Das mechanische Aequivalent der Wärmeeinheit.

Von dem Lehrer Gustav Müller.

Die folgende Arbeit hat den Zweck, die Beziehungen zwischen Wärme und Bewegung, das Princip der Aequivalenz von Wärme und Arbeit, besonders die Methoden, nach welchen das mechanische Aequivalent der Wärmeeinheit sich finden läßt, in gedrängter und wo möglich auch dem Schüler verständlicher Darstellung zu entwickeln. Die meisten Lehrbücher der Physik, besonders die in den Händen der Schüler sich befindenden, berühren diesen Gegenstand nur kurz oder gar nicht, weil er noch nicht zum Abschluß gelangt ist. Die hohe Bedeutung indeß, welche das Gesetz der Aequivalenz von Wärme und Arbeit nicht bloß für die Wärmelehre und Physik überhaupt, sondern für sämmtliche Naturwissenschaften hat, mag den Versuch, diese Lücke ergänzen zu wollen, rechtfertigen.

Soll eine ruhende Masse in Bewegung gesetzt werden, so ist dazu ein gewisser Aufwand von Kraft nöthig, von selbst entsteht keine Bewegung. Keine Wirkung ist ohne Ursache. Ein Objekt, das, indem es aufgewendet wird, Bewegung hervorbringt, nennen wir Kraft. Wir schätzen eine Kraft nach ihrer Wirkung, indem die Wirkung gleich der Ursache ist.

Wenn einem Körper, der durch irgend eine Kraft in Bewegung gesetzt wird, fortwährend ein gleichmäßiger Widerstand entgegenarbeitet, so ist es uns möglich, die Wirkung der Kraft zu messen, sobald die Größe des Widerstandes bekannt ist.

Die Wirkung einer Kraft, indem sie einen gleichmäßigen Widerstand überwindet, ist um so größer, je länger der Weg ist, durch welchen dieses geschieht. Als Maaßeinheit dient der Begriff von einem Kilogrammeter, d. h. die Wirkung einer Kraft, welche nöthig ist, um einen beständigen Widerstand, der gleich dem Drucke eines Kilogrammes ist, auf die Länge von einem Meter zu überwinden. [1])

---

[1]) 1 Kilogrammeter ist ungefähr = 6⁶/₇ Fußpfund.

Wenn ein Widerstand von m Kilogramm auf 1 Meter Länge überwunden werden soll, so muß die Wirkung der Kraft m mal so groß sein, oder = m Kilogrammeter, und ist dieser Widerstand auf n Meter zu bewältigen, so muß derselbe Kraftaufwand, der nöthig war, um den Widerstand von m Kilogramm auf 1 Meter Länge zu überwinden, n mal angewendet werden, die Wirkung der Kraft muß also = n × m Kilogrammmeter sein. Daraus erhellt, daß die Wirkungen der Kräfte einander gleich sind, wenn die Producte der Widerstände in den Weg einander gleich sind. Einige kurze Beispiele mögen dies noch verdeutlichen.

Wenn 36 Kilogramm 10 Meter hoch gehoben werden, so leisten sie einen fortwährenden Widerstand von 36 Kilogramm vermöge ihrer Schwere, die Wirkung der Kraft, die sie erhebt, ist also gleich 36 × 10 = 360 Kilogrammeter.

Auf einer vollständig ebenen Straße soll eine Last von 36 Kilogramm Gewicht fortgezogen werden. Der Reibungswiderstand, der in diesem Falle (abgesehen vom Widerstande der Luft) allein zu überwinden ist, beträgt bekanntlich $^1/_{36}$ der Last; wird daher durch eine Kraft diese Last 360 Meter weit auf der Straße fortgezogen, so ist in diesem Falle ihre Wirkung ebenfalls = 360 × 1 = 360 Kilogrammeter. 2 Menschen, von denen der erstere die 36 Kilogramm 10 Meter hoch trägt und der letztere 36 Kilogramm auf ebener Straße 360 Meter weit fortzieht, haben also gleich viel Arbeit gethan. Auf die Zeit kommt es dabei insofern noch an, als der Kraftaufwand in der Zeiteinheit größer sein muß, wenn dieselbe Arbeit in kürzerer Zeit gethan werden soll.

In der angewandten Mechanik führt das Product des Widerstandes in den Weg den Namen Arbeitsgröße; man überträgt den Begriff der Arbeit auf Maschinen, indem man ihre Verrichtungen, aber nur in Bezug auf den Kraftaufwand, mit denen der Menschen und Thiere vergleicht, zu deren Ersatz sie bestimmt sind. So berechnet man die Leistungen der Dampfmaschinen nach Pferdekräften. Darunter versteht man, auf obige Einheit zurückgeführt, gewöhnlich eine Kraft von 70 Kilogrammetern, weil ein gutes Pferd, wenn es täglich 8 Stunden lang arbeitet, der Erfahrung gemäß in jeder Sekunde einen Widerstand von 70 Kilogramm durch den Raum von einem Meter zu überwinden vermag.

Meistentheils sind aber die Widerstände, die sich der Bewegung eines Körpers entgegen setzen, der verschiedensten und durchaus nicht gleichmäßiger Art und daher schwer schätzbar; es stellt sich daher die Frage heraus, ob noch auf andere Art und Weise die Wirkung der bewegenden Kraft sich messen läßt, als auf die oben angegebene. Dies ist der Fall, nämlich durch das Product der Masse des in Bewegung gesetzten Körpers in das Quadrat seiner Geschwindigkeit.

Wirkt auf einen Körper durch einen bestimmten Raum hindurch eine bestimmte Kraft, ohne daß dem Körper ein Widerstand entgegensteht, so wird derselbe, wenn er dann plötzlich auf einen Widerstand stößt, der gleich der aufgewendeten Kraft ist, vermöge der erlangten Geschwindigkeit, allein, ohne weitere Einwirkung der Kraft diesen auf eine ebenso große Strecke hin überwinden können, als vorher die Kraft auf ihn wirkte, ehe er zur Ruhe kommt.

Ein Stein, der von einer Höhe von M Fuß herabfällt, erlangt, wenn wir vom Widerstande der Luft absehen, eine so große Geschwindigkeit, daß er sich, wenn sich die Richtung seiner Bewegung in die entgegengesetzte verwandeln ließe, wenn er z. B. von einem vollkommen elastischen Körper zurückprallte, wieder zu M Fuß Höhe erheben würde. Die Schwere des Steins, welche erst die bewegende Kraft ist, ist nachher der hemmende Widerstand, die Wege müssen daher gleich sein.

Ist der Widerstand nicht grade gleich der aufgewendeten Kraft K, die den Körper während des Weges S in Bewegung erhielt und fortwährend auf ihn wirkte, sondern verschieden von ihr, z. B. $= K'$, so vermag der Körper diesen Widerstand K' durch einen Weg S' zu überwinden, so daß $K' S' = K S$ ist.

Jeder Körper überhaupt, der sich in Bewegung befindet, besitzt eine gewisse Wirkungsfähigkeit, das Vermögen, eine gewisse Summe von Widerständen zu überwinden; denn daß er sich noch in Bewegung befindet, ist ein Beweis, daß die Widerstände, die etwa entgegen standen, nicht ausreichten, um seine Bewegung vollständig zu vernichten. Jeder in Bewegung befindliche Körper stellt gewissermaßen einen bestimmten Kraftvorrath vor; seine Bewegung, zunächst Wirkung einer Kraft, ist, gleich der Ursache, wieder Kraft, insofern sie bei seinem Zusammentreffen mit ruhenden Körpern nach und nach aufgewendet wird, d. h. verloren geht, um diese in Bewegung zu setzen. Diese Wirkungsfähigkeit eines in Bewegung befindlichen Körpers nennt man lebendige Kraft desselben. Das Wort lebendig bezieht sich hier natürlich in keiner Weise auf lebende Wesen, sondern soll die Kraft der Bewegung nur unterscheiden von dem ruhigen Zustande unveränderten Bestehens, in welchem sich z. B. die Schwerkraft eines ruhenden Körpers befindet, welche zwar einen fortdauernden Druck gegen seine Unterlage unterhält, aber keine Veränderung hervorbringt.

Um nun die Größe der Wirkungsfähigkeit, d. h. die Summe von Widerständen zu finden, die ein Körper, der sich in Bewegung befindet, überwinden kann, muß man nach Obigem die Wirkung der Kräfte, unter deren Einfluß er stand, d. h. die Producte derselben in die Wege, durch welche sie wirkten, suchen, so wie die Widerstände in Abzug bringen, die schon entgegen standen und überwunden wurden. $K, S, + K_2 S_2 + \ldots - W, L, - W_2 L_2 \ldots$ würde hiernach der Ausdruck für dieselbe sein, worin K, K_2 die Kräfte bezeichnen, welche die Bewegung des Körpers befördern und S, S_2 ꝛc. die Wege, während welcher sie auf ihn wirken; ferner W, W_2 die Widerstände, welche die Bewegang hemmen, und L, L_2 die Strecken, während deren sie zu bewältigen sind.

Die Wirkungsfähigkeit läßt sich aber noch in anderer Weise berechnen und anderer Form ausdrücken, wenn man die Masse des Körpers und seine Geschwindigkeit mit in Betracht zieht.

Dieser zweite Ausdruck für die Wirkung der Kraft hängt innig mit dem ersten zusammen und läßt sich aus demselben ableiten. Zum besseren Verständniß des Folgenden und um zugleich zu zeigen, weshalb grade durch das Product der Masse in das Quadrat der Geschwindigkeit die Größe der Bewegung gemessen werde, sei kurz der Zusammenhang dargelegt.

Ein Körper, welcher die Geschwindigkeit c besitzt, vermag einen Widerstand, der seine Geschwindigkeit in jeder Sekunde um m vermindert, durch einen Raum

$$s = \frac{c^2}{2m}$$

zu überwinden.[2]

[2]) Bezeichnet v die Geschwindigkeit nach t Sekunden, so ist diese

$$1, \quad v = c - mt$$

Der Weg ferner s, den der Körper nach t Sekunden durchlaufen hat, ist

$$2, \quad s = ct - \frac{mt^2}{2}$$

Denn beträgt die Verringerung der Geschwindigkeit in jeder Sekunde m, so wird der Weg, welchen der Körper vermöge der Geschwindigkeit, die er am Anfang einer Sekunde besitzt, zurücklegen würde, jedesmal um $m/_2$ verringert. Am Ende der ersten Sekunde würde der Körper den Weg c zurückgelegt haben, wenn nicht der gleichmäßige Widerstand, der seine Geschwindigkeit im Laufe der Sekunde um m vermindert, vorhanden wäre.

Aus der Vergleichung mit den Fallgesetzen ergiebt sich, wie groß der Widerstand sein muß, der die Geschwindigkeit c in jeder Sekunde um m verringern kann.

Ein Körper, der vertikal in die Höhe geworfen wird, verliert bekanntlich durch die Schwere um $g = 9,81$ Meter an seiner Geschwindigkeit.

Bei dieser Verminderung der Geschwindigkeit um g in jeder Sekunde ist der Widerstand jedesmal gleich dem eigenen Gewicht des Körpers. Beträgt also z. B. das Gewicht eines Körpers 1 Kilogramm, so ist beim vertikalen Wurfe in die Höhe der beständige Widerstand, den der Körper fortwährend zu überwinden hat, 1 Kilogramm, die Verringerung der Geschwindigkeit in der Sekunde $= g$. Betrüge sie nur 1 Meter, so wäre der Widerstand auch nur $= \frac{1}{g}$ Kilogramm; ist sie gleich m Meter, so ist der Widerstand $= \frac{m}{g}$ Kilogramm. Dies gilt nicht blos allein von dieser besonderen Bewegung des Körpers, sondern auch von jeder anderen; allgemein ist der gleichmäßige Widerstand, der die Geschwindigkeit eines Körpers von 1 Kilogramm Gewicht in jeder Sekunde um m Meter vermindert, gleich m/g Kilogramm. Es vermag nun nach Obigem ein Körper, von der Geschwindigkeit c einen Widerstand, der seine Geschwindigkeit in jeder Secunde um m Meter verringert, während eines Weges $s = \frac{c^2}{2m}$ zu überwinden, es ist somit seine Wirkung nach dem Früheren gleich

$$W. s = \frac{m}{9,81} . \frac{c^2}{2m} = \frac{c^2}{2.9,81}$$

1 Kilogramm, welches die Geschwindigkeit c besitzt, hat also die Arbeitsgröße oder Wirkungsfähigkeit von $\frac{c^2}{2.9,81}$ Kilogrammeter.

Es wird daher der Weg, den der Körper durchlaufen hat, größer als $c - m$, aber kleiner als c sein und zwar da die Geschwindigkeitsabnahme ganz gleichmäßig geschah, gleich dem arithmetischen Mittel aus beiden

$$s_1 = \frac{c + (c - m)}{2} = c - m/_2.$$

In der zweiten Sekunde ist die Anfangsgeschwindigkeit $= c - m$, die Endgeschwindigkeit $c - 2m$, also der Weg in der zweiten Sekunde

$$s_2 = \frac{c - m + c - 2m}{2} = c - \frac{3m}{2}, \text{ also}$$

$$s_1 + s_2 = 2c - \frac{4m}{2}, \text{ ferner ist}$$

$$s_3 = \frac{c - 2m + c - 3m}{2} = c - \frac{5m}{2}$$

$$s_1 + s_2 + s_3 = 3c - \frac{9m}{2} \text{ u. s. f.}$$

Daraus ergiebt sich die allgemeine Formel, der Weg s, den der Körper in t Sekunden zurücklegt, ist:

$$s = ct - \frac{mt^2}{2}$$

Aus Gleichung 1) folgt, daß $v = o$ wird, d. h. der Körper zur Ruhe kommt, wenn $t = \frac{c}{m}$, dann hat aber nach Gleichung 2) der Körper einen Weg

$$s = \frac{c^2}{2m}$$

zurückgelegt.

Eine Masse von P Kilogramm, welche die Geschwindigkeit c besitzt, wird daher, da jedem einzelnen Kilogramm diese Wirkungsfähigkeit zukommt, im Ganzen die Wirkungsfähigkeit von

$$\frac{c^2 . P}{2.\ 9{,}81} \text{ Kilogrammeter}$$

haben. Das Gewicht P wird einen Widerstand von Q Kilogramm durch einen Raum von S Metern überwindeu können, wenn

$$Q.\ S = \frac{c^2 . P}{2.\ 9{,}81} \text{ ist.}$$

Das Gewicht eines Körpers auf der Erde ist die Folge der Anziehungskraft derselben. Es wächst mit der Menge der materiellen Theilchen, welche in ihm enthalten sind, mit seiner Masse, und würde sich ganz proportional der Anziehungskraft der Erde ändern, wenn dieselbe irgend welchem Wechsel unterworfen wäre.

Es läßt sich daher ausdrücken durch das Product der Masse des Körpers in die Anziehungskraft der Erde. Derselbe Körper würde an der Oberfläche der Sonne ein 28 mal größeres Gewicht haben, da die Anziehungskraft der Sonne 28 mal größer als die der Erde ist. Die Masse eines Körpers auf irgend einem Weltkörper wird daher gleich dem Quotienten aus seinem Gewicht und der Anziehungskraft des Weltkörpers sein.

Als Maaß der Anziehungskraft der Erde dient die Beschleunigung g beim freien Fall. Drückt man nun mit Bezug auf obige Formel die Anziehungskraft der Erde durch 2 g aus (wonach auf jedem anderen Weltkörper, wenn die Acceleration darauf x ist, sie auch durch 2 x bezeichnet werden muß), so ist, wenn P das Gewicht eines Körpers ist, $\frac{P}{2\ g}$ gleich seiner Masse.

Danach geht obige Formel für die Wirkungsfähigkeit eines Körpers vom Gewicht P und der Geschwindigkeit c in die allgemeinere über:

$$\frac{c^2\ P}{2\ g} = c^2 .\ M.$$

Dies Product nennt man die lebendige Kraft der Masse M.

Dieser Ausdruck ist von ganz allgemeiner Bedeutung und gilt für jede Bewegung im Weltraum, er zeigt ferner, daß die Wirkung eines in Bewegung befindlichen Körpers nicht einfach seiner Geschwindigkeit, sondern dem Quadrat derselben proportional ist.

Zwei Mittel haben wir also, die Wirkung einer mechanischen Kraft zu messen, entweder dadurch, daß wir den gleichmäßigen Widerstand ermitteln, den sie auf eine bestimmte Strecke zu überwinden vermag (am einfachsten durch Erhebung eines Gewichts) oder die lebendige Kraft bestimmen, die sie einem Körper ertheilt. Bald in der einen, bald in der andern Form tritt uns der Effect der mechanischen Kräfte in der Natur gegenüber.

Herabstürzende Wassermassen treiben z. B. das Wasserrad eines Eisenhammers, dadurch wird die Triebkraft für das ganze Maschinenwerk gewonnen. Durch das Wasserrad werden schwere eiserne Hämmer mittelst geeigneter Vorrichtungen an seiner Axe, die die Stiele derselben erfassen, gehoben, um sie dann wieder fallen zu lassen. Von den herabfallenden Hämmern werden Metallmassen, die ihnen untergeschoben sind, bearbeitet. Die lebendige Kraft, welche das herabfallende Wasser vermöge seiner Bewegung besitzt, tritt uns hier in Arbeit verwandelt in der Form eines überwundenen gleichmäßigen Widerstandes im gehobenen Hammer entgegen. Indem der Hammer nun herunterfällt, erlangt er wieder durch die Bewegung eine gewisse lebendige Kraft, deren Wirkung sich in der Compression und Erwärmung der untergeschobenen Metallmasse zeigt. Wäre die Metalmasse vollkommen elastisch, so würde der Hammer zurückprallen und im günstigsten Falle sich wieder bis zu der Höhe erheben, von welcher er herunter gefallen ist. Die lebendige Kraft des Hammers würde sich in dieselbe Arbeit oder Fallkraft [3]) wieder verwandeln, wie die war, aus der sie entstanden ist. Die Wirkung kann nicht größer sein, als die Ursache. — Die Masse des herabstürzenden Wassers und die Höhe seines Falles stehen, indem von ihnen seine lebendige Kraft abhängt, zu dem Gewicht des gehobenen Hammers und seiner Fallhöhe in bestimmter Beziehung. Soll ein Hammer von 1 Kilogramm Gewicht auf 1 Meter Höhe erhoben werden, so muß dazu auch mindestens eine Wassermenge von 1 Kilogramm 1 Meter hoch herunter fallen. Allgemein wird die Anzahl von Kilogrammetern, durch welche man die Arbeit, die von der Maschine durch Erhebung des Hammers geleistet wird, ausdrücken kann, höchstens gleich der Anzahl von Kilogrammmetern sein, welche der herabgefallenen Wassermasse entspricht. In der Wirklichkeit geht aber ein großer Theil der lebendigen Kraft des Wassers für die Zwecke der Maschine unbenutzt verloren, jedoch nicht für das Naturganze.

Der Theil der lebendigen Kraft indeß, der durch die Maschine in Fallkraft verwandelt wird, kommt auch beim Fall des Hammers wieder als lebendige Kraft zum Vorschein.

Wird überhaupt lebendige Kraft in Fallkraft oder Arbeit, oder umgekehrt Fallkraft in lebendige Kraft verwandelt, so bleibt die gegebene Kraft oder der mechanische Effect eine constante Größe. In der Mechanik führt dies Gesetz den Namen „Prinzip der Erhaltung der lebendigen Kraft." Belege dazu liefert uns der freie Fall, der verticale Wurf in die Höhe und viele andere Bewegungen. Ein Körper, der mit irgend welcher Geschwindigkeit vertikal empor geworfen wird, gelangt, wenn er wieder zur Erde zurückkehrt, mit derselben Geschwindigkeit unten wieder an, mit der er ausgegangen war, seine lebendige Kraft ist also eben so groß, wie sie im Anfang des Emporsteigens war. Von dem Widerstande der Luft ist hierbei vorläufig abgesehen.

Aus der obigen Darstellung geht hervor, wie die Wirkungen mechanischer Kräfte, z. B. der strömenden Luft und des fallenden Wassers, gemessen und mit einander verglichen werden können. Es giebt aber noch ein großes Gebiet von Naturkräften, die nicht zu den reinen Bewegungskräften gerechnet werden, wie Wärme, Licht, Electricität, Magnetismus und chemische Verwandtschaft. Jedoch überall, wo irgend eine dieser Kräfte in Thätigkeit ist, bei jedem Naturproceß, kommen neben andern Wirkungen auch stets mechanische mit vor; durch jede der genannten Kräfte läßt sich mechanische Arbeit gewinnen. Die neuere Zeit ist es ja, welche sich nicht mehr mit der Triebkraft begnügt, die die Benutzung der bewegten Luft und des fließenden Wassers gewährt, sondern in der Wärme eine neue und ungleich gewaltigere Quelle von Arbeitskraft erkannt und in der Verwerthung derselben bedeutende Erfolge schon errungen hat. Es ist nun die Frage: in welcher wesentlichen Beziehung stehen diese Kräfte zu diesen mechanischen Wirkungen, die sie begleiten? lassen sich ihre Wirkungen überhaupt gradezu auf dasselbe Maaß zurückführen, welches oben für die Wirkungen rein mechanischer Kräfte entwickelt worden ist? Nach den Fortschritten der neueren Naturwissenschaft ist es kaum zweifelhaft, daß dies einst bei sämmtlichen Naturkräften gelingen wird.

[3]) Unter Fallkraft verstehe ich hier nach dem Vorgange von J. R. Mayer Gewichtserhebung, die als Bewegungsursache Kraft ist.

Es giebt in Wahrheit nur eine einzige Kraft in der Natur und die oben genannten Kräfte sind nicht wesentlich verschiedene, sondern nur Wandlungen oder welchselnde Formen dieser einen Grundkraft. Hauptaufgabe der Physik ist es, diese verschiedenen Formen der Kraft kennen zu lernen und die Bedingungen zu erforschen, unter denen sie aus der einen Form in die andere übergeht. Von diesem Gesichtspunkte aus ist die Bedeutung der zwischen Wärme und Bewegung in neuerer Zeit aufgefundenen Beziehungen aufzufassen.

Am häufigsten tritt uns Wärmeentwickelung bei chemischen Prozessen entgegen, aber auch in vielen anderen Fällen, wo ein solcher nicht stattfindet, bei Reibung, beim Stoß unelastischer Körper und dem Zusammendrücken von Gasen kommen bedeutende Wärmemengen zum Vorschein. Ueberall liefert uns die Erfahrung Beispiele dafür, daß, wo Bewegung verschwindet, wo ein bewegter Körper auf Widerstände stößt, die seine lebendige Kraft vernichten, vorher nicht dagewesene Wärme sich einstellt. Der umgekehrte Fall tritt uns in der Thatsache entgegen, daß Gase, die sich ausdehnen, so daß sie dabei einen Widerstand überwinden, nach der Ausdehnung eine niedrigere Temperatur zeigen, als vorher; hier verschwindet Wärme, dafür wird aber Bewegung hervorgebracht und Arbeit geleistet, indem der Widerstand, z. B. ein beweglicher Kolben, der das Gas in einem cylinderförmigen Gefäße einschließt, um eine bestimmte Strecke fortgestoßen wird. Dehnt sich dagegen ein Gas ungehindert, ohne Widerstand zu finden, aus, z. B. in den luftleeren Raum, dann tritt auch keine Abkühlung desselben ein, wie dies zuerst von Gay-Lussac durch Versuche nachgewiesen worden ist. Eine Dampfmaschine ferner giebt, wenn sie arbeitet, weniger Wärme frei, d. h. an die Umgebung durch Strahlung und Leitung ab, als wenn sie still steht; hier verschwindet also ebenfalls Wärme auf Kosten gewonnener Arbeit. — Diese Erscheinungen, die sich durch manche Beispiele noch vermehren ließen, weisen auf einen bestimmten Zusammenhang zwischen Wärme und Bewegung hin.

Der erste, welcher sich bemühte, die Beziehungen zwischen Wärme und Arbeit aufzufinden, war ein Franzose, S. Carnot, im Jahre 1824. Derselbe fand ein Gesetz, welches jetzt seinen Namen trägt. Er ging aber dabei von einer irrthümlichen Annahme aus, wodurch sein Gesetz, sowie er es zunächst aussprach, in Widerspruch zu dem Gesetz von der Erhaltung der lebendigen Kraft stand. Lange Zeit blieben die Leistungen Carnot's ganz unbeachtet, erst seit dem Jahre 1840 ungefähr begann ein regeres Interesse an diesem Gegenstande in wissenschaftlichen Kreisen hervorzutreten. Durch Clausius in Zürich erhielt das Carnot'sche Gesetz nunmehr eine solche Abänderung, daß es nicht mehr dem Gesetz von der Erhaltung der Kraft widerspricht. In dieser Form läßt sich ihm folgender Ausdruck geben: „Nur wenn Wärme von einem wärmeren zu einem kälteren Körper übergeht, kann sie, und auch dann nur theilweise, in mechanische Arbeit verwandelt werden." — Carnot ging von der Vorstellung aus, daß Wärme, um mechanische Arbeit zu leisten, von einem wärmeren zu einem kälteren Körper durch Vermittelung eines dritten expansiblen Körpers übergeführt werden müsse, z. B. von dem Kessel durch Vermittelung des Dampfes in den Condensator.

Er stellte dabei als Grundsatz auf, daß die mechanische Arbeit proportional sei der Temperaturdifferenz beider Körper und proportional der übertragenen Wärmemenge, während die Gesammtwärme beider Körper bei der Arbelt constant bleibe. Carnot behauptet somit, daß, wenn von einem wärmeren Körper zu einem kälteren Wärme übergeht, z. B. vom Kessel auf den Dampf, während dieser bei seiner dadurch erfolgenden Ausdehnung einen Widerstand überwindet (z. B. den Druck des Kolbens), dennoch nach der geleisteten Arbeit sich in ihm diese ganze Wärmemenge noch befindet, die er vom ersten empfangen hat; es würde demnach der Wasserdampf in der Dampfmaschine, nachdem er den Kolben gehoben, beim Eintritt in den Condensator genau so viel Wärme abgeben können, als er im Kessel aufgenommen hat. Diese Annahme widerlegt Clausius und zeigt, daß ein Theil der Wärme, welche von der Wärmequelle auf den kälteren Körper übergeht, wenn derselbe bei seiner Erwärmung einen Widerstand überwindet, verloren geht, so daß nach geleisteter Arbeit aus ihm nicht mehr eine ebenso große Wärmemenge gewonnen werden kann, als auf ihn übergegangen ist. Dem Wärmeverlust setzt Clausius sodann die geleistete Arbeit proportional, nicht der ganzen von der Wärmequelle übertragenen Wärmemenge. Das hiermit zusammenhängende allgemeine Naturgesetz wurde aber zuerst im Jahre 1842 von einem deutschen Arzte, J. R. Mayer in Heilbronn, in klarer Weise aufgefaßt und ausgesprochen. Fast um dieselbe Zeit gelangten mehrere Forscher ganz unabhängig von einander zu demselben Ziele. Im Jahre 1843 überreichte ein Däne Colding der Akademie von Copenhagen eine Abhandlung, worin er dasselbe Gesetz aussprach und zugleich über Versuchsreihen berichtete, die er zur Begründung desselben angestellt hatte. In demselben Jahre begann auch der berühmte englische Physiker Joule seine Versuchsreihen über diesen Gegenstand. Wenige Jahre später entwickelte Helmholtz, ohne die Entdeckungen der erstgenannten Forscher zu kennen, im seiner Schrift „über die Erhaltung der Kraft" denselben Gedanken, indem er bemüht war, die Beziehungen zwischen den verschiedenen Naturprozessen aufzufinden. In den darauf folgenden Jahren erkannten die berühmtesten Physiker die Richtigkeit des Gesetzes an und trugen, so besonders Regnault, durch ihre Forschungen zur weitern Begründung desselben viel bei.

Das von Mayer zuerst aufgestellte Gesetz lautet: „Wärme und Bewegung verwandeln sich in einander; wenn durch Wärme Arbeit gewonnen wird, so verschwindet eine gewisse Menge Wärme, während umgekehrt durch Vernichtung einer gewissen Arbeitsgröße vorher nicht dagewesene Wärme neu erzeugt werden kann."

Es ist nicht uninteressant, den Beobachtungen Mayer's zu folgen, durch welche er zuerst auf dieses Gesetz geführt wurde. [4])

Im Sommer 1840 machte er bei Aderlässen, die er auf Java an neuangekommenen Europäern vornahm, die Beobachtung, daß das aus der Armvene genommene Blut fast ohne Ausnahme eine überraschend hellrothe Färbung zeigte. Er erkannte bald, daß diese Erscheinung eine Folge der höheren Temperatur in der heißen Zone sei. Nach der Theorie Lavoisier's ist die Körperwärme des Menschen und Thieres die Wirkung eines Verbrennungsprozesses im Körper. Demgemäß betrachtete Mayer die zweifache Farbenveränderung, welche das Blut in den Haargefäßen des großen und kleinen Kreislaufes erleidet (von hellroth zu dunkelroth in denen des großen und umgekehrt in denen des kleinen) als ein sinnlich wahrnehmbares Zeichen einer mit dem Blute vor sich gehenden Oxydation. Die Wärme des menschlichen Körpers ist nun bekanntlich in den verschiedensten Gegenden der Erde eine gleiche; damit aber die Temperatur des menschlichen Körpers eine gleichmäßige bleibe, muß die Wärmeentwickelung in ihm mit dem Wärmeverlust nach außen an die umgebende Luft, also auch mit deren Temperatur, in einem bestimmten Größenverhältniß stehen; es muß die Wärmeentwickelung, d. h. die Oxydation und damit auch der Farbenunterschied beider Blutarten in der heißen Zone geringer sein, als in kälteren Gegenden. Von den aufgenommenen Nahrungsmitteln wird

[4]) Cfr. J. R. Mayer, «Bemerkungen über das mechanische Aequivalent der Wärme.» Heilbronn und Leipzig, 1851. S. 15 ff.

der größte Theil, nachdem sie von den Verdauungswerkzeugen assimilirt worden sind, zur Erhaltung der Wärme des Körpers verbrannt, nur der kleinere Theil dient mittelbar dem Wachsthum der Organe und der Erneuerung abgenutzter fester Theile. Damit hängt das geringere Nahrungsbedürfniß des Organismus in heißen Gegenden zusammen. — Indem nun Mayer die Beziehungen, welche zwischen Einnahme und Ausgabe im Körper so gewissermaßen bestehen, weiter verfolgte, kam er dabei auch auf folgenden Umstand. Die Oxydation der assimilirten Speisen erzeugt also zunächst Wärme im Thierkörper, dann hat aber auch zweitens dieser die Fähigkeit, vermöge seiner Bewegungsorgane an den verschiedensten Stellen des Körpers auf mechanischem Wege durch Schlag, Reibung ꝛc. Wärme hervorzurufen. Es ist nun die Frage, kommt die so hervorgebrachte Wärme ebenfalls auf Rechnung des Verbrennungsprozesses, wie die direct im Innern des Körpers entwickelte Wärme, oder nicht. Mayer beantwortet diese Frage bejahend; es kommt nicht allein die direct entwickelte Wärme, sondern auch die auf indirectem Wege entwickelte auf Rechnung des Verbrennungsprozesses. Die Wärmemenge, welche bei der Verbrennung einer bestimmten Menge eines Stoffes entsteht, ist eine unveränderliche, nicht bedingt durch die Nebenumstände, welche die Verbrennung begleiten. Daraus folgt, daß auch durch den Lebensproceß die Wärmemenge, welche bei der Oxydation aufgenommener Nahrung entsteht, weder vermindert noch vermehrt werden kann, es müßte denn dem Organismus die Fähigkeit zugeschrieben werden, Wärme aus nichts zu erzeugen. Ist somit, so folgert Mayer hieraus mit vollem Recht weiter, die Summe der direct und der indirect entwickelten Wärmemengen gleich der Wärmemenge, die überhaupt bei der Oxydation der aufgenommenen Nahrung hervorgebracht werden kann, dann muß auch die auf indirectem Wege durch Reibung ꝛc. vom Organismus erzeugte Wärme in einem bestimmten Größenverhältniß zu der dabei aufgewendeten Arbeit stehen. Denn könnte bei Anwendung derselben Kraft und bei gleicher Stoffaufnahme die gewonnene Wärme bald größer, bald kleiner sein, so würde die Summe der direct und indirect entwickelten Wärme trotz eines gleichen Materialverbrauches keine constante sein und man geriethe durch eine derartige Annahme in Widerspruch mit obigem Fundamentalgesetz von der Verbrennung. Die Annahme einer unveränderlichen Größenbeziehung zwischen Wärme und Arbeit ist eine nothwendige Folge desselben.

Dies ist in der Kürze der Gedankengang, welcher Mayer zu seiner Entdeckung geführt hat; er ist insofern vom höchsten Interesse, als er erkennen läßt, von welcher großen Bedeutung das gefundene Gesetz auch für solche Gebiete der Naturwissenschaft ist, die der Physik ferner liegen.

Mayer begnügte sich nun aber nicht damit, durch Beobachtung in der organischen Welt glücklich die Thatsache einer unveränderlichen Größenbeziehung zwischen Wärme und Arbeit aufgefunden zu haben, sondern er bemühte sich, durch das Experiment dieselbe zu begründen und zu ermitteln, wie viel Arbeitskraft zur Hervorbringung eines bestimmten Maaßes von Wärme erforderlich ist, und umgekehrt. Arbeitskraft läßt sich messen durch Gewichtserhebung; es muß somit z. B. ausfindig gemacht werden, wie hoch ein bestimmtes Gewicht über den Erdboden erhoben werden muß, damit seine Fallkraft äquivalent sei der Erwärmung eines gleichen Gewichtes Wasser von 0^0 C auf 1^0 C; d. h. so, daß es beim Herabsinken auf mechanischem Wege durch Reibung, Compression ꝛc. soviel Wärme erzeugt, als nöthig ist, um einen gleichen Gewichtstheil Wasser von 0^0 bis auf 1^0 zu erwärmen. Diese Zahl, welche Mayer ungefähr auf 367 Meter berechnet, ist das mechanische Aequivalent der Wärme.

Die Berechnung des mechanischen Aequivalents der Wärme kann in zweierlei Weise geschehen, entweder durch Ermittelung der Arbeit, welche eine bestimmte Wärmemenge leistet, oder der Wärmemenge, welche bei der Vernichtung eines gewissen Arbeitsquantums zum Vorschein kommt. Bei der Dampfmaschine tritt uns die Verwandlung der Wärme in mechanische Arbeit am deutlichsten und großartigsten entgegen, aber es ist sehr schwierig, an ihr in der ersten Weise die Bestimmung des mechanischen Aequivalents der Wärme durchzuführen. Die Wärme, welche von den Dämpfen im Kessel der Maschine aufgenommen wird, ist bei einer Maschine, welche sich in Thätigkeit befindet, fortwährend größer, als die Wärmemenge, welche die Dämpfe nachher besitzen, wenn sie in den Condensator übergehen, oder (bei Hochdruckmaschinen) in die Luft. Die Differenz ist die nutzbar verwendete Wärme, der Theil der Gesammtwärme, welcher in mechanische Arbeit verwandelt worden ist. Der bei weitem größte Theil der durch das Brennmaterial erzeugten Wärme geht in der Form von Wärme unbenutzt für mechanische Zwecke verloren. Bei den besten Expansions-Dampfmaschinen werden nur 18 % der Gesammtwärme in mechanische Arbeit verwandelt; 100 Pfund Kohlen geben, indem sie unter dem Kessel verbrennen, wenn die Maschine arbeitet, nur ebenso viel Wärme an die Umgebung durch Strahlung, Leitung ab, als 82 Pfund beim Stillstehen der Maschine.

Aus den Versuchen von Gay-Lussac folgt, daß ein Gas, wenn es sich ohne Widerstand ausdehnt, keine Temperaturveränderung erfährt. Dagegen ist ebenfalls durch die Erfahrung bewiesen, daß ein Gas, welches bei seiner Ausdehnung einen bestimmten Druck zu überwinden hat, eine Temperaturerniedrigung erleidet. Nehmen wir z. B. an, ein Kubikzoll Luft von 0° und 76 Centimeter Quecksilberdruck werde bei constantem Volumen (in einem festen Gefäß von 1 Kubikzoll Inhalt, so daß sich die Luft nicht ausdehnen kann) durch die Wärmemenge x bis auf 274° erwärmt und dann mit einem gleichgroßen luftleeren Raum in Verbindung gesetzt, so wird sich die Luft um einen Kubikzoll ausdehnen, aber seine Temperatur von 274° beibehalten und in dem umgebenden Medium (z. B. wenn das Ueberströmen in einem Calorimeter geschah) wird man keine Aenderung der Temperatur wahrnehmen. Wird aber der Kubikzoll Luft nicht bei constantem Volumen, sondern unter constantem Druck, nämlich dem einer Quecksilbersäule von 76 Centimeter bis auf 274° erwärmt, so wird er diesmal eine größere Wärmemenge $x + y$ brauchen und zugleich, da der Ausdehnungscoëfficient der Luft bei diesem Druck $= 0,00366$ ist, sich ebenfalls auf das doppelte Volumen ausdehnen. In beiden Fällen ist also schließlich eine Verdoppelung des Volumens herbeigeführt worden und die Temperatur der Luft dieselbe; im ersten Falle aber die Wärmemenge x, im zweiten die Wärmemenge $x + y$ aufgenommen worden. Im ersten ist gar keine mechanische Arbeit bei der Ausdehnung der Luft geleistet worden, dagegen im zweiten sind 15 Pfund ungefähr auf 1 Zoll Höhe gehoben worden (so viel beträgt ungefähr das Gewicht einer Quecksilbersäule von 76 Centimeter Höhe und 1 Quadratzoll Querschnitt). Kühlt sich die Luft nun wieder ab, so giebt sie genau dieselbe Wärmemenge wieder zurück, die sie aufgenommen, wenn die Erkaltung unter denselben Umständen geschieht, wie die Erwärmung. Erkaltet daher nach dem zweiten Falle die Luft auch wieder unter dem fortwährenden Drucke einer Quecksilbersäule von 76 Centimeter von 274° auf 0°, so wird auch die Wärmemenge $x + y$ wieder abgegeben; hört dagegen der Druck auf, nachdem die Luft bis auf 274° erwärmt ist und sich auf das Doppelte ausgedehnt hat, so giebt sie bei der Abkühlung nur die Wärmemenge x ab.

Bei der Dampfmaschine findet ein gleicher Vorgang statt; der Dampf, während er unter dem

Stempel sich ausdehnt, verhält sich wie die Luft bei constantem Drucke, bei der Abkühlung des Dampfes fehlt der Druck des Stempels, der Dampf giebt daher eine geringere Wärmemenge ab, als er bei der Ausdehnung unter dem Kolben aufgenommen hatte. Mit jedem Kolbenlaufe ist also ein Wärmeverlust verbunden.[5]) Berechnet man nun aus dem verbrauchten Brennmaterial die Wärmemenge, welche durch Verbrennen desselben erzeugt wird, und zieht davon die Wärme ab, welche durch Strahlung, Leitung und Luftzug an die Umgebung unbenutzt abgegeben wird von der Maschine, so bleibt als Rest die Wärmemenge, welche der Leistung der Maschine entspricht. Daraus könnte man dann die Arbeit leicht bestimmen, welche auf die Wärmeeinheit kommt. Aber die Wärmemenge, welche unbenutzt verloren geht an die Umgebung, läßt sich nur schwer und annäherungsweise bestimmen und auf diesem Wege daher kein zuverlässiges Resultat erzielen. Leichter und genauer läßt sich das mechanische Aequivalent der Wärme aus der Differenz der Wärmecapacitäten der Luft bei constantem Druck und bei constantem Volumen berechnen. Nach den Versuchen von Regnault ist die Wärmecapacität der Luft bei constantem Druck $= 0,2377$, bei constantem Volumen $= 0,1686$, bezogen auf die Wärmecapacität des Wassers als Einheit. Das Verhältniß beider ist somit $= 1,41$. Nimmt man an, die Wärmemenge, welche nöthig ist, um 1 Kubikmeter Luft, welche in einem Gefäße eingeschlossen ist und sich also nicht ausdehnen kann, um 1 Grad zu erwärmen, sei gleich 1, so ist demnach die Wärmemenge, welche man braucht, um dieselbe Quantität Luft um 1 Grad zu erwärmen, während sie sich ausdehnen kann, gleich 1,410. Nach der schon oben erwähnten Entdeckung von Gay-Lussac ist nun zur Ausdehnung eines Gases an und für sich kein Wärmeaufwand nothwendig, eine Thatsache, die auch von Regnault bestätigt worden ist (indem er nämlich zwei Behälter von demselben Volumen, die in einem Calorimeter standen und von denen der eine Luft von 10 Atmosphären Druck enthielt, der andere luftleer war, mit einander plötzlich verband, bemerkte er im Calorimeter keine Temperaturveränderung). Wird ein Kubikmeter Luft von 0° und 76 Centimeter Druck um 1° C. erwärmt, ohne sich ausdehnen zu können, so sind dazu, da derselbe 1,293 Kilogrammeter wiegt, nach Obigem $1,293 \times 0,1686 = 0,218$ Wärmeeinheiten nöthig. Läßt man die Luft zum Theil in ein luftleeres Gefäß, dessen Inhalt gleich 0,00366 Kubikmeter ist, also der Ausdehnung bei 1° Wärmezunahme entspricht, entweichen, so bleibt ihre Temperatur gleich 1° und ihr Druck ist wie vorher $= 76$ Centimeter. Wird aber die Luft in 1 Kubikmeter erwärmt, während sie sich unter dem Luftdruck von 76 Centimeter ausdehnen kann, und stellt man sich vor, sie schiebe einen Kolben von einem Quadratmeter Fläche vor sich her, so wird dieser Kolben um 0,00366 Meter fortgeschoben, wenn die Luft um 1° Grad erwärmt wird. Da aber der Druck, welchen die Atmosphäre auf einen Quadratmeter ausübt, $= 10330$ Kilogramm ist, so ist die Arbeit $10330 \times 0,00366 = 37,8$ Kilogrammeter verrichtet worden. Um einen Kubikmeter Luft unter dem fortwährenden Druck der Atmosphäre um 1° Grad in der Temperatur zu steigern, sind aber $1,293 \times 0,2377 = 0,307$ Wärmeeinheiten nöthig.

Der Mehraufwand von Wärme in diesem zweiten Fall beträgt $0,307 - 0,218 = 0,089$ Wärmeeinheiten; der Zustand der Luft ist in beiden Fällen schließlich derselbe, im ersten Fall ist keine mechanische Arbeit geleistet worden, im zweiten die von 37,8 Kilogrammeter. Auf Rechnung dieser Arbeit kann nur der Mehraufwand von Wärme kommen. Danach ist die Arbeit, welche von

[5]) Cfr. Mayer: »Die org. Bew. 2c.« S. 13.

einer Wärmeeinheit geleistet wird, $= \frac{37,8}{0,089} = 424$ Kilogrammeter.[6]) — Verfährt man ebenso mit anderen Gasen, so erhält man fast dieselben Zahlen.

In dieser Weise berechnet auch Mayer das mechanische Aequivalent der Wärme, indem er aber dabei die specifische Wärme der Luft bei constantem Druck nach den weniger zuverlässigen Versuchen von Delaroche und Bérard $= 0,267$ und den Quotienten der specifischen Wärme der Luft bei constantem Druck und der bei constantem Volumen nach Dulong $= 1,421$ annimmt, erhält er für das mechanische Aequivalent der Wärme die Zahl 367.[7])

Nach der zweiten Methode bestimmen Colding und Joule das mechanische Aequivalent der Wärmeeinheit. Während die ältere Mechanik einfach annahm, daß bei der Reibung und beim Stoß lebendige Kraft verloren gehe, weist Colding ebenso wie Mayer und wie es scheint, unabhängig von ihm, nach, daß dies nicht der Fall sei, sondern die scheinbar verloren gegangene lebendige Kraft nur in anderer Form, als Wärme, uns entgegen trete und zu dieser daher in einer bestimmten Größenbeziehung stehen müsse; überhaupt sei die Summe der Kraft in der unorganischen Natur, wenn auch in den Formen wechselnd, doch ihrer Größe nach ebenso unveränderlich und ewig, wie die Materie. Um die bestimmte Größenbeziehung zwischen Wärme und Bewegung zu finden, läßt Colding einen schwer belasteten Schlitten, der unten mit Läufen von verschiedenen Metallen versehen war, auf zwei anderen Metallschienen gleiten. Die Reibung wurde dabei durch ein Federdynamometer gemessen, die entwickelte Wärme durch die Verlängerung, welche durch sie die Metallstangen erfuhren.

Obwohl diese Versuche keine große Genauigkeit zuließen, so ging doch daraus hervor, daß bei den verschiedensten Stoffen und noch so verschiedenem Druck und verschiedener Geschwindigkeit die entwickelte Wärme stets der verloren gegangenen lebendigen Kraft direct proportional war.

Das mechanische Wärmeäquivalent berechnete er aus diesen Versuchen auf 372 Kilogrammeter.

Der berühmte englische Physiker James Prescott Joule begann ebenfalls im Jahre 1843 eine Reihe von Versuchen zur Ermittelung des mechanischen Aequivalents der Wärme, die zuletzt mit solchem Erfolg gekrönt waren, daß man die gefundenen Resultate als nur sehr wenig von der Wahrheit abweichend betrachten kann.

In den ersten Versuchsreihen vom Jahre 1843 zeigte er, daß die durch Magneto-Electricität entwickelte Wärme proportional ist der aufgewendeten Kraft. Jeder electrische Strom, ein inducirter sowohl, wie ein directer, erzeugt in dem Draht, den er durchläuft, Wärme. Joule benutzte die inducirten Ströme, welche in einer Kupferspirale, die einen Cylinder von weichem Eisen umgab, dadurch hervorgerufen wurden, daß dieser mittelst einer Kurbel um eine vertikale Axe, an der er horizontal befestigt war, so in Rotation gesetzt wurde, daß er sich zwischen den Polen eines gegenüber aufgestellten festen Magneten hindurch bewegte. Der Eisencylinder mit der Spirale befand sich noch in einem Glasrohre, das hermetisch verschlossen und mit einer bestimmten Wassermenge angefüllt war. Aus den Temperaturveränderungen dieser Wassermenge ließen sich die Wärmemengen berechnen, die in der Spirale entwickelt wurden. Die aufgewendete mechanische Kraft wurde durch

---

[6]) Cfr. Eisenlohr: Lehrbuch der Physik. 1860.

[7]) Mayer bestimmt auch noch in der zweiten Weise durch Ermittelung der Wärme, welche bei Aufwendung lebendiger Kraft oder Arbeit erzeugt wird, das mechanische Aequivalent der Wärme; die betreffende Abhandlung stand mir aber nicht zu Gebote.

Gewichte gemessen, welche durch ihr Herabsinken mittelst Schnüre und Rollen die Kurbel in Bewegung setzten. Das dabei erhaltene Resultat konnte aber wegen des sehr complicirten Vorganges, da die aufgewendete Kraft erst durch das Medium der Electricität Wärme hervorbringt, kein sehr genaues sein; Beobachtungsfehler waren nicht leicht dabei zu vermeiden. Das mechanische Aequivalent der Wärme fand er auf diesem Wege gleich 838 in englischen Maaßen ausgedrückt, d. h. die Wärmemenge, welche nöthig ist, um die Temperatur von 1 Pfund Wasser um 1° Fahrenheit zu erhöhen, ist gleich einer mechanischen Kraft, die 838 englische Pfund auf 1 Fuß Höhe zu heben vermag.

Im Jahre 1844 versuchte er darauf durch eine andere Methode zum Ziele zu gelangen, indem er einerseits die Wärme, welche bei der Compression der Luft entwickelt wird, mit der aufgewendeten Arbeit verglich, andererseits die gewonnene Arbeit mit dem Wärmeverlust, welcher sich zeigte, wenn er comprimirte Luft unter dem Druck der Atmosphäre bis zu gleicher Dichtigkeit mit dieser sich wieder ausdehnen ließ. Die aus diesen Versuchen abgeleitete quantitative Beziehung zwischen Kraft und Wärme weicht nicht zu sehr von dem oben genannten Werthe ab.

Eine Angabe von Mayer (in den Annalen der Chemie von Wöhler und Liebig, Mai 1842), wonach es ihm gelungen sei, Wasser durch Schütteln von 12° C. bis 13° C. zu erwärmen, veranlaßte darauf Joule, nach dieser Seite hin eine neue Reihe von Versuchen anzufangen. Die Wärmeentwickelung bei der Reibung fester Körper war lange bekannt; für die Entstehung von Wärme bei Flüssigkeiten auf diesem Wege sprachen jedoch bis dahin nur ganz vereinzelte Thatsachen, ja von vielen Physikern wurde die Möglichkeit derselben gradezu geleugnet.

Bei den ersten Versuchen, welche Joule hierüber anstellte, ließ er Wasser durch enge Röhren hindurch gehen, indem er einen Stempel, welcher eine Anzahl von kleinen Löchern enthielt, in einem cylinderförmigen Gefäß, welches mit Wasser gefüllt war, in Bewegung setzte. Der Versuch bestätigte zunächst, daß Wärme entwickelt wird, wenn Flüssigkeiten sich an festen Körpern reiben und ergab sodann, indem die aufgewendete Kraft mit der freigewordenen Wärmemenge verglichen wurde, ein Wärmeäquivalent von 770 Fußpfunden.

In den Jahren 1845 und 1847 setzte Joule diese Versuche in etwas anderer Weise fort, indem er ein Schaufelrad sich in Wasser, Wallrathöl und Quecksilber bewegen ließ. Er fand dabei für das mechanische Aequivalent der Wärme die Zahlen 781,5, 782,1 und 787,6. Aber noch nicht zufrieden mit der überraschenden Uebereinstimmung, welche diese Zahlen zeigen, suchte Joule in einer neuen Reihe von Versuchen vom Jahre 1850 zu noch genaueren Resultaten zu gelangen und den wahren Werth des mechanischen Aequivalents der Wärme aufzufinden. Er benutzte dazu wieder die Wärmeentwickelung durch Reibung und zwar von Wasser, Quecksilber und Gußeisen.

Diese Versuche wollen wir, da sie die genauesten sind, die bis jetzt über diesen Gegenstand angestellt wurden, etwas sorgfältiger betrachten und zeigen, in welcher Weise das mechanische Aequivalent der Wärme daraus berechnet werden kann.

Der Apparat, welcher für die Reibung des Wassers bestimmt war, bestand aus einem Kupfergefäß, welches mit Wasser gefüllt war und in welchem sich ein messingenes Schaufelrad mit 8 Flügeln drehte; diese Flügel schlugen bei der Rotation des Rades durch passende Ausschnitte von 4 radialen Scheidewänden hindurch, die im Innern des Gefäßes angebracht waren, so daß auf diese Weise eine heftige rotirende und an den Scheidewänden immer wieder gebrochene Bewegung des Wassers herbeigeführt werden konnte. Die Messingaxe des Rades war außerhalb des Gefäßes an einer Stelle unterbrochen durch ein Stück Buchsbaumholz, um die Fortleitung der Wärme in dieser Richtung zu verhindern.

Um das Wasser vor der Einwirkung der umgebenden Luft zu bewahren, war das Gefäß durch einen genau schließenden Deckel verschlossen, der mit 2 Tubulaturen für die Axe des Rades und des Thermometers versehen war. Der Apparat für die Reibung des Quecksilbers war von dem vorigen nicht wesentlich verschieden, nur bestand das Schaufelrad aus Schmiedeeisen, das Gefäß selbst aus Gußeisen, und die Anzahl der Flügel war eine andere.

Für die Reibung des Gußeisens war das Rad durch eine Scheibe von Gußeisen mit schräg abgedrehtem Rande ersetzt, welche sich an einer zweiten schräg abgedrehten festen gußeisernen Scheibe rieb, die man mehr oder weniger gegen die erstere mittelst eines Hebels drücken konnte. Beide Scheiben waren in Quecksilber getaucht, dessen Temperaturveränderungen beobachtet wurden.

Die Vorrichtung, durch welche diese Apparate in Bewegung gesetzt wurden, bestand zunächst aus einer Walze, die an der Rotationsaxe durch einen Stift befestigt werden konnte, so daß sie gewissermaßen eine Verlängerung derselben bildete. 2 dünne Schnüre rollten sich mit einem Ende auf die Walze auf und mit dem andern auf die Räder zweier kleinen Wellen, deren Stahlaxen auf messingenen Frictionsrädern ruhten, um die Reibung so gering wie möglich zu machen. Auf den Wellen rollten sich Schnüre auf, an welchen Bleigewichte hingen, welche beim Herabfallen die Wellen und damit den ganzen Apparat in Bewegung setzten.

Der Frictionsapparat stand auf einem hölzernen Stuhle, welcher eine Anzahl von Schlitzen hatte, die so ausgeschnitten waren, daß das Holz nur in wenigen Punkten mit dem metallenen Gefäß in Berührung war, dagegen die Luft fast überall freien Zutritt hatte; so wurde die Fortleitung der Wärme durch den Stuhl vermieden. Ein Feuerschirm trennte den Beobachter von dem Gefäß, so daß die von ihm durch Strahlung ausgehende Wärme nicht auf dasselbe einwirken konnte.

Die Methode des Experimentirens war folgende:

Nachdem die Temperatur des Frictionsapparates ermittelt und die Gewichte aufgewunden waren, wurde die Walze auf der Axe befestigt. Die Höhe der Gewichte über dem Fußboden wurde mittelst zweier Holzscalen genau bestimmt, die Walze in Freiheit gesetzt und rotiren gelassen, bis die Gewichte den gepflasterten Boden des Laboratoriums erreicht hatten. Darauf wand man die Gewichte von Neuem auf und ließ sie wieder herabrollen. Nachdem dies 20 mal wiederholt worden war, wurde der Versuch mit einer abermaligen Beobachtung der Temperatur des Apparates geschlossen, die mittlere Temperatur des Laboratoriums wurde durch Beobachtungen zu Anfang, in der Mitte und am Ende jedes Versuches bestimmt. Vor oder nach jedem Versuche machte Joule eine Bestimmung der Wirkung der Wärmestrahlung und Wärmeleitung zu, oder von der Luft auf die Erniedrigung oder Erhöhung der Temperatur des Frictionsapparats. Diese Bestimmung dauerte so lange wie der Hauptversuch und geschah unter denselben Umständen, nur war der Apparat in Ruhe.

5 Reihen von Versuchen hat Joule mit diesen Apparaten angestellt.

Die erste besteht aus 40 Versuchen mit Wasser,
die zweite aus 20 mit Quecksilber,
die dritte aus 30 Versuchen mit Quecksilber,
aber leichteren Gewichten.

Die vierte aus 10 Versuchen mit Gußeisen,
die fünfte aus 20 Versuchen mit Gußeisen,
aber leichteren Gewichten.

Die erste Versuchsreihe, als die wichtigste, wollen wir etwas genauer ins Auge fassen und kurz daran zeigen, in welcher Art und Weise aus den Beobachtungen das mechanische Aequivalent der Wärme berechnet wurde. Vorher sei aber noch in der Kürze auf die leitenden Gedanken aufmerksam gemacht, welche den Experimenten zu Grunde lagen.

Die Kraft, welche zum Aufwinden des Gewichtes verwendet wird, ist gleich der Wirkung, d. h. gleich dem Product aus dem Gewicht in den Weg, durch welchen es gehoben worden ist. Das gehobene Gewicht kann nun aber wieder als Kraft dienen; indem es wieder herabsinkt, setzt es die Walze durch Abwickelung der Schnur in Rotation, die Rotation wird aber durch den Widerstand, welchen das Wasser der Bewegung des Schaufelrades entgegensetzt, verlangsamt und damit auch die Bewegung des herabfallenden Gewichtes. Diese Verzögerung wird um so größer sein, je größer die Reibung zwischen dem Schaufelrad und Wasser ist, die Reibung erzeugt aber Wärme; diese erzeugte Wärmemenge wird der Ersatz für die verloren gegangene lebendige Kraft sein. Ist daher v die Geschwindigkeit, welche das Gewicht beim freien ungehinderten Fall erlangt hätte, so würde es, seine Masse gleich m gesetzt, beim Aufschlagen auf den Fußboden (die Fallhöhe in den Versuchen betrug ungefähr 63 Zoll) die lebendige Kraft $= m\,v^2$ besitzen. Bei obigen Versuchen aber bewegte sich das Gewicht mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit von wenigen Zollen bis zum Fußboden hinunter. Bezeichnen wir dieselbe mit w, so war die lebendige Kraft des Gewichtes am Ende des Falles gleich $m\,w^2$. Die Differenz $m\,v^2 - m\,w^2$, der Verlust an lebendiger Kraft, entspricht also der im Reibungsapparat erzeugten Wärmemenge. Da nun aber, wie früher gezeigt worden ist, die Masse eines Körpers, wenn p sein absolutes Gewicht ist, $m = \frac{p}{2\,g}$ ist, so folgt daraus, daß die entwickelte Wärme äquivalent ist dem in folgendem Ausdruck ausgesprochenen mechanischen Effecte: $\frac{p}{2\,g}.\ v^2 - \frac{p}{2\,g}.\ w^2$. Nach den Fallgesetzen ist $\frac{v^2}{2\,g}$ gleich dem Wege, den der Körper beim Fall zurücklegen muß, um die Geschwindigkeit v zu erlangen. Danach verwandelt sich obiger Ausdruck in folgenden $p\,(S - s)$, wenn S und s die den Geschwindigkeiten v und w entsprechenden Fallhöhen bezeichnen. Bei allen Versuchen der oben genannten Versuchsreihen wird daher von der gesammten Fallhöhe die aus der Geschwindigkeit des fallenden Gewichtes berechnete abgezogen. Die Gewichte wurden, um die Temperatur des Wassers oder Quecksilbers im Frictionsapparat merklich zu erhöhen, bei jedem Versuch, wie oben erwähnt, 20 mal aufgewunden und heruntergelassen; es ist selbstverständlich, daß dadurch im Wesentlichen nichts an der Berechnung geändert wird. Im Ganzen wurde dann zur Aufwindung der Gewichte eine Kraft $= 20\,p\,S$ verwendet, davon wird bei jedem Herunterrollen ein Theil $= p\,s$ nicht in Wärme verwandelt, also im Ganzen $20\,p\,s$; die in Wärme verwandelte Arbeit ist also dann $= 20\,p\,S - 20\,p\,s$, oder $p\,(20\,S - 20\,s)$.

Die beiden Bleigewichte wogen 203066 Gran und 203086 Gran; die Geschwindigkeit, mit welcher die Gewichte herabsanken, betrug 2,42 Zoll pro Sekunde.

Der mittlere Werth der Fallhöhe betrug bei den 40 Versuchen 1260,248 Zoll (die Gewichte wurden 20 mal bei jedem Versuch zu einer Höhe von ungefähr 63 Zoll emporgewunden), die unmittelbar beobachtete Erhöhung der Temperatur im Apparat belief sich auf $0,^0 575250$ **F**. An diesem Werthe waren noch Correctionen anzubringen, die sich zunächst auf den Einfluß der Wärmestrahlung vom Apparat zur Luft, oder umgekehrt bezogen, je nachdem die Temperatur des Apparates höher als die der umgebenden Luft, oder umgekehrt die der Luft höher als die des Apparates war. Diese Correctionen, mit der größten Sorgfalt ermittelt, ergaben, daß der wahre Temperaturzuwachs vermöge der Reibung des Wassers nur $0,^0 563209$ **F**. betrug. Um nun die absolute Menge der entwickelten Wärme zu ermitteln, war es nöthig, die Wärmecapacität des Kupfergefäßes und des messingenen Schaufelrades zu bestimmen. Das Kupfergefäß sowohl, wie das Schaufelrad haben vor Beginn der Reibung dieselbe Temperatur, wie das Wasser; durch die Reibung des Wassers erhöht sich ihre Temperatur ebenfalls um $0,^0 563209$. Ihr Vermögen Wärme zu binden, ist aber geringer als das des Wassers, sie bedürfen einer geringeren Wärmemenge, damit ihre Temperatur um gleichviel steigt, wie die einer gleich großen Gewichtsmenge Wasser. Um daher zu wissen, wie groß die Wassermenge ist, deren Temperatur durch die bei diesem Versuch aufgewendete mechanische Kraft um 1^0 **F** gesteigert werden würde, ist es nöthig, für das Kupfergefäß und das Schaufelrad die Gewichtsmengen Wasser zu finden, die derselben Wärmemenge bedürfen, damit ihre Temperatur um $0,^0 563209$ **F** sich erhöht. Das Kupfergefäß wog 25541 Gran; diese sind in Bezug auf die Fähigkeit, Wärme zu binden, $=$ 2430, 2 Gran Wasser (die Wärmecapacität des Kupfers $=$ 0,09515). Für das messingene Schaufelrad, welches aus 3933 Gran Zink und 14968 Gran Kupfer bestand, ergab sich mit Benutzung des Regnault'schen Gesetzes, daß die Wärmecapacität von Metallegirungen gleich ist der Summe der Capacitäten ihrer Bestandtheile, die Gewichtsmenge von 1800 Gran Wasser (Wärmecapacität des Zink $=$ 0, 09555). Die Capacität des kupfernen Stöpsels, der in die Oeffnung gesteckt wurde, durch welche man das Thermometer eintauchte, war gleich der von 10, 3 Gran Wasser. Das Wasser selbst, welches sich im Gefäße befand, wog 93229, 7 Gran. Danach ist also die gesammte Wassermenge, deren Temperatur um $0,^0 563209$ erhöht wurde, folgende:

Wasser	93229, 7	Gran,
Kupfer, als Wasser . . .	2440, 5	"
Messing, als Wasser . . .	1800,	"
Summa	97470, 2	Gran.

Die gesammte Menge der entwickelten Wärme war also $0^0, 563029$ **F** in 97470, 2 Gran Wasser, oder auf 1^0 **F** berechnet 1^0 **F** in 7, 842299 Pfund Wasser. Um nun die zur Erzeugung dieser Wärme aufgewandte Kraft genau zu ermitteln, war es auch nöthig, den Einfluß der Reibung an den Rollen und der Steifigkeit der Schnur zu kennen, indem dadurch ein Theil der aufgewandten Kraft verbraucht wird und für die Wärmeentwickelung im Rotationsapparat verloren geht. Die Gewichte wogen zusammen 406152 Gran; wegen der eben erwähnten Hemmnisse bei der Bewegung der Gewichte betrug der wirklich aufgewandte Druck aber nur 403315 Gran, wie durch sorgfältige Versuche ermittelt wurde.

Die Geschwindigkeit, mit welcher die Bleigewichte herabsanken, nämlich 2, 42 Zoll in der Sekunde, ist nach den Fallgesetzen ($s = \frac{v^2}{2\,g}$) einer Fallhöhe von 0,0076 Zoll äquivalent. Multiplicirt mit 20 giebt dies 0, 152 Zoll. Dies wird nach der obigen Erläuterung, wonach die in Wärme verwandelte Arbeit = p (20 S — 20 s) ist, von 1260,248 Zoll abgezogen, so daß 1260, 096 Zoll als berichtigte Höhe bleiben. Das Product 1260, 096 Zoll. 403315 Gran, welches so erhalten wird, ist der Ausdruck für eine Kraft, welche einen Widerstand von 403315 Gran durch einen Weg von 1260, 096 Zoll überwinden kann. Auf Fußpfunde reducirt ist diese Kraft äquivalent 6050,186 Fußpfunden. Dies ist aber noch nicht die genaue und richtige Größe der Kraft, welche zur Entwickelung der Wärme verwandt wird; es war auch noch der Einfluß, welchen die Elasticität der Schnur beim Aufschlagen der Gewichte auf den Boden auf die Drehung des Schaufelrades äußerte, zu berücksichtigen. Die sorgfältige Ermittelung desselben zeigte, daß er einer Kraft von 0, 8464 Fußpfund äquivalent war, also während eines ganzen Versuches, bei welchem die Gewichte 20 mal aufschlugen, = 20 × 0, 8464 = 16, 928 Fußpfund. Dies ist zu obiger Zahl von 6050, 186 Fußpfunden hinzuzufügen, so daß 6067, 114 Fußpfunde die Kraft bezeichnen, welche die oben angegebene Wärmemenge entwickelte, nämlich die Wärme von 1° F in 7,842299 Pfund Wasser, folglich werden $\frac{6067,114}{7,842299}$ oder 773, 64 Fußpfunde die Kraft sein, welche äquivalent ist einer **Wärmeeinheit**, d. h. welche aufgewendet werden muß, um die Temperatur eines Pfundes Wasser um 1° F zu erhöhen. Dieser so gefundene Werth des mechanischen Aequivalents der Wärmeeinheit ist noch einer Correction fähig; durch den Widerstand der Luft beim Fall der Gewichte geht ein Theil der Kraft für die Wärmeentwickelung im Apparat verloren. Im luftleeren Raume beträgt das Aequivalent **772, 692** Fußpfunde.

Aus der 2. und 3. Versuchsreihe mit Quecksilber ergab sich im Mittel für das Aequivalent, sogleich berechnet für den luftleeren Raum, **774,083**; aus der 4. und 5. Versuchsreihe mit Gußeisen **774,987**.

Von diesen 3 Werthen hält Joule den ersten für den genauesten wegen der größeren Anzahl der Versuche und wegen der größeren Wärmecapacität des Apparates in der ersten Versuchsreihe, aber immer noch für etwas zu groß, weil bei der Reibung des Wassers die Bildung eines schwachen Tones nicht zu vermeiden war; dadurch geht aber ein Theil der Kraft, wenn auch nur ein sehr geringer, für die Wärmeentwickelung verloren. Joule bezeichnet daher 772 Fußpfund als das Aequivalent der Wärmeeinheit von 1° F, dies entspricht in französischen Maaßen 423, 542 Kilogrammmetern, bezogen auf die hunderttheilige Skala. Dieser Werth stimmt fast ganz genau mit dem oben aus den Wärmecapacitäten der Luft abgeleiteten überein.

Fast um dieselbe Zeit hat der berühmte Petersburger Physiker Kupffer eine Ermittelung des mechanischen Aequivalents der Wärme auf ganz anderem Wege versucht.[8] Aus seinen Untersuchungen über den Elasticitätscoëfficienten verschiedener Metalle leitet er folgendes Gesetz ab: „Wenn ein Stück Metall durch eine auf alle Theile seiner Oberfläche gleichmäßig einwirkende Zugkraft nach allen Richtungen gleichmäßig ausgedehnt wird, so ist die Größe der auf die Flächeneinheit der Oberfläche wirkenden Kraft, multiplicirt mit dem Volumen des Metallstückes, gleich dem mechanischen Aequivalent der Wärme, welche nöthig wäre, um dieselbe Ausdehnung hervorzubringen." Verschiedene auf Grund dieses Gesetzes angestellte Versuche ergaben z. B. für das mechanische

[8]) Vergl. Fortschr. der Physik. 1852.

Aequivalent der Wärme die Werthe 446, 414 u. 442 Kilogrammeter. Sie zeigen eine annähernde Uebereinstimmung mit dem von Joule gefundenen.

In Folge eines Preisausschreibens der physikalischen Gesellschaft zu Berlin im Jahre 1855 [9]) in Betreff der Auffindung des mechanischen Aequivalents der Wärme stellte der Physiker G. A. Hirn (in Logelbach bei Colmar) 4 Versuchsreihen an, die Aufgabe zu lösen. Dieselben bezogen sich auf Wärmeerzeugung durch Reibung, auf Wärmeerzeugung bei der Trennung der Körpertheile, auf den Wärmeverbrauch in Dampfmaschinen und den im menschlichen Körper. Die erste Versuchsreihe ergab im Mittel für das mechanische Aequivalent der Wärme 371,6 Kilogrammeter, die zweite 425 Kilogrammeter. In der dritten wurde bestimmt, wie viel Wärme dem Dampf mitgetheilt werden mußte, um ihn in den Zustand zu bringen, in welchem er in den Cylinder trat und wie viel Wärme der Dampf nach dem Austritt aus dem Cylinder im Condensator wieder abgab und die gefundene Differenz wurde mit der gethanen Arbeit verglichen. Daraus ergab sich im Mittel der Werth von 413 Kilogrammeter. Dieses Resultat zeigt eine hinreichende Uebereinstimmung mit dem von Joule aufgestellten Werthe, zumal wenn man die zahlreichen Schwierigkeiten bedenkt, die bei diesen Versuchen zu überwinden waren. Die vierte Versuchsreihe lieferte ein von allen bisher genannten Werthen bedeutend abweichendes Resultat; dies erklärt sich aus den noch viel größeren Schwierigkeiten dieser Versuche und den zahlreichen Nebenumständen, die hier genau zu beachten sind.

Von allen bis jetzt gefundenen Werthen für das mechanische Aequivalent der Wärme ist wohl das aus Joule's Versuchen sich ergebende Resultat als dasjenige anzusehen, welches dem wahren Ausdruck der Aequivalenz von Wärme und Arbeit am nächsten kommt, wenn nicht ihn erreicht. Wenn vielleicht auch spätere, noch zahlreichere und umfassendere Versuche für das mechanische Aequivalent einen von dem von Joule gefundenen etwas abweichenden Werth ergeben sollten, so folgt das mindestens aus den angeführten Versuchen mit Gewißheit, daß wirklich eine Aequivalenz von Wärme und Arbeit vorhanden ist. Als weitere interessante Bestätigung wäre noch das von Dulong aufgefundene Gesetz anzuführen, daß die Wärmemenge, welche man durch das Zusammendrücken von Gasen erhält, allein von dem Kraftverbrauche, nicht von der chemischen Beschaffenheit, der Spannung und Temperatur derselben abhängt.

Der Zusammenhang, welcher somit zwischen Wärme und Bewegung nachgewiesen worden ist, bezieht sich zunächst nur auf die Quantität; es folgt daraus, daß eine bestimmte Arbeitsgröße sich in eine bestimmte Wärmemenge verwandeln läßt und umgekehrt, noch nicht mit unumstößlicher Gewißheit, daß nun auch die Wärme an sich nichts weiter sei als Bewegung; wenn auch die Vermuthung nahe liegt. Das aber geht klar aus dem gefundenen Gesetz hervor, daß die Wärme kein Stoff sein kann; Bewegung als eine Kraftform kann sich nicht in einen Stoff verwandeln. Mayer, nur am Thatsächlichen festhaltend, warnt vor übereilten Schlußfolgerungen und unsichern Hypothesen und spricht sich an manchen Orten ziemlich schroff dagegen aus, z. B. in seiner Schrift: „Organ-Bewegung 2c." S. 10, Anmerkg. in den Worten: „Die echte Wissenschaft begnügt sich mit positiver Erkenntniß und überläßt es willig dem Poeten und Naturphilosophen, die Auflösung ewiger Räthsel mit Hülfe der Phantasie zu versuchen."

Allerdings müßte, um zur Klarheit über das Wesen der Wärme zu kommen, zunächst die Atomenfrage vollständig gelöst sein; diese ist aber nach Mayer gradezu ein Problem, welches

[9]) Vergl. Fortschritte der Physik im Jahre 1855. II. Abthlg.

außerhalb der Grenzen der menschlichen Erkenntniß liegt. Nur wahrscheinlich ist es nach den Gesetzen der Isomorphie, daß es in chemischer Beziehung Atome giebt, d. h. daß die Körper zuletzt aus solchen Bestandtheilen zusammengesetzt sind, die bei chemischen Prozessen an sich keine Formveränderung mehr erfahren. Ob diese chemischen Atome aber auch solche sind in Bezug auf die Wärme, d. h. ob sie auch durch diese keine Veränderung erleiden und für sie undurchdringlich sind, das ist eine Frage, die noch der Entscheidung harrt und von deren Lösung, wenn sie überhaupt möglich ist, die Wissenschaft bis jetzt noch weit entfernt ist.

Gleichwohl sind in neuerer Zeit, da nun einmal der menschliche Geist einen unwiderstehlichen Drang in sich fühlt, nach den höheren Ursachen und einem einheitlichen Erklärungsgrunde der mannichfaltigen Erscheinungen zu forschen, in Folge der Auffindung der Aequivalenz von Wärme und Bewegung, sowie der Entdeckungen auf dem Gebiete der strahlenden Wärme mehrfache umfassende Versuche gemacht worden, sämmtliche Wärmeerscheinungen gradezu als Bewegungserscheinungen aufzufassen und sie mit den Bewegungen des Lichtäthers in Zusammenhang zu bringen. Das Gemeinsame aller dieser Theorien besteht darin, daß sie die Körper aus Atomen zusammengesetzt annehmen; diese selbst aber wieder aus verschiedenen Theilen bestehend, zwischen denen gewisse Bewegungen vorhanden sind; diese sind der Grund der Wärmeerscheinungen. Die Summe der in den Atomen enthaltenen lebendigen Kraft ist gleich der Wärmemenge, die ein Körper besitzt. Wegen der ungelösten Atomenfrage ist aber der Willkür, wie die Atome im Innern constituirt zu denken sind, noch ein weiter Spielraum gelassen und die einzelnen Hypothesen weichen daher auch in Bezug auf die Zusammensetzung der Atome und die Art und Beschaffenheit der in ihnen vorhandenen Bewegungen wesentlich von einander ab.

Kommt es uns indeß vorläufig nur darauf an, im Großen und Ganzen uns, abgesehen von der besonderen Construction der Atome, eine Vorstellung vom Wesen der Wärme auf Grund der Annahme, daß sie nichts weiter sei als Bewegung, zu bilden, so können wir nach Clausius [10]) die Wärmeerscheinungen folgendermaaßen erklären: „**Alle Körper der Natur, auch wenn sie vollkommen in Ruhe zu sein scheinen, befinden sich doch in der lebhaftesten inneren Bewegung, und diese Bewegungen der Körper theilen sich auch dem umgebenden Aether mit, so daß der ganze Weltenraum fortwährend in den verschiedensten Richtungen von wellenförmigen Schwingungen durchzogen wird, und den Inbegriff aller dieser Bewegungen nennen wir Wärme.**“

[10]) Vergl. Clausius' academ. Vorträge III. über das Wesen der Wärme.