Encyklopaedie der Naturwissenschaften

Wärme

Winkelmann, Adolph August

1896

Das mechanische Wärmeäquivalent

urn:nbn:at:at-ubi:2-7843

des Moleküls ganz ohne Einfluss ist. Dazu kommt aber noch ein schwer wiegender Umstand. Nach der obigen Formel wächst die Molekularwärme stetig mit wachsender Temperatur, und der kleinste Werth, den die Molekularwärme bei constantem Druck überhaupt annehmen kann, ist 6·5. Beim Quecksilberdampf wird aber die Molekularwärme bei constantem Druck in Temperaturen über 0° gleich $200 \times 0{\cdot}0245 = 4{\cdot}9$. Dieser Werth ist zu klein gegenüber der obigen Beziehung; wenn man daher nicht annehmen will, dass die specifische Wärme des Quecksilberdampfes entgegen dem Verhalten aller anderen Gase und Dämpfe mit wachsender Temperatur abnimmt, so lässt sich das experimentell gesicherte Resultat über den Quecksilberdampf mit der obigen Beziehung nicht vereinigen.

A. Winkelmann.

Das mechanische Wärmeäquivalent.

I. Definition und erste Messungen.

Dass beim Abdrehen und Bohren von Metallen eine erhebliche Steigerung der Temperatur sowohl des Werkzeugs, wie des abgedrehten oder gebohrten Körpers, wie auch der Spähne entsteht, war eine Beobachtung, die wohl schon seit sehr langer Zeit gemacht war und die als allgemein bekannt anzusehen ist. Man erklärte sich diese Erscheinung, in der Meinung, dass die Wärme an sich nicht erzeugbar wie nicht zerstörbar sei, dadurch, dass man annahm, bei dieser Bearbeitung werde die specifische Wärme des Materials und der Spähne vermindert, wodurch natürlich eine Temperaturerhöhung hervorgebracht werden müsse. Wie gross aber die dabei entstehende Temperaturerhöhung sein könne und wie wenig die Annahme einer Veränderung der specifischen Wärme zur Erklärung genüge, zeigte zuerst Graf Rumford[1]). Beim Bohren von Kanonen in München fand er, dass die grosse Wärmemenge, welche dabei auftrat, nicht einem Wechsel in der specifischen Wärme zugeschrieben werden könne, und sprach es zuerst scharf aus, dass es die Bewegung des Bohrers (die Arbeit, die dieser leiste) wäre, welche in Wärme sich verwandelt. Aus den quantitativen Messungen, die Rumford anstellte, lässt sich auch ein ziemlich roher Werth für die Zahl der Arbeitseinheiten berechnen, welche eine Wärmeeinheit (Calorie) hervorbringen. Man bezeichnet diejenige Zahl von Arbeitseinheiten (Kilogrammetern, Fusspfunden, Ergs) welche 1 Calorie erzeugen, als das mechanische Wärmeäquivalent. Nun giebt Rumford bei dem dritten Versuch, bei dem er in das Bohrloch Wasser gebracht und dessen Erwärmung gemessen hatte, an, dass die Gesammtmenge eiskalten Wassers, welche im Laufe von 2 Stunden und 30 Minuten auf 180° F. erwärmt werden konnte, 26·58 engl. Pfund betrage. Er giebt zugleich an, dass die Maschine, welche den Bohrer bewegt habe, leicht durch ein Pferd getrieben werden könne, obwohl dabei zwei Pferde angewandt waren.

Da nun eine Pferdekraft 75 Kilogrammmeter per Secunde leistet, so ist die in diesem Versuche aufgewendete Arbeit

$$75 \times 150 \times 60 = 675000 \text{ Kilogrammeter.}$$

Diese Arbeit erwärmte 26·58 Pfund engl. = 12·066 Kilo um 100° C., erzeugte also 1206·6 Calorien, so dass das mechanische Wärmeäquivalent sich daraus berechnet zu

[1]) Rumford, Phil. Trans. 1798, pag. 286.

$$J = \frac{675000}{1206{\cdot}6} = 559{\cdot}4 \text{ Kilogrammeter,}$$

eine Zahl, die zwar viel grösser ist, als sie sein soll, aber doch der Ordnung nach richtig ist.

Der Versuch der Wärmeerzeugung durch Reibung wurde bald darauf im kleinen, aber noch schlagender von DAVY[1]) angestellt, der zwei Stücke Eis unter der Luftpumpe an einander rieb, bei der der Recipient ebenfalls unter dem Gefrierpunkt war. Das Eis schmolz, und die dazu nothwendige Wärme war durch die Reibung entwickelt worden. Da Wasser eine grössere specifische Wärme wie Eis hat, so konnte die Erklärung auf Grund der Veränderung der specifischen Wärme hier nicht einmal versucht werden.

Diese Versuche waren es hauptsächlich, welche dem Gedanken von der Identität von Wärme und Arbeit, oder weniger exact der Auffassung der Wärmeerscheinungen als Bewegungserscheinungen immer weitere Kreise erschlossen. Die exacte Formulirung dieses Gedankens wurde zuerst gegeben von ROBERT MAYER[2]). Die Hauptfolgerung dieses Gedankens ist offenbar die, dass, auf welche Weise auch immer mechanische Arbeit in Wärme verwandelt wird, die Menge der erzeugten Wärme für jede verbrauchte Arbeitsmenge oder die Zahl der verbrauchten Kilogrammeter für jede erzeugte Calorie stets dieselbe sein müsse, also unabhängig von der Art und Weise der Verwandlung sein müsse.

ROBERT MAYER gab auch sofort einen Weg an — und zwar den einzigen — auf dem es möglich war, das mechanische Wärmeäquivalent aus den vorhandenen experimentellen Daten, ohne neue Versuche zu ermitteln[3]). Seine Ableitung ist folgende: »Ist die Wärme, welche ein Gas aufnimmt, das bei constantem Volumen um t° erwärmt wird $= x$, diejenige, die das Gas zu derselben Temperaturerhöhung bei constantem Druck bedarf, $= x + y$, ist ferner das in letzterem Fall gehobene Gewicht $= P$, seine Höhe $= h$, so ist

$$y = Ph.$$

Ein cm^3 Luft wiegt bei 0° und 0·76 *m* Druck 0·0013 *gr*; bei constantem Druck dehnt sich die Luft um $\frac{1}{274}$ ihres Volumens pro Grad aus, hebt somit eine Quecksilbersäule von 1 cm^2 Grundfläche und 76 *cm* Höhe um $\frac{1}{274}$ *cm*. Das Gewicht dieser Säule beträgt 1033 *gr*. Die specifische Wärme der Luft ist bei constantem Druck nach DELAROCHE und BERARD 0·267. Die Wärmemenge, die ein cm^3 Luft aufnimmt, um bei constantem Druck von 0° auf 1° zu kommen, ist also

$$0{\cdot}0013 \cdot 0{\cdot}267 = 0{\cdot}000347 \text{ cal.}$$

Nach DULONG verhält sich die specifische Wärme bei constantem Volumen zu der bei constantem Druck wie 1 : 1·421, also ist die entsprechende Wärmemenge für constantes Volumen gerechnet $\frac{0{\cdot}000347}{1{\cdot}421} = 0{\cdot}000244$. Mithin ist $y = 0{\cdot}000347 - 0{\cdot}000244 = 0{\cdot}000103$ cal., und da dadurch 1033 *gr* auf $\frac{1}{274}$ *cm* gehoben werden, so wird durch 1 (kleine) cal. 1 *gr* um $\frac{1033}{274 \cdot 0{\cdot}000103}$ *cm* = 367 *m*

---

1) DAVY, Elements of Chem. Philosophy 1799.

2) ROBERT MAYER, LIEB. Ann. 1842. Abgedruckt in R. MAYER, Die **Mechanik der** Wärme, herausg. von WEYRAUCH, 3. Aufl. 1893.

3) In der ersten Abhandlung von 1842 (pag. 29) kurz, ausführlicher in der zweiten Abhandlung von 1845 (ibid. pag. 55.)

gehoben. Die bei dieser Rechnung benutzten Zahlen sind nach den späteren Beobachtungen zu verbessern. Es ist nämlich in der Formel

$$J = \frac{Ph}{c_p - c_v} = \frac{R\alpha}{c_p - c_v},$$

wo R die Constante des MARIOTTE'schen Gesetzes ist, zu setzen

$$R = 29{\cdot}3 \qquad c_p = 0{\cdot}2375 \qquad c_v = 0{\cdot}1696,$$

also ergiebt sich

$$J = \frac{29{\cdot}3}{0{\cdot}0679} = 424 \text{ Kilogrammeter},$$

Ungefähr gleichzeitig mit R. MAYER begann J. P. JOULE in England eine Reihe von experimentellen Untersuchungen, welche die Absicht und das Ziel hatten, die Ansicht, dass Wärme und Arbeit äquivalente Dinge seien, dass Arbeit in Wärme verwandelt werden könne, qualitativ und quantitativ zu erweisen. Diese Arbeiten von JOULE sind gesammelt und ins Deutsche übersetzt von SPENGEL[1]. Dabei fasste JOULE seine Aufgabe gleich im allgemeineren Sinne. Da die Art und Weise, wie Arbeit in Wärme verwandelt wird, ganz gleichgültig sein muss, so untersuchte er eine ganze Reihe von verschiedenen Formen dieser Verwandlung und bestrebte sich, bei jeder das mechanische Wärmeäquivalent numerisch zu bestimmen. Es musste dabei zunächst ganz gleich sein, ob Arbeit direkt durch Reibung oder Stoss in Wärme verwandelt, oder ob sie indirekt, etwa durch Vermittelung des elektrischen Stromes verwandelt wird. Die Versuche, die JOULE so anstellte, lieferten zunächst Werthe für das mechanische Wärmeäquivalent, das man seither auch häufig zu seinen Ehren als die JOULE'sche Zahl J bezeichnet, welche zwar alle von derselben Grössenordnung waren, aber doch noch erheblich auseinandergingen. Erst die letzten sorgfältigsten Versuche führten zu gut übereinstimmenden Werthen.

Die Methoden, die JOULE zur Umwandlung von Arbeit in Wärme und zur Ermittelung der Zahl J angewendet hat, sind der Reihe nach folgende.

1) Umwandlung von Arbeit in Wärme vermittelst des elektrischen Stromes (JOULE'sche Wärme)[2].

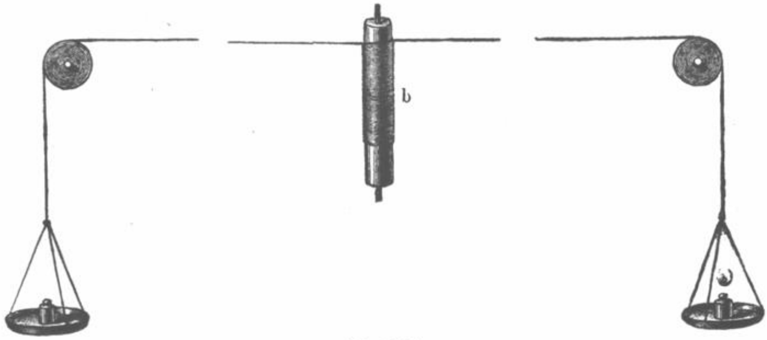
JOULE untersuchte zunächst die Wärmeentwickelung von Strömen, die durch Magnetinduction erzeugt wurden. Er liess eine Drahtrolle, die auf einen Eisenkern gewickelt war, zwischen den Polen eines Hufeisenmagnets rotiren und zwar innerhalb eines Calorimetergefässes. Die erzeugte Stromstärke einerseits und die entstandene Temperaturerhöhung im Calorimeter andererseits wurden gemessen und es ergab sich so das JOULE'sche Gesetz, dass die in der Zeiteinheit erzeugte Wärmemenge *caeteris paribus* dem Quadrat der Stromstärke proportional ist. Dasselbe Gesetz hatte JOULE früher bereits für die galvanischen Ströme bewiesen, welche durch galvanische Elemente erzeugt wurden. Er zeigte auch, dass die in einem Eisenkern allein, ohne umgebende Spule, durch Rotation von den Polen eines Elektromagneten erzeugte Wärme proportional dem Quadrat der in dem Elektromagneten angewendeten Stromstärke ist, was sich aus der Erzeugung der FOUCAULT'schen Ströme und ihrer Umsetzung in Wärme erklärt. Es kam nun darauf an, die zur Drehung der Spule nöthige Arbeit zu messen.

---

[1] JOULE, Das mechanische Wärmeäquivalent. Deutsch von J. SPENGEL, Braunschweig, Vieweg 1872.

[2] JOULE, Phil. mag. (3) 23, pag. 263, 343, 435. 1843.

Zu dem Zweck wurde, wie Fig. 559 zeigt, die Axe *b* eines Centrifugalapparats, welche mittelst Schnur und Uebersetzung der Anker zwischen den Polen des Elektromagnets gedreht wurde, mit einer doppelten Schnur von feinem Zwirn umwunden, und die Schnüre wurden über zwei sehr leicht bewegliche Rollen geleitet. An den Schnüren waren Wagschalen befestigt, in welche man nach



(Ph. 559.)

vorhergehenden Messungen so viel Gewichte legen konnte, dass die Axe mit einer bekannten Geschwindigkeit sich drehte, nachdem man sie zunächst mit der Hand in Drehung versetzt hatte.

So waren 5 Pfund 3 Unzen (2·35303 *kgr*) nöthig, um die Axe in der Geschwindigkeit von 600 Touren pro Minute zu erhalten, während der Elektromagnet erregt war. Der Leerlauf in dieser Geschwindigkeit wurde durch 2 Pfund 13 Unzen (1·27574 *kgr*) aufrecht erhalten, so dass zur Drehung des Ankers nöthig waren 1·07729 *kgr*. Die Geschwindigkeit, mit der die Gewichte dabei fielen, war 517 Fuss in 15 Minuten (157·535 *m* in 13 Minuten). Bei dieser Umdrehung wurde in dem Calorimeter in 15 Minuten eine Temperaturerhöhung von 1·85° F. erreicht. Da aber ausser in dem Calorimeter noch in dem übrigen Theil des Schliessungskreises Wärme erzeugt wurde, ferner in dem Eisen des Ankers FOUCAULT'sche Ströme erzeugt wurden und durch die Funken Energie verloren ging, so berechnet sich die ganze Temperaturerhöhung auf 2·46° F. (= 1·3667° C). Der Wasserwerth des Calorimeters war = 1·114 Pfund Wasser (0·50530 *kgr*). Die erzeugte Wärme ist daher 0·69073 Calorien. Da die dazu nöthige Arbeit $= 2 \times 1{\cdot}07729 \times 157{\cdot}535 = 339{\cdot}42$ Kilogrammeter war, so ergab sich das mechanische Wärmeäquivalent zu

$$J = \frac{339{\cdot}42}{0{\cdot}69073} = 491 \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}.$$

So machte JOULE in derselben Weise noch eine Reihe von weiteren Versuchen, die mehr oder minder übereinstimmende Werthe ergaben und deren Schluss war, dass das mechanische Wärmeäquivalent = 838 Fusspfund ist, wobei als Einheit der Wärmemenge diejenige genommen ist, die 1 Pfund Wasser um 1° FAHRENHEIT erhöht. In Kilogrammmetern und Celsiusgraden ausgedrückt, ergiebt sich so

$$J = 459{\cdot}62.$$

2) Umwandlung von Arbeit in Wärme vermittelst der Reibung von Flüssigkeiten in capillaren Röhren.

Am Schluss des eben genannten Aufsatzes führt JOULE[1]) kurz an, dass er einen Apparat benützt habe, welcher aus einem Stempel bestand, der von einer

[1]) JOULE, l. c., pag. 38.

Anzahl Löchern durchbohrt war und der in einem Glassgefäss von ungefähr 7 Pfund Wasser arbeitete. Er erhielt dadurch für J den Werth 770 Fusspfund pro 1° F., d. h.

$$424{\cdot}6 \text{ Kgrm. pro } 1^\circ \text{ C.}$$

3) Umwandlung von Arbeit in Wärme durch Verdichtung und Verdünnung der Luft.

In einer folgenden Arbeit untersuchte JOULE[1]) die Wärmeerzeugung bei rascher (adiabatischer) Compression von Luft. Zu diesem Zweck brachte er das Gefäss, in welchem die Luft comprimirt wurde, selbst in ein Calorimeter, in welchem er die Temperaturerhöhung des Wassers durch ein sehr genaues Thermometer, das noch $\frac{1}{200}$° F. zu messen gestattete, bestimmte. In dem Compressionsgefäss wurde die Luft durch eine Druckpumpe auf etwa 22 Atmosphären verdichtet. Die dabei entstehende Temperaturerhöhung des Calorimeters wurde bestimmt. Die durch die Reibung der Pumpe und die Bewegung des Wassers allein herrührende Temperaturerhöhung wurde durch besondere Versuche ermittelt. Bei einem Versuch ergab sich z. B. die Temperaturerhöhung des Calorimeters, schon corrigirt wegen der Pumpenreibung und der äusseren Strahlung, zu 0·285° F. Der Wasserwerth des Calorimeters war bestimmt und es entsprach diese Temperaturerhöhung einer Wärmemenge von 13·628 engl. Calorien (Pfund, Grade F).

Die Arbeit bestimmte sich nach dem MARIOTTE'schen Gesetz aus dem Anfangs- und Enddruck und dem Volumen des Recipienten zu 11220·1 Fusspfund. Es ergab sich daher das mechanische Wärmeäquivalent

$$J = \frac{11220{\cdot}20}{13{\cdot}628} = 823 \frac{\text{Fusspfund}}{\text{engl. Calorien}} = 451{\cdot}4 \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}.$$

Als Mittel aus einer Reihe solcher Versuche, die sich durch den Grad der Compression unterschieden, erhielt JOULE so

$$J = 797 \frac{\text{Fusspfund}}{\text{engl. Cal.}} = 436{\cdot}1 \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}.$$

In ähnlicher Weise, nur umgekehrt, machte JOULE auch Versuche, bei denen in dem Recipienten zuerst comprimirte Luft enthalten war, die dann in die Atmosphäre austrat. Die dabei entstehende Abkühlung im Calorimeter wurde gemessen und ergab in verschiedenen Versuchsreihen

$$J = 820,\ 814,\ 760 \frac{\text{Fusspfund}}{\text{engl. Cal.}} = 449{\cdot}8,\ 446{\cdot}5,\ 416{\cdot}8 \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}.$$

4) Umwandlung von Arbeit in Wärme durch Reibung von Flüssigkeiten.

Die ausführlichsten und genauesten Messungen von J stellte JOULE an, indem er durch Reibung Wärme erzeugte. In einer ersten kürzeren Abhandlung[2]) gab er Versuche an, die er mit Wasser und Wallrathöl angestellt hatte, in denen er Schaufelräder bewegte. Aus diesen Versuchen ergaben sich die Werthe

$$J = 781{\cdot}8,\ 782{\cdot}1 \frac{\text{Fusspfund}}{\text{engl. Cal.}} = 428{\cdot}8,\ 430{\cdot}0 \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}.$$

---

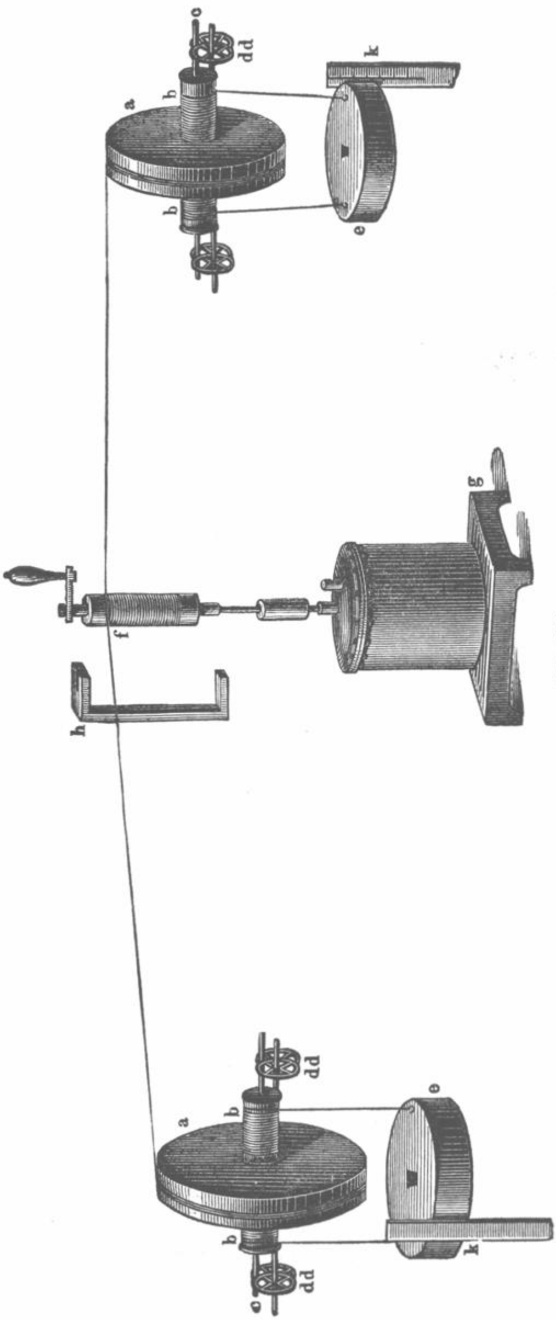
[1]) JOULE, Phil mag. (3) 26, pag. 369. 1845; l. c., pag. 56 ff.

[2]) JOULE, Phil. mag. (3) 31, pag. 173. 1847.

[3]) JOULE, Phil. Trans. 1850, pag. 61; l. c., pag. 87 ff.

Die genauesten und sorgfältigsten Versuche aber stellte JOULE in einer folgenden ausführlichen Arbeit an[3]), bei deren Abfassung die Lehre von der Aequivalenz von Wärme und Arbeit allmählich schon mehr Boden unter den Physikern gewonnen hatte.

a) Reibung von Wasser. Ein messingenes Schaufelrad mit 8 Reihen sich drehender Arme, welche zwischen 4 Reihen feststehender Flügel arbeiten, dreht sich in einem kupfernen Gefäss. Das Rad konnte in Bewegung gesetzt werden und die bei der Bewegung nöthige Arbeit konnte zugleich gemessen werden durch eine Vorrichtung, welche in Fig. 560 dargestellt ist. Eine Walze *f*, welche leicht mit der Axe des Reibungsapparates (der in dem auf dem Schemel *g* stehenden Gefäss sich befindet) in Verbindung gebracht werden konnte, enthielt aufgewickelt eine doppelte Schnur, welche mit den beiden Trommeln *aa* befestigt war und auf sie aufgewunden war. Die Axen dieser Trommeln liefen leicht und fast ohne Reibung in den Rädern *dd*. Auf den Trommeln *bb*, die an *aa* befestigt waren, waren Schnüre aufgewickelt, die die Gewichte *ee* trugen, deren augenblicklicher Stand resp. Geschwindigkeit an den Maassstäben *kk* abgelesen werden konnte. Die Gewichte wogen jedes 29 Pfund engl., bei anderen Versuchen 10 Pfund engl. (13·1542 resp. 4·5359 *kgrm*). Sie hatten eine Fallhöhe von ungefähr 63 Zoll (1·6 *m*), bis sie auf den Boden aufschlugen. Es wurde jedesmal die Temperaturerhöhung des Wassers gemessen und dann ein weiterer Versuch gemacht, ohne dass der Reibungsapparat in Gang war, um die Strahlung zu messen. Bei der ersten Reihe von Versuchen hatten die Bleiklötze sammt dem Stück Schnur, das mitzog, Gewichte von 203066 und 203086 Gran. (11·9933



(Pl. 560.)

und 11·9955 *kgrm*). Die Fallgeschwindigkeit der Gewichte war 2·42 Zoll pro Secunde $\left(0{\cdot}060842\ \frac{m}{sec}\right)$. Die Zeit jedes Versuches betrug 35 Min. Nach jedem Aufschlagen wurden die Gewichte wieder aufgezogen und die Reibung erneuert 20 solche Operationen machten einen Versuch. Es war z. B. beim ersten Versuch

	Gesammtfallhöhe der Gewichte in Zoll	Mittlere Temperatur der Luft	Temperatur des Apparates Anfang	Temperatur des Apparates Ende	Gewinn an Temperat.
Reibung . .	1256·96	57·698° F.	55·118°	55·774°	0·656°
Strahlung .	0	57·868° F.	55·774°	55·882°	0·108°

Als Mittel aus 40 solchen Versuchen ergab sich als Temperaturzunahme des Apparats durch die Reibung allein (ohne Strahlung) 0·563209° F. Der Wasserwerth aller einzelnen Theile des Apparates wurde theils gemessen, theils berechnet und es ergab sich so die ganze entwickelte Wärmemenge zu 7·842299 engl. Calorien (1·9762 Cal.). Die Arbeit bestimmte sich folgendermaassen. Die Gewichte betrugen 406152 Gran (23·9878 *kgr*). Die Grösse der Reibung ergab sich durch besondere Versuche gleich 2837 Gran. Es blieb folglich als wirksames Gewicht übrig 403315 Gran = 23·8200 *kgr*. Diese fielen im Ganzen 1260·248 Zoll oder corrigirt wegen der Endgeschwindigkeit 1260·096 Zoll, was einer Arbeit von 6050·186 Fusspfund entspricht. Da aber ausserdem die Elasticität der Stricke noch, nachdem die Gewichte den Boden erreicht hatten, 16·928 Fusspfund Arbeit leisteten, so ist die corrigirte Arbeit 6067·114 Fusspfund, und daher

$$J = \frac{6067{\cdot}114}{7{\cdot}842299} = 773{\cdot}64\ \frac{\text{Fusspfund}}{\text{engl. Cal.}} = 424{\cdot}30\ \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}.$$

b) Reibung von Quecksilber. Der Apparat für Reibung von Quecksilber war kleiner als der für Wasser benutzte, hatte 6 drehbare und 8 feste Flügel und bestand aus Eisen. Um die Wärmecapacität des Apparates zu bestimmen, wurde er, im Ganzen erwärmt, in ein Wassercalorimeter gebracht und dessen Temperaturerhöhung gemessen. Im Uebrigen wurden die Versuche ganz ebenso angestellt, wie die für Wasser. Als Mittel aus einer ersten Serie ergab sich

$$J = 773{\cdot}762\ \frac{\text{Fusspfund}}{\text{engl. Cal.}} = 424{\cdot}37\ \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}.$$

Als Mittel aus einer zweiten Serie

$$J = 776{\cdot}303\ \frac{\text{Fusspfund}}{\text{engl. Cal.}} = 425{\cdot}77\ \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}.$$

c) Reibung von Gusseisen auf Gusseisen. Auch die Reibung fester Körper benutzte Joule, indem er, wie Fig. 561 zeigt, vermittelst der Axe *a* ein Rad *b* in Umdrehung versetzte, das eben abgeschliffen war. An dieses Rad konnte vermittelst des Hebels *f* und des Rahmens *c* ein feststehendes Rad *d* mit regulirbarem Druck angedrückt werden. Der ganze Apparat war mit Quecksilber gefüllt. In zwei Serien von Versuchen ergab sich so

$$J = 776{\cdot}997\ \frac{\text{Fusspfund}}{\text{engl. Cal.}} = 426{\cdot}14\ \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}$$

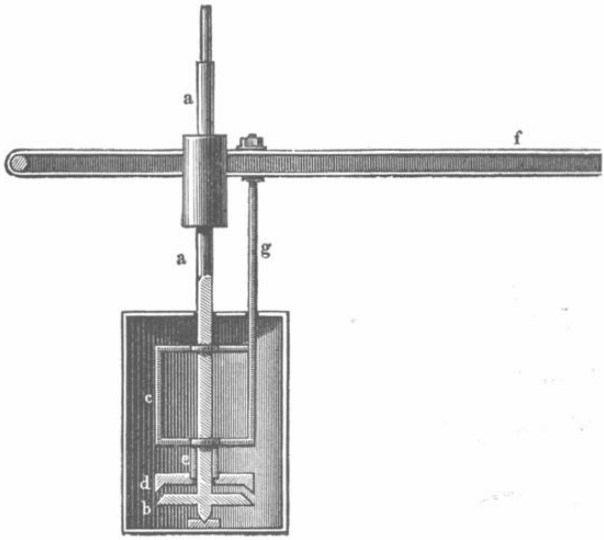
und

$$J = 774{\cdot}880\ \frac{\text{Fusspfund}}{\text{engl. Cal.}} = 425{\cdot}00\ \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}.$$

Als Mittel aus allen diesen Versuchen ergiebt sich folgendes. Corrigirt man die Gewichte auf den leeren Raum und setzt man die specifische Wärme des Wassers zwischen 13 und 15° gleich 1, so ist

$$J = 772 \frac{\text{Fusspfund}}{\text{engl. Cal.}} = 423{\cdot}4 \frac{\text{Kgrmmt}}{\text{Cal.}}.$$

Diese Versuche JOULE's zeigten also mit Evidenz, dass der Satz von der Aequivalenz von Arbeit und Wärme richtig ist. Auch war bei der Sorgfalt, mit der JOULE seine Messungen angestellt und diskutirt hatte, die von ihm gefundene Zahl für J als im Wesentlichen richtig anzusehen. Gegenüber diesen Beobachtungen haben einige andere kurz danach angestellte keine erhebliche Bedeutung, insofern sie wesentlich abweichende Werthe von J ergeben, sondern sie sind von Interesse hauptsächlich desshalb, weil sie zum Theil noch andere Methoden zur Bestimmung von J benutzen Dies sind hauptsächlich die interessanten Versuche von HIRN[1]), von denen folgende angeführt werden mögen.



(Ph. 561.)

α) Verwandlung von Arbeit in Wärme durch Stoss. HIRN brachte zwischen einen starken parallepipedischen Steinblock von 941 *kgr* Gewicht und einen eisernen Cylinder (Widder) von 350 *kgr* Gewicht einen Bleiklotz an (von ca. 3 *kgr* Gewicht), welcher eine Höhlung zur Aufnahme von Wasser und des Thermometers hatte. Der Widder wurde um bestimmte Höhen gehoben, die Ausweichung des Steinblocks gemessen. Daraus ergab sich die durch den Stoss verlorene lebendige Kraft, die zur Erwärmung des Bleis dienen musste. Die so entstandene Wärmemenge wurde durch das Thermometer nach Bestimmung des Wasserwerths gemessen. Es ergab sich so z. B. bei einer Arbeit von 280·42 *kgr* eine Wärmeerzeugung von 0·65955 Cal., woraus

$$J = 425{\cdot}2 \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}$$

sich berechnet.

β) Verwandlung von Wärme in Arbeit durch Dampfmaschinen. Die wichtigsten und zu seiner Zeit interessantesten Versuche aber stellte HIRN[2]) über das mechanische Wärmeäquivalent dadurch an, dass er dasselbe aus der Verwandlung von Wärme in Arbeit bestimmte, wie sie von Dampfmaschinen geleistet wird. Diese Versuche waren zu der damaligen Zeit deswegen von besonderer Wichtigkeit, weil sie den Satz von der Erhaltung der Energie auf

[1]) HIRN, Récherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur 1858, pag. 1. Théorie mécanique de la chaleur I. 1865.

[2]) HIRN, l. c.

schlagende Weise bestätigten. Heutzutage wird bei allen Messungen über Dampfmaschinen oder Kältemaschinen diese Bilanz als nothwendige Probe auf die Richtigkeit der Messungen angesehen. Die Bilanz besteht bei Dampfmaschinen darin, dass die ganze, dem Cylinder zugeführte Wärmemenge abzüglich der im Condensator wieder gewonnenen Wärmemenge gleich der gesammten Arbeit sein muss, welche die Dampfmaschine dabei leistet, falls man die Wärmemengen mit J multiplicirt. Und bei Kältemaschinen besteht die Bilanz darin, dass die gesammte, dem Refrigerator entzogene Wärmemenge (mit J multiplicirt) plus der zum Betrieb des Compressors nothwendigen Arbeit gleich der gesammten an den Condensator abgegebenen Wärmemenge (mit J multiplicirt) sein muss. Offenbar hat man, wenn man die Wärmemenge und die Arbeit unabhängig misst, dadurch auch die Mittel, um J zu bestimmen.

Dies that nun HIRN, und obwohl die so ermittelten Werthe von J durchaus keinen Anspruch machen können, als gleichwerthig mit den aus den feinen Versuchen von JOULE bestimmten zu gelten, sind sie doch in Anbetracht der complicirten Verhältnisse, aus denen sie gewonnen sind, von besonderem Interesse. Die Wärmemengen, die dem Cylinder zugeführt wurden, wurden durch die Menge des verdampften Wassers und die Temperatur der Ueberhitzung aus den REGNAULT'schen Zahlen bestimmt, die Wärmemenge, die im Condensator abgegeben wurde, durch die Menge des Einspritzwassers und die Temperatur desselben ermittelt. Die durch Strahlung nach aussen abgegebene Wärme wurde allerdings nicht bestimmt, sondern möglichst klein gemacht. Bei neueren Versuchen derselben Art bestimmt man diese Strahlung, die nicht unbeträchtlich ist, ebenfalls direkt. Endlich wurde die Arbeit der Dampfmaschine durch Indiciren gemessen. Die einzelnen Beobachtungen geben weit auseinanderstehende Werthe für J. Als Mittel aus allen Zahlen hat CLAUSIUS[1]) den Werth $J = 413$ berechnet. Wie viel genauere Werthe von J man heute nach dieser Methode bestimmen könnte, zeigen unter Anderem die Versuche an Kältemaschinen, welche in der Versuchsanstalt in München von SCHRÖTER[2]) angestellt wurden. Die Bilanz ergab sich bei diesen gewöhnlich innerhalb 1% richtig.

γ) Verwandlung von Arbeit in Wärme durch den Ausfluss von Wasser unter hohem Druck.

Aehnlich wie JOULE (oben pag. 399) brachte auch HIRN[3]) Wasser durch eine Capillare zum Ausströmen und bestimmte die dabei entstehende Wärmemenge. Das Wasser wurde durch eine Druckpumpe durch die Capillare hindurchgetrieben. Der Druck auf die Fläche des Stempels der Pumpe, welche $0{\cdot}000368\ m^2$ Fläche hatte, betrug 167 *kgr*. Das aus diesem Versuch sich ergebende Wärmeäquivalent war $J = 433 \frac{kgr}{\text{Cal.}}$.

II. Systematik der Versuche zur Bestimmung von J.

Nachdem so die ersten Versuche zur Bestimmung von J angegeben sind, soll nun ein systematischer Ueberblick über sämmtliche angewendeten Methoden und die dabei erzielten Resultate gegeben werden, wobei wir nur die neuesten

[1]) CLAUSIUS, Fortschr. d. Phys. 1885, pag. 21.

[2]) SCHRÖTER, Vergleichende Versuche an Kältemaschinen. München 1890. Auch weitere, noch nicht zusammenfassend publicirte Versuche in Bayrisches Industrie- und Gewerbeblatt (Zeitschr. des polytechn. Vereins). München 1892—1894.

[3]) HIRN, l. c.

Versuche von ROWLAND, DIETERICI, MICULESCU einer besonderen, ausführlichen Besprechung unterwerfen. Die verschiedenen Methoden lassen sich in folgende Klassen eintheilen:

A. Verwandlung von Wärme in Arbeit oder umgekehrt durch Vermittelung der Gase.

Zu dieser Klasse gehören zunächst zweierlei verschiedene Processe, nämlich

1) adiabatische Processe,
2) isotherme Processe.

Was 1) die adiabatischen Processe anlangt, so handelt es sich darum, die Wärmeentwickelung bei der adiabatischen Compression oder Expansion der Gase zu bestimmen. Diese Versuche sind von JOULE 1845 angestellt und oben pag. 400 angeführt.

Sie ergaben

$$J = 443{\cdot}8 \text{ und } 437{\cdot}8.$$

Was 2) die isothermen Processe angeht, so ist die Formel, welche J aus der Gasconstante und den specifischen Wärmen bei constantem Druck und bei constantem Volumen abzuleiten gestattet, bereits oben (pag. 397) erwähnt. Auf dieser Formel beruht die erste Berechnung von J durch ROBERT MAYER.

Es ist jedoch bei dieser Berechnung zu bemerken, dass sie sich auf die Annahme eines vollkommenen Gases stützt und in Folge dessen bei wirklichen Gasen Abweichungen und Ungenauigkeiten ergeben muss.

Für homogene Körper jeden Aggregatzustandes folgt aus der mechanischen Wärmetheorie (s. den Aufsatz »Anwendungen der mechanischen Wärmetheorie«) die Formel

$$c_p - c_v = \frac{T}{J}\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p .$$

Setzt man $\frac{c_p}{c_v} = k$, so folgt

$$J = \frac{T}{c_p\left(1 - \frac{1}{k}\right)}\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p .$$

Folgt das Gas dem MARIOTTE-GAY LUSSAC'schen Gesetz

$$pv = RT,$$

so ist

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v}, \qquad \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p},$$

also

$$\frac{\partial p}{\partial T}\frac{\partial v}{\partial T} = \frac{R^2}{p \cdot v} = \frac{R}{T}$$

und

$$J = \frac{Rk}{c_p(k-1)} .$$

Sind aber Abweichungen vom MARIOTTE-GAY LUSSAC'schen Gesetz vorhanden, so kann der Ausdruck für J complicirter werden. Zwar, wenn man das VAN DER WAAL'sche Gesetz annimmt, ist das dann nicht der Fall, wenn man darin das Glied $\frac{a}{v^2}$ als klein ansehen kann. Denn aus

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

folgt dann

$$\left(\frac{dp}{dT}\right)_v = \frac{R}{v-b}$$

$$\left(\frac{dv}{dT}\right)_p = \frac{R}{p+\frac{a}{v^2}},$$

also

$$\frac{dp}{dT}\frac{dv}{dT} = \frac{R^2}{(v-b)\left(p+\frac{a}{v^2}\right)} = \frac{R}{T}.$$

Muss man aber $\frac{a}{v^2}$ berücksichtigen, so ergeben sich complicirte Ausdrücke, die thatsächlich eine Abweichung anzeigen (s. Anwendungen der mech. Wärmetheorie).

Es ist aber weiter zu bemerken, dass der berechnete Werth von J sehr wesentlich abhängt von k, und dass ein Fehler in k procentisch sehr stark in J eingeht, weil die Differenz $k-1$ vorkommt.

In der That berechnet ROWLAND[1]) für J in der Breite von Baltimore (denn da im Zähler von J Kilogramme als Gewichte vorkommen, so hängt der Zähler von der Schwerkraft, von dem Werthe von g, also von der geographischen Breite ab) folgende Zahlen:

Unter Annahme des Werthes von k, wie ihn RÖNTGEN gefunden hat, $k = 1{\cdot}4053$, ist $J = 430{\cdot}3$,

unter Annahme des Werthes von k, wie ihn AMAGAT gefunden hat, $k = 1{\cdot}397$, ist $J = 436{\cdot}6$

unter Annahme des Werthes von k, wie er aus REGNAULT's Messungen über die Schallgeschwindigkeit sich ergiebt

$$\left(v = 331{\cdot}78\ \frac{m}{sec}\right)$$

ist $J = 429{\cdot}6$.

Als Mittel aus diesen Zahlen berechnet sich

$$J = 427{\cdot}7$$

für die Breite von Baltimore ($39°\ 18'\ 9$, $g = 9{\cdot}8005$) und unter der Annahme, dass Wasser von ca. 14° die specifische Wärme 1 hat.

B. Verwandlung von Wärme in Arbeit oder umgekehrt durch Vermittelung von gesättigten Dämpfen.

Aus der mechanischen Wärmetheorie (s. d.) ergiebt sich für die Verdampfungswärme r von Flüssigkeiten die Formel

$$r = \frac{T}{J}\frac{dP}{dT}(s-\sigma),$$

worin P der Druck des gesättigten Dampfes, s das specifische Volumen gesättigten Dampfes, σ das specifische Volumen der Flüssigkeit ist. Da REGNAULT für eine Reihe von Flüssigkeiten r und P in ihrer Abhängigkeit von der Temperatur genau gemessen hat, da ferner σ leicht zu bestimmen ist, so kann man aus dieser Formel J berechnen, falls man s kennt. Es ist aber gerade die Messung von s eine sehr schwierige, und obwohl in der letzten Zeit mehrfache Bestimmungen von s ausgeführt wurden (s. den Artikel Dämpfe), so ist doch auf diese Weise

1) ROWLAND, Proc. Ann. Acad. 15, pag. 147. 1879/80.

ein genauer Werth von J nicht zu ermitteln. PEROT[1]) fand mit den von ihm bestimmten Werthen von s für J die Zahl 424·63.

C. Verwandlung von Wärme in Arbeit und umgekehrt mit Hilfe von Dampfmaschinen und Kältemaschinen.

Es ist bereits oben pag. 403 gezeigt worden, dass HIRN aus den Messungen an Dampfmaschinen angenäherte Werthe für J erhalten hat. Zu genauer Bestimmung von J sind die Verhältnisse bei dieser Methode zu complicirt.

D. Verwandlung von Arbeit in Wärme durch Reibung.

Die nach dieser Methode ausgeführten Bestimmungen scheinen die genauesten zu sein. Wir haben schon oben die Messungen von JOULE angeführt, welcher 1850 durch Reibung von Wasser die Zahl 423·9, durch Reibung von Quecksilber die Zahl 424·7, durch Reibung von Gusseisen die Zahl 425·2 erhielt. Aehnliche Versuche mit Reibung von Metallen in Quecksilber machte FAVRE[2]) 1858 und erhielt dabei den Werth 413·2. Auch HIRN[3]) machte eine grosse Anzahl von Reibungsversuchen und erhielt dabei Werthe zwischen 400 und 450.

PULUJ[4]) hat einen sehr einfachen Apparat construirt, um nach dieser Methode das mechanische Wärmeäquivalent zu bestimmen. Durch eine Schwungmaschine wird eine vertikale Axe gedreht, auf welcher zwei genau mit Reibung in einander passende Hohlkegel aus Eisen sitzen. Der Hohlraum ist mit Quecksilber gefüllt, in welches ein Thermometer taucht. Der innere Kegel, der über den äusseren herausragt, trägt auf seinem Deckel einen Holzbalken, welcher mittelst einer Schnur, die über eine Rolle geht, mit einer Wagschale mit Gewichten verbunden ist. Man dreht den Apparat gleichmässig und belastet die Wagschale so, dass sie in bestimmter Stellung in Ruhe bleibt. Diese Methode der Arbeitsmessung ist von HIRN zuerst angegeben worden. Daraus findet man die mechanische Arbeit. Die Reibung der Kegel erzeugt die Wärme, welche direkt gemessen wird. Auf diese Weise erhielt PULUJ den Werth

$$J = 426{\cdot}6.$$

SAHULKA (l. c.) erhielt mit diesem Apparat, bei kleiner Veränderung desselben,

$$J = 426{\cdot}262.$$

Die ausführlichste und genaueste Arbeit über die Wärmeerzeugung durch Reibung ist die von ROWLAND[5]), deren Resultate etwas ausführlicher angegeben werden sollen.

Die erste Aufgabe, die sich ROWLAND stellte, war eine sehr sorgfältige Zurückführung seiner Quecksilberthermometer auf das Luftthermometer und auf die absolute Scala, wobei er als Gasgesetz nach den Versuchen von THOMSON und JOULE die bekannte Formel von RANKINE anwendete[6])

---

1) PEROT, Journ. de phys. (2) 7, pag. 129. 1888.

2) FAVRE, Compt. rend. 46, pag. 337. 1858.

3) HIRN, Théor. méc. de la chaleur, Bd. 1. 1861.

4) PULUJ, POGG. Ann. 157, pag. 437 u. 149. 1876, s. auch SAHULKA, WIED. Ann. 41, pag. 748. 1890.

5) ROWLAND, Proc Am. Soc. 15, pag. 75. 1879. 80.

6) s. KIRCHHOFF, Vorlesungen über Wärme, pag. 87.

$$\frac{pv}{T} = R\left(1 - m\frac{T_0}{T}D\right),$$

worin D die Dichtigkeit des Gases bezogen auf Luft von 0°, T_0 die Zahl 273, m eine Constante (0·33° C.) ist.

Die nächste Aufgabe bestand in einer Untersuchung der specifischen Wärme des Wassers in ihrer Abhängigkeit von der Temperatur, und hier zeigte Rowland, was auch durch andere spätere Messungen (s. specifische Wärme, auch die jüngste Arbeit von Lüdin[1])) bestätigt wurde, dass die specifische Wärme des Wassers von 0° bis 30° abnimmt, wenn man die Temperaturen mit dem Luftthermometer misst.

Im Uebrigen war das Princip der Methode dasselbe, welches Joule angewendet hatte, nur wurde mit viel grösseren Kräften und Mitteln gearbeitet. In dem Wassercalorimeter wurden Schaufelräder von besonderer Form gedreht. Die Drehung geschah durch einen Petroleummotor, und die Arbeit, die dabei aufgewendet wurde, wurde im Princip ebenso gemessen, wie es Joule bei den ersten oben erwähnten Versuchen gethan hatte. Auf die vielen sorgfältigen Untersuchungen zur Berücksichtigung aller Fehlerquellen kann hier nicht näher eingegangen werden. Es ist darüber die Originalarbeit einzusehen. Jeder Versuch bestand aus einer grossen Menge von Theilversuchen, indem die Temperatur des Calorimeters immer höher getrieben wurde (bis über 40°) und fortlaufende Messungen der Arbeit vorgenommen wurden. Dadurch konnte Rowland nun für jede Temperatur des Calorimeterwassers zwischen 5° und mehr als 40° das mechanische Wärmeäquivalent bestimmen. Nahm er nun die specifische Wärme des Wassers bei allen Temperaturen gleich 1 an, so ergab sich, dass das so berechnete mechanische Wärmeäquivalent eine regelmässige Abnahme zeigte, wenn man von 5° an zu höheren Temperaturen überging, bis zu 30°. Darüber hinaus aber bis zu 40°, resp. so weit überhaupt beobachtet wurde, nahm der berechnete Werth von J wieder zu. Das heisst mit anderen Worten, die Annahme für die specifische Wärme $c = 1$ liefert bei Temperaturen von 5° bis 30° zu grosse Werthe für die Wärmemenge, bei Temperaturen über 30° zu kleine. Daraus folgt, was Rowland, wie oben angeführt, auch direkt gezeigt hatte, dass die specifische Wärme des Wassers von 5° bis 30° regelmässig abnimmt, oberhalb 30° aber wieder zunimmt. Die Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents auf diesem Wege liefert dann überhaupt das schärfste Mittel, um diese Veränderlichkeit von c zu bestimmen. Die Mischungsmethode und andere calorimetrische Methoden sind viel grösseren Fehlerquellen ausgesetzt.

Die Resultate nun, zu denen Rowland gelangt ist, sind folgende. Bezieht man die Gewichte alle auf den leeren Raum und auf die Breite von Baltimore, wo $g = 9{\cdot}8005$ ist, und nimmt man die specifische Wärme des Wassers bei jeder von den angegebenen Temperaturen als 1 an, bestimmt man ferner die Temperaturen nach der absoluten Scala, indem man an dem Luftthermometer noch die Correcturen auf Grund der Thomson-Joule'schen Versuche anbringt, so erhält man folgende Werthe für J, entweder in $\frac{\text{Kilogrammetern in Baltimore}}{\text{Calorien}}$ oder im C. G. S.-System $\left(\frac{cm^2}{sec^2 \cdot C^0}\right)$.

[1]) Lüdin, die Abhängigkeit der specifischen Wärme des Wassers von der Temperatur. Inaug.-Diss. Zürich 1895.

Werthe von J.

Temp.	Kgrmmt. in Balt. / Cal.	C. G. S.-Einheiten $\frac{cm^2}{sec \cdot C^0}$	Temp.	Kgrmmt. in Balt. / Cal.	C. G. S.-Einheiten $\frac{cm^2}{sec \cdot C^0}$
5°	429·8	42120000	21°	426·2	41770000
6°	429·5	42090000	22°	426·1	41760000
7°	429·3	42070000	23°	426·0	41750000
8°	429 0	42040000	24°	425·9	41740000
9°	428·8	42020000	25°	425·8	41730000
10°	428·5	42000000	26°	425·7	41720000
11°	428·3	41980000	27°	425·6	41710000
12°	428·1	41960000	28°	425·6	41710000
13°	427·9	41940000	29°	425·5	41700000
14°	427·7	41920000	30°	425·6	41710000
15°	427·4	41890000	31°	425·6	41710000
16°	427·2	41870000	32°	425·6	41710000
17°	427·0	41850000	33°	425·7	41720000
18°	426·8	41830000	34°	425·7	41720000
19°	426·6	41810000	35°	425·8	41730000
20°	426·4	41790000	36°	425·8	41730000

In anderen Breiten als Baltimore sind zu den Zahlen in der zweiten Spalte $\left(\frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}\right)$ folgende Correctionen hinzuzufügen.

Breite	Corr.	Breite	Corr.
0	+ 0·89	50	— 0·41
10	+ 0·82	60	— 0·47
20	+ 0·63	70	— 1·06
30	+ 0·34	80	— 1·26
40	+ 0·08	90	— 1·33

Die Correction beträgt in
Manchester . — 0·5
Paris . . . — 0·4
Berlin . . . — 0·5

ROWLAND nimmt an, dass seine Zahlen zwischen 10 und 30° höchstens um 0·2 % unsicher sind.

Fast gleichzeitig mit diesen Versuchen von ROWLAND bestimmte JOULE[1]) selbst noch einmal die Zahl J durch Reibung von Wasser in einem Calorimeter und erhielt genau so wie früher

$$J = 423{\cdot}9$$

bei ca. 15°, während nach ROWLAND bei dieser Temperatur $J = 428$ ist.

Uebrigens hat ROWLAND[2]) gezeigt, dass an den JOULE'schen Zahlen einige Correcturen angebracht werden müssen. JOULE's Thermometer waren mit einem Thermometer von FASTRÉ verglichen. Nun zeigen aber, wie ROWLAND durch Vergleichung gefunden hat, die Thermometer von FASTRÉ zu hoch gegenüber dem Luftthermometer, und dadurch kommt zu den JOULE'schen Zahlen eine positive Correctur von 0·3 %. Ferner ist die von JOULE angenommene specifische Wärme des Kupfers 0·09515 vermuthlich etwas zu gross; sie ist nur 0·922. Daraus ergiebt sich eine positive Correction von 0·13 %, so dass im Ganzen folgt

[1]) JOULE, Phil. Trans., pag. 365. 1878.

[2]) ROWLAND, l. c., pag. 179.

JOULE's Werth	423·9 bei 15·7°
Reduction für Luftthermometer	+ 1·3
Correction wegen sp. W. v. Kupfer	+ 0·5
	425·7.

Dies auf die Breite von Baltimore reducirt (+ 0·5), giebt 426·2, während ROWLAND fand 427·3, also eine Differenz von 0·25 %.

Eine weitere Bestimmung nach derselben Methode der Reibung unternahm in jüngster Zeit MICULESCU[1]). Bei ihm wurden die reibenden Flügel durch eine Dynamomaschine getrieben, die etwa 1 Pferd leistete. Dieser Motor sass auf einem Balancier, einem beweglichen Gestell auf, welches sich je nach der Arbeit, die der Motor leitete, zu drehen suchte und nur durch bestimmte Gewichte wieder in die Normallage zurückgeführt wurde. Aus diesen Gewichten, der Tourenzahl und der Länge eines Hebelarms lässt sich die Arbeit bestimmen. Die calorimetrische Messung geschah nicht in der Weise, dass man die Temperatur des Wassers sich durch die Reibung dauernd erhöhen liess, sondern umgekehrt dadurch, dass man stets frisches Wasser von regulirbarer Menge in das Calorimeter einfliessen liess, so dass die Temperatur constant blieb. Ob diese Methode, welche auch von HIRN zuweilen benutzt wurde, wirklich exact ist, erscheint einigermaassen fraglich. Die Versuche von MICULESCU ergeben nun, wenn man die Schwerkraft von Paris ($g = 980{\cdot}96$) zu Grunde legt und annimmt, dass die specifische Wärme des Wassers zwischen 10° und 13° gleich 1 ist, für J als Mittel aus 31 Versuchen

$$J = 426{\cdot}84\ \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}.$$

Aus den ROWLAND'schen Zahlen folgt für diese Einheiten $J = 427{\cdot}8$, also ein Unterschied von nur 0·25 %[2]).

E. Verwandlung von Arbeit in Wärme durch Stoss.

Die Versuche von HIRN über den Stoss von Blei sind oben (pag. 403) erwähnt worden. Sie führten zu dem Werthe $J = 425$.

F. Verwandlung von Arbeit in Wärme durch den Durchfluss von Flüssigkeiten durch Capillare.

Die oben angeführten Versuche von JOULE gaben $J = 424{\cdot}6$, die von HIRN $J = 432{\cdot}0$.

G. Verwandlung von Arbeit in Wärme vermittelst elektrischer Ströme.

Zuerst war es wieder JOULE, der, wie oben pag. 398 angeführt, Inductionsströme durch eine magnetoelektrische Maschine erzeugte, die nothwendige Arbeit und die erzeugte Wärmemenge maass.

In ähnlicher Weise liess VIOLLE[3]) eine Kupferscheibe zwischen den Polen eines Elektromagneten in einem Calorimeter rotiren und maass die zur Rotation aufgewendete Arbeit und die durch die FOUCAULT'schen Ströme erzeugte Arbeit. Die von ihm erhaltenen Werthe $J = 434{\cdot}9$ bis $J = 437{\cdot}4$ sind zu gross.

---

[1]) MICULESCU, Journ. de phys. (3) 1, pag. 104. 1892; Phys. Revue 1, pag. 624. 1892.

[2]) S. auch die Anordnungen und Versuche von GRIFFITH, Beibl. 18, pag. 322, 646. 1894. CHRISTIANSEN, WIED. Ann. 48, pag. 374. 1893.

[3]) VIOLLE, Ann. chim. phys. (4) 22, pag. 64. 1870.

Ausser den bisher angeführten direkten Methoden, bei denen die Arbeit und die Wärme jedesmal selbst gemessen werde, giebt es auch noch indirekte Methoden, bei denen die Arbeit oder die Wärme aus anderen Daten bereits bekannt sind. Die wichtigste dieser Methoden ist:

H. Erzeugung von Wärme durch den elektrischen Strom in Drähten von bekanntem Widerstand.

Da das Produkt aus dem Quadrat der Stromstärke i und dem Widerstand w eines Drahtes, wenn sie beide absolut gemessen werden, die Arbeit ohne Weiteres bestimmt, welche zur Erzeugung und Aufrechterhaltung dieses Stromes in dem Drahte nothwendig ist, so kann man sofort, wenn man die in diesem Draht erzeugte Wärme calorimetrisch misst, die Joule'sche Zahl berechnen. Nothwendige Voraussetzung dazu ist aber natürlich, dass Stromstärke und Widerstand in absolutem Maass genau bekannt sind. Deswegen konnte diese Methode keine genauen Resultate geben, bis der Werth des Ohms genau bestimmt war. Die ersten Messungen nach dieser Methode von Quintus Icilius[1]) u. Lenz konnten daher noch keinen genauen Werth ergeben (399·7). Joule[2]) machte im Jahre 1867 Experimente nach dieser Methode und legte den Werth des Ohm der British Association zu Grunde. Er erhielt den Werth $J = 25187$, indem er Fuss und F^0 zu Grunde legte. Dies ist $= 429{\cdot}4 \, \frac{kgrm.}{\text{Cal.}}$ Die Angaben von Joule beziehen sich auf die Breite von Manchester, auf die Temperatur 18·6° und auf Quecksilberthermometer. Je nachdem nun die B. A.-Einheit in Bezug auf das wahre Ohm einen anderen Werth als 1 hat, muss diese Zahl corrigirt werden. Rowland stellt (l. c.) folgende Tabelle auf:

Die B. A. Einheit ist	Ohm
1. nach dem B. A. Committee .	1
2. dto. corrigirt von Rowland .	0·993
3. Kohlrausch	1·0193
4. Rowland	0·9911
5. H. F. Weber	1·0014

Danach ist der Werth des mechanischen Wärmeäquivalenten nach Joule (corrigirt für Baltimore)

	J direkt bestimmt	J corr. für Luftherm.
1.	429·9	431·4
2·	426·9	428·4
3·	438·2	439·7
4.	426·1	427·6
5	430·5	432·0

Nach den jetzt festgelegten Bestimmungen ist

$$1 \text{ Ohm} = 1{\cdot}063 \text{ S. E.} = 1{\cdot}014 \text{ B. A. E.},$$

also 1 B. A. E. = 0·9862 Ohm

Danach wird nach den Joule'schen Messungen

	J direkt bestimmt	J corr. auf Luftherm.
	423·95	425·45
Für Manchester giebt das	423·45	424·95

[1]) Quintus Icilius, Pogg. Ann. 101, pag. 69. 1857.

[2]) Joule, Rep. Committee El. Un. Lond. 1873, pag. 175.

Es ist ausserordentlich, wie nahe diese so corrigirten Werthe mit den von JOULE durch Reibung bestimmten übereinstimmen.

In derselben Weise wie JOULE machte auch H. F. WEBER 1878[1]) Bestimmungen nach der elektrischen Methode und gab den Werth

$$J = 428{\cdot}15$$

in der Breite von Zürich, bezogen auf das Luftthermometer und bei 18°.

Da WEBER für die SIEMENS-Einheit den Werth 0·9536 Ohm annimmt, während sie 0·9407 Ohm ist, so ist WEBER's Zahl mit 0·9864 zu multipliciren und giebt so

$$J = 422{\cdot}33$$

einen erheblich zu kleinen Werth. Auf die Ursache dieser Abweichung weist DIETERICI[2]) hin.

Einige Bestimmungen nach dieser Methode mit Zuhilfenahme des Eiscalorimeters hat JAHN[3]) angestellt. Er erhielt für J bezogen auf die mittlere Calorie (zwischen 0 u. 100) 426·56, bezogen auf die gewöhnliche Calorie (specifische Wärme des Wassers zwischen 15° u. 18° gleich 1 gesetzt) 430·56. Da er aber die SIEMENS-Einheit = 0·942 Ohm annahm, statt gleich 0·9407 Ohm, so reduciren sich seine Werthe auf

$$\left.\begin{matrix} 425{\cdot}97 \\ 430{\cdot}00 \end{matrix}\right\} \frac{\text{Kgrm.}}{\text{Cal.}} \quad \begin{matrix} \text{bezogen auf mittl. Calorie} \\ \text{,, \quad ,, \quad gew. Calorie.} \end{matrix}$$

Eine sorgfältige Untersuchung nach dieser Methode hat DIETERICI[4]) ausgeführt, wobei er ebenfalls wie JAHN das Eiscalorimeter anwendete. Er benutzte als Wärmeeinheit die mittlere Grammcalorie, welche so viel Eis von 0° in Wasser von 0° verwandelt, dass die entstehende Volumendifferenz gleich dem Volumen von 15·44 *mg* Quecksilber von 0° ist. Ferner legte er für das Ampère die von F. u. W. KOHLRAUSCH gefundene Grösse, für das Ohm den Widerstand einer Quecksilbersäule von 106 *cm* Länge zu Grunde. Mit diesen Werthen erhielt er als Mittel aus seinen Versuchen in absoluten C. G. S.-Einheiten

$$J = 4243{\cdot}6 \cdot 10^4 \, \frac{cm^2}{sec^2\, C^0}$$

mit einem Fehler von $+ 0{\cdot}17 \cdot 10^5$.

Da unterdess das Ohm mit grösserer Annäherung durch den Widerstand einer Länge von 106·3 *cm* Hg dargestellt wird, so ist diese Zahl mit $\frac{106}{106{\cdot}3}$ zu multipliciren, wodurch man erhält

$$J = 4232 \cdot 10^4 \, \frac{cm^2}{sec^2\, C^0}.$$

Da in Berlin, wo diese Versuche angestellt wurden, die Schwerkraft $981{\cdot}2 \, \frac{cm}{sec^2}$ ist, so ist

$$J = 431{\cdot}3 \, \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}.$$

Die mittlere specifische Wärme des Wassers, die der Verfasser benutzt hat, lässt sich nicht ohne Unsicherheit auf die specifische Wärme bei 0° reduciren. Unter der Annahme, dass der Verlauf der specifischen Wärme, wie ihn ROWLAND gefunden hat, auch unter 5° gültig ist, und dass über 30° die Aenderung von c

[1]) H. F. WEBER, Phil. mag. (5) 30. 1878.
[2]) DIETERICI, WIED. Ann. 33, pag. 409. 1888.
[3]) JAHN, WIED. Ann. 25, pag. 62. 1885.
[4]) DIETERICI, WIED. Ann. 33, pag. 417. 1888.

linear erfolgt, berechnet DIETERICI, dass die mittlere specifische Wärme $c_m = 1{\cdot}0045$ ist, die specifische Wärme für $0^\circ \cdot c_0 = 1$ gesetzt.

In Folge dessen ist J, wenn man es auf die Temperatur 0° beziehen will, mit 1·0045 zu dividiren, und man erhält so

$$J = 429{\cdot}4 \, \frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}} = 4213{\cdot}0 \cdot 10^4 \, \frac{cm^2}{sec^2 C^0} \text{ bei } 0^\circ.$$

Bis auf wenige Zehntel stimmt das mit den ROWLAND'schen Werthen überein.

J. Erzeugung von Wärme durch die chemische Action einer Batterie.

Eine weitere Methode, um das mechanische Wärmeäquivalent indirekt zu berechnen, ist folgende: Es möge von einer Batterie, die die elektromotorische Kraft E hat, ein Strom von der Stärke i durch einen Stromkreis gesendet werden. Dann ist die gesammte Energie, die der Strom pro Secunde besitzt $= Ei$. Nun tritt aber in der Batterie selbst chemische Action auf, und es möge n die Zahl der elektrochemischen Aequivalente sein, welche pro Secunde und Stromeinheit in der Batterie gebildet werden. Es sei ferner q diejenige Wärmemenge, welche erzeugt wird, wenn sich ein elektrochemisches Aequivalent bildet. Dann ist die gesammte Wärmemenge, welche in der Batterie pro Secunde erzeugt wird

$$nqi$$

Wenn nun die gesammte Wärme nq in Strom umgesetzt wird, so muss sein

$$Jnqi = Ei$$

oder

$$E = Jnq.$$

Dieselbe Betrachtung gilt auch für die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes, etwa in einem Wasservoltameter.

Nun kann man E absolut bestimmen, entweder indem man auf die absolute Messung des Ohm zurückgeht, oder direkt elektrostatisch mit einem absoluten Elektrometer und kann, wenn man die kritische Geschwindigkeit v kennt, E auch in Volt ausdrücken. Ferner ist n von KOHLRAUSCH bestimmt, q ist die zu messende Grösse, aus der man dann

$$J = \frac{E}{nq}$$

findet.

Nun ist für 1 DANIELL'sches Element $E = 10{\cdot}935 \cdot 10^{10}$ im Mittel (in *mm, mgr, sec.*). Die Wärmetönung von 1 Aeq. $ZnSO_4$ abzüglich der Wärmetönung von 1 Aeq. $CuSO_4$ ist nach FAVRE u. SILBERMANN[1]) gleich 23993 Wärmeeinheiten, n ist nach KOHLRAUSCH $= 0{\cdot}001047$, woraus sich ergiebt

$$J = 444{\cdot}2 \, \frac{m}{C^0}.$$

Indess ist diese Methode wohl von allen die schlechteste, da erstens die Wärmetönungen, wie sie den wirklichen Processen (mit allen secundären Erscheinungen) in der Kette entsprechen, nicht gemessen sind, und da man hauptsächlich nie wissen kann, ob die gesammte chemische Wärme in Strom umgesetzt wird. Es ist daher diese Methode auch bloss deswegen mit besprochen worden, weil sie häufig noch angeführt wird.

---

[1]) FAVRE u. SILBERMANN, Ann. chim. phys. (3) 37. 1851.

III. Zusammenfassung der Resultate.

Aus dem Gesagten geht ohne Weiteres hervor, dass die beiden einzigen Methoden, welche genaue Werthe des mechanischen Wärmeäquivalents ergeben können, sind 1) die Reibungsmethode, 2) diejenige Methode, die bekannten elektrischen Widerstand und bekannte Stromstärke anwendet. Die dritte Methode, welche an Genauigkeit mit diesen concurriren könnte, ist diejenige der Berechnung aus der Gasconstante. Doch leidet diese an den Mängeln, dass erstens ideale Gase vorausgesetzt werden, zweitens dass die Bestimmung der specifischen Wärme der Gase bei constantem Druck nicht in dem Maasse sicher ist, wie man es zur Berechnung von J braucht.

Daher kommen nur die beiden ersten Methoden in Betracht und von den nach der ersten angeführten Messungen sind die sichersten die von Joule, die von Rowland und von Miculescu. Von den nach der zweiten Methode ausgeführten Messungen sind die sichersten die von Joule und Dieterici. Es mögen daher diese Resultate allein zusammengestellt werden.

I. Reibungsversuche.

Direkt gefundene Werthe.

		J	Temp.
Joule	1850	423·9	15·7°
Joule	1878	423·9	15·5°.

Diese Zahlen sind nach Rowland (s. o.) um 1·8 zu vergrössern, hauptsächlich wegen der Reduction auf das Luftthermometer, und geben so

425·7.

Da in Manchester (Breite 53·5°) $g = 981{\cdot}32$ ist, so ist in absolutem Maass nach Joule

$$J = 4177{\cdot}5 \cdot 10^4 \frac{cm^2}{sec^2 \cdot C^0} \text{ bei } 15{\cdot}6.$$

Nach Rowland 1880 ist bei derselben Temperatur

$$J = 4188 \cdot 10^4 \frac{cm^2}{sec^2 \cdot C^0}.$$

Nach Miculescu ist bei 11·5° in Paris (g 980·96) $J = 426{\cdot}84$, also in absoluten Einheiten

$$4187{\cdot}1 \cdot 10^4 \frac{cm^2}{sec^2 C^0}.$$

Nach Rowland ist bei derselben Temperatur

$$J = 4197 \cdot 10^4 \frac{cm^2}{sec^2 C^0}.$$

II. Elektrische Versuche.

Nach Joule 1867 ist der direkte Werth von J in Manchester bei 13·6° C.

$$J = 429{\cdot}4 \frac{m}{C^0}.$$

Auf das wahre Ohm reducirt (1·063 S) giebt das

$$J = 423{\cdot}45 \frac{m}{C^0}.$$

Mit der Correction auf das Luftthermometer erhält man

$$J = 424{\cdot}95 \frac{m}{C^0} \text{ für } 18{\cdot}6^\circ \text{ in Manchester.}$$

Dies auf absolutes Maass reducirt, giebt

$$J = 4170{\cdot}1 \cdot 10^4 \; \frac{cm^2}{sec^2 C^0} \text{ bei } 18{\cdot}6^\circ.$$

[Der Werth von ROWLAND für diese Temperatur ist $4182 \cdot 10^4$]. Endlich ist der Werth von DIETERICI, der sich auf 0° bezieht,

$$J = 4213{\cdot}0 \cdot 10^4 \text{ bei } 0^\circ.$$

Die Werthe von JOULE und von ROWLAND, sowohl diejenigen, welche aus Reibungsversuchen, als diejenigen, welche aus elektrischen Versuchen abgeleitet sind, unterscheiden sich um $0{\cdot}3\,\frac{0}{0}$. Ebenso unterscheiden sich diejenigen von ROWLAND und MICULESCU um $0{\cdot}3\,\frac{0}{0}$. Wir werden also die Mittel als wahrscheinlichste Werthe nehmen können und können sagen:

1) Das mechanische Wärmeäquivalent ist

$$J = 4176 \cdot 10^4 \; \frac{cm^2}{sec^2 C^0},$$

wenn man die specifische Wärme des Wassers bei 18·6° gleich 1 setzt.

2) Es ist

$$J = 4176 \cdot 10^4 \; \frac{cm^2}{sec^2 C^0},$$

wenn man die specifische Wärme des Wassers bei 15·6° gleich 1 setzt.

3) Es ist

$$J = 4192 \cdot 10^4 \; \frac{cm^2}{sec^2 C^0},$$

wenn man die specifische Wärme des Wassers bei 11·5° gleich 1 setzt.

4) Es ist (mit grösserer Unsicherheit)

$$J = 4213 \cdot 10^4 \; \frac{cm^2}{sec^2 C^0},$$

wenn man die specifische Wärme des Wassers bei 0° gleich 1 setzt.

Will man das mechanische Wärmeäquivalent in $\frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}$ ausdrücken, so muss man eine bestimmte Breite festsetzen. Nehmen wir die Breiten von Berlin (52° 30′) und von München (48° 9′) und setzen für

$$\begin{array}{ll} \text{Berlin} & g = 981{\cdot}23 \\ \text{München} & g = 980{\cdot}77 \end{array} \; \frac{cm}{sec^2},$$

so wird J, wenn man die specifische Wärme des Wassers = 1 setzt,

	in Berlin	in München
1. bei 18·6°	425·6 $\frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}$	425·8 $\frac{\text{Kgrmmt.}}{\text{Cal.}}$
2. bei 15·6°	426·2 „	426·4 „
3. bei 11·5°	427·2 „	427·4 „
4. bei 0°	429·4 „	429·6 „

GRAETZ.