

Zur Geschichte und Kritik des Carnot'schen Wärmegesetzes

E. Mach,

M. k. Akad.

(Mit 1 Figur im Text).

1. Als ich vor ungefähr 20 Jahren mich damit beschäftigte, auf Grund von historischen Studien die Motive der Bildung der physikalischen Begriffe aufzusuchen, oder diese Begriffe erkenntnistheoretisch aufzuklären, entsprach diese Art der Untersuchung sehr wenig dem Geschmack der Mehrzahl der Physiker. Der heutigen Generation liegt jedoch der Standpunkt, welchen ich damals eingenommen und in einer kleinen Gelegenheitsschrift¹ in aller Kürze dargelegt habe, beträchtlich näher. Ich darf dies neben andern Anzeichen daraus schliessen, dass meine 10 Jahre später gegebenen, etwas breiteren Ausführungen über die Begriffe der Mechanik² im Allgemeinen zustimmend aufgenommen worden sind. Es sei mir deshalb erlaubt, auf einige Gedanken jener älteren Schrift, zunächst die, welche das Carnot'sche Wärmegesetz betreffen, hier nochmals etwas näher einzugehen.

Die Geschichte und die Wurzel des Satzes der Erhaltung der Arbeit. Prag. Calve. 1872.

Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Leipzig. Brockhaus 1883. — So wenig es zu bestreiten ist, dass instinctive Vorstellungen bei Erweiterung der Wissenschaft mit grosser Kraft und Sicherheit wirken, eben weil kritische Zweifel ihnen nichts anhaben können, bricht sich doch allmählig die Überzeugung Bahn, dass zum vollen Besitz des Gewonnenen auch die Einsicht in die Begriffsentwicklung gehört.

2. Es liegt in der Natur unserer, mitten in der Entwicklung begriffenen Erkenntnis, dass wir neu erschaute Thatsachen mit Hilfe bereits vorher erworbener Begriffe darstellen, indem wir neuen Erscheinungen entweder bereits anderweitig bekannte Eigenschaften zuschreiben, oder solche fälschlich zugemuthete absprechen.¹ Wir finden an dem Neuen entweder Übereinstimmungen, Analogien mit Bekanntem, oder Unterschiede in Bezug auf dasselbe.

In der That ist der erste grosse Schritt bei der Entdeckung Carnot's die Beachtung einer Analogie zwischen dem fallenden Arbeit leistenden Wasser und der in der Temperatur sinkenden Arbeit leistenden Wärme. Auf den umkehrbaren Kreisprocess wird Carnot geführt, indem er bedenkt, dass die Wärme so wenig wie das Wasser nutzlos abfliessen darf, wenn das Arbeitsmaximum geleistet werden soll. Und die Unabhängigkeit dieses Arbeitsmaximums vom vermittelnden Stoff ergibt sich durch die Aufrechthaltung der Übereinstimmung aller Erscheinungsgebiete in Bezug auf das ausgeschlossene Perpetuum mobile. Carnot hält ferner die Analogie zwischen Wasser und Wärme auch darin aufrecht, dass er die von Black ausgesprochene Unveränderlichkeit der Wärmemenge annimmt.

Diesen letzten Punkt hat nun Carnot, wie es durch seinen Nachlass bekannt geworden ist, im Verlauf seiner Untersuchungen nicht haltbar gefunden. Seguin, J. R. Mayer, Colding und Joule haben diese Analogie zwischen Stoff und Wärmemenge ausdrücklich als nicht stichhältig abgewiesen, und haben an deren Stelle vielmehr die Übereinstimmung zwischen Wärmemenge und Energie gesetzt.

3. Das Carnot'sche Wärmegesetz stellt das beim umkehrbaren Kreisprocess geleistete Arbeitsmaximum W als eine Function der übergeführten Wärmemenge Q und der Temperaturen t_1, t_2 dar, d. h. es setzt

$$W = f(Q, t_1, t_2).$$

Vergl. meine »Beiträge zur Analyse der Empfindungen«. Jena. Fischer 1886, S. 141.

Mit Hilfe des Mayer'schen Grundsatzes der Proportionalität zwischen der verbrauchten Wärmemenge und der erzeugten Arbeit drückt aber Clausius die in Arbeit verwandelte Wärmemenge Q' als Function der übergeführten Wärmemenge und der Temperaturen aus, d. h.

$$Q' = E \cdot f(Q, t_1, t_2),$$

wobei E das Wärmeäquivalent der Arbeit bedeutet. Vermöge der einfachen Eigenschaften der Gase gelingt es, für diesen Fall die Function zu bestimmen, welche nach dem Carnot'schen Grundsatz vom Stoff unabhängig, also allgemein gültig ist.

Die Carnot-Clausius'sche Gleichung lautet dann für den einfachsten Kreisprocess:¹

$$1) \quad -\frac{Q'}{T_1} + Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) = 0,$$

wobei T_1, T_2 die absoluten Temperaturen des höhern, beziehungsweise tiefern Niveaus bedeuten. Nennt man die auf dem höheren Niveau aufgenommene Wärmemenge Q_1 , die auf dem tieferen abgegebene Q_2 , so ist die Gleichung 1) identisch mit

$$2) \quad -\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0.$$

Für einen zusammengesetzten, beziehungsweise aus unendlich kleinen Elementen zusammengesetzten geschlossenen Kreisprocess treten beziehungsweise die beiden Gleichungen auf

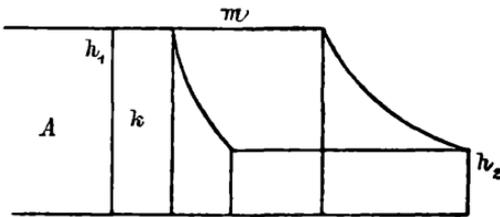
$$3) \quad \sum \frac{Q}{T} = 0,$$

$$4) \quad \int \frac{dQ}{T} = 0.$$

Clausius, Abhandlungen über mechanische Wärmetheorie. Braunschweig 1864. I. S. 146.

4. Zeuner hat seinerzeit versucht, den Carnot'schen Wärmekreisprozess durch einen Prozess mit schweren Massen nachzuahmen, um dadurch die Bedeutung des Ausdruckes Q/T aufzuklären, welchem letzteren er den Namen Wärmegewicht beilegt.

In Bezug auf die Zeuner'sche Darlegung ist zu bemerken, dass dieselbe durchaus der Carnot'schen Anschauung entspricht, die ja ganz von der berührten Analogie beherrscht wird. Doch lässt sich die Analogie zwischen dem thermischen und mechanischen Process weiter durchführen, als dies Zeuner gethan hat, in dessen Process das Herbeischieben und Fortschieben der Gewichte in verschiedenen Höhen nur eine sehr äusserliche Ähnlichkeit hat mit der Wärmeaufnahme und Abgabe unter Arbeitsleistung, beziehungsweise Arbeitsverbrauch.



Man denke sich einen sehr grossen, zur Druckhöhe h_1 gefüllten Flüssigkeitsbehälter A, der mit einem kleineren k in Verbindung steht. Verschiebt sich die ver-

ticale Seitenwand des letzteren um die Strecke m , und hierauf unter Abschluss gegen A so weit, dass die Druckhöhe in k auf h_2 sinkt, verbindet man hierauf k mit einem sehr grossen Behälter B von der Druckhöhe h_2 und verkleinert k soweit, bis das bei der Verschiebung m aus A entnommene Flüssigkeitsgewicht P wieder von B aufgenommen ist, so enthält k , unter Isolation auf das Ausgangsvolum zurückgebracht, wieder die ursprüngliche Flüssigkeitsmenge und die ursprüngliche Druckhöhe h_1 .

Hiebei ist die Energie $W' = \frac{P}{2} (h_1 - h_2)$ zu äusserer Arbeit verwendet, die Energie $W = \frac{P}{2} h_2$ von h_1 auf h_2 übergeführt worden. Es besteht demnach die Gleichung

$$-\frac{W'}{h_1} + W \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{h_1} \right) = 0,$$

welche mit 1) in der Form übereinstimmt. Nennt man die von A aufgenommene Energie $W_1 = \frac{P}{2} h_1$, die an B abgegebene $W_2 = \frac{P}{2} h_2$, so hat man

$$-\frac{W_1}{h_1} + \frac{W_2}{h_2} = 0,$$

was mit 2) in der Form übereinstimmt.¹

Man sieht hier, dass von A dasselbe Gewicht aufgenommen, welches an B abgeführt wird. Dagegen wird von A eine grössere Energie entnommen, als an B abgeführt wird. Der Wärmemenge ist demnach die Energie analog, der Masse und dem Gewichte entspricht aber das Wärmegewicht Zeuners. In der eingangs erwähnten Schrift² glaube ich zuerst die historischen Umstände dargelegt zu haben, welche zu einer so verschiedenen Auffassung in Bezug auf die Wärmeenergie und andere Energieformen geführt haben. Die Verschiedenheit liegt theils in der Sache, theils in der historischen Übereinkunft.

5. In eben derselben Schrift habe ich auch versucht den Carnot'schen Gedanken zu verallgemeinern. Ich hatte bemerkt, dass für alle Energieformen, wenn ein Energietheil W' irgendwie umgewandelt wird, ein anderer Energietheil W , der Rest, von einem höhern Niveau V_1 auf ein tieferes V_2 sinkt, wobei die Gleichung 1 gilt, wenn wir W' , W , V_1 , V_2 beziehungsweise mit Q^1 , Q , T_1 , T_2 vertauschen. Selbstredend gelten dann auch die durch 1) gegebenen Gleichungen 2, 3, 4.

Der arbeitleistende umkehrbare Kreisprocess ist nicht auf Wärmevorgänge beschränkt. Es unterliegt keinerlei Schwierigkeit für beliebige andere Vorgänge, z. B. elektrische, analoge Kreisprocesse zu erdenken.³

Nach der treffenden Bemerkung von Popper (Die physik. Grundsätze der elektrischen Kraftübertragung. Wien 1884, S. 9) sollte statt h überall gh gesetzt werden. Um die Conformität mit bekannten Ausdrücken nicht zu stören, schreibe ich h .

A. a. O. S. 22 u. ff.

³ Ich pflege derartige Beispiele seit 20 Jahren gelegentlich in den Vorlesungen zu erörtern.

Es sei z. B. A ein zum Potential V_1 geladener Körper von sehr grosser Capacität, und B ein eben solcher mit dem Potential V_2 . Eine Kugel k dehne sich in leitender Verbindung mit A (isopotentiell) vom Radius r_0 auf r_1 aus, wobei A entzogen wird die Energie

$$W_1 = (r_1 - r_0) V_1^2.$$

Ferner finde eine weitere (adiabatische) Ausdehnung des isolirten k bis zum Radius r_2 und der Potentialabnahme auf V_2 statt. Hiebei ist $r_1 V_1 = r_2 V_2$. Es trete ferner eine (isopotentielle) Contraction auf r_3 in Verbindung mit B ein, bis die ganze von A aufgenommene Menge wieder an B abgegeben ist. Schliesslich werde k wieder isolirt (adiabatisch) auf r_0 zusammengedrückt, so dass die Kugel bei der ursprünglichen Ladung wieder das ursprüngliche Potential erhält. Aus letzterer Bedingung folgt die Gleichung $r_0 V_1 = r_3 V_2$.

Ferner folgt $(r_2 - r_3) V_2^2 = (r_1 - r_0) V_1 V_2$. Die an B abgegebene Energie ist also

$$W_2 = (r_1 - r_0) V_1 V_2.$$

Es besteht also wieder die Gleichung 2), auch wenn man W_1, W_2, V_1, V_2 an die Stelle von Q_1, Q_2, T_1, T_2 setzt. Ebenso gelten auch die Gleichungen 1, 3, 4.

Für den ökonomischen Coëfficienten erhalten wir im Fall der Wärme

$$\frac{Q'}{Q + Q'} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

und bei analoger Bezeichnung ebenso im Fall der Elektrizität

$$\frac{W'}{W + W'} = \frac{V_1 - V_2}{V_1}$$

6. Der umkehrbare Kreisprocess hat bei Carnot nur den Zweck, einerseits nutzlose, der mechanischen Arbeit nicht zugekommene Energieverluste zu vermeiden, andererseits unbekanntere unberechenbare (latente) Energien aus der Betrachtung zu beseitigen. Wo die Berücksichtigung dieser beiden Umstände unnöthig ist, bedürfen wir zur Aufstellung des

Carnot-Clausius'schen Satzes der Betrachtung eines Kreisprocesses nicht. Es genügt hiezu vielmehr die Kenntniss der Verwandelbarkeit der Energien in einander und jene des hiemit verbundenen Potentialfalles der verminderten Energieart.

Man kann ganz allgemein sagen: Wird von einer Energieart $W' + W$ vom Potential V_1 der Antheil W' in eine oder mehrere andere Formen verwandelt, so erfährt der Rest W einen Fall auf das Potential V_2 , wobei die Gleichung besteht

$$-\frac{W'}{V_1} + W\left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1}\right) = 0,$$

aus welcher auch die übrigen oben erwähnten Gleichungen folgen.¹

Für arbeitende elektrische, in Isolatoren versenkte Körper, z. B. ist die Heranziehung eines Kreisprocesses unnöthig, vollends dann, wenn man alle umgewandelte Energie, ob sie als kinetische oder potentielle Energie, als mechanische Arbeit, oder Wärme, oder in irgend einer andern Form erscheint, einfach zusammengezählt. Die Aufstellung in $\bar{5}$ ist also nur ein Specialfall der hier gegebenen, indem erstere nur auf das Maximum der mechanischen Arbeit Rücksicht nimmt. Auch für die Wärme lassen sich übrigens Prozesse erdenken, welche die Betrachtung eines Kreisprocesses entbehrlich machen. Wenn z. B. ein vollkommenes Gas von der Capacität c (bei constantem Volum) sich adiabatisch umkehrbar, Arbeit leistend ausdehnt, so ist die verwandelte Wärmemenge $Q' = c(T_1 - T_2)$, die übergeführte $Q = cT_2$, womit sofort die obigen Gleichungsformen gegeben sind.

7 Auf diesen Parallelismus im Verhalten verschiedener Energieformen ist in meiner Schrift von 1872, und zwar in der letzterwähnten allgemeineren Fassung, sowohl im Text, als auch in einer ausführlichen Anmerkung hingewiesen. Bei jeder Energie kommt der Energiewerth und der Niveauwerth in Betracht. Von den Mengenwerthen, welche durch die Quotienten W/V gegeben sind, ist zwar im Text, nicht aber in der Anmerkung besonders die Rede. Doch habe ich in einer später (1883)

¹ Vergl. Erhaltung d. Arbeit S. 54

erschienenen Schrift¹ auch der einander entsprechenden Mengenwerthe verschiedener Energien gedacht. Ich halte meine sehr knappe Darstellung auch heute noch für zutreffend, und habe, wie ich glaube, nichts Wesentliches zurückzunehmen.²

Gedanken, die in der Art oder dem Stoffe der Betrachtung mit den meinigen verwandt sind, wurden später noch mehrfach ausgesprochen von Popper³ (1884), Helm⁴ (1887), Wronsky⁵ (1888), Meyerhoffer⁶ (1891) und Ostwald⁷ (1892). Es liegt mir natürlich die Annahme fern, dass selbst diejenigen Autoren, welche meine Schrift gekannt haben, die Anregung zu ihren Betrachtungen lediglich aus derselben geschöpft haben.⁸ Sie hätten meinem Standpunkt schon sehr nahe sein müssen, um aus meiner kurzen Darlegung alle Consequenzen herauszulesen. Die persönlichen Unterschiede in der Auffassung treten auch deutlich genug hervor, um diese Annahme fern zu halten. Zudem handelt es sich hier lediglich um eine Verallgemeinerung eines Carnot'schen Gedankens, zu welcher eben Carnot selbst die Hauptanregung gegeben hat. Andererseits werden jedoch aufmerksame Leser meiner Schrift von 1872 wohl entnehmen, dass die angeführten späteren Publicationen mir nur wenig Neues bieten konnten.

Die Mechanik in ihrer Entwicklung, S. 469.

In »Erhaltung der Arbeit«, S. 54 in den letzten Zeilen der Note 3 steht fälschlich Geschwindigkeit statt Geschwindigkeitsquadrat.

Popper, Elektrische Kraftübertragung. Wien 1884.

⁴ Helm, Die Lehre von der Energie. Leipzig 1887

Wronsky, Das Intensitätsgesetz. Frankfurt a/O. 1888.

⁶ Meyerhoffer, Der Energieinhalt. Zeitschr. f. phys. Chemie. 1891, S. 544.

Ostwald, Studien zur Energetik. II Berichte d. sächs. Gesellsch. 1892, S. 211.

⁸ Popper erwähnt meine Schrift, doch ist seine Arbeit von der meinigen sicherlich unabhängig. Von Helm wird meine Schrift ebenfalls erwähnt. Wronsky kennt nur Helm. Meyerhoffer, dessen vergleichende Betrachtung sehr sympathisch ist, obgleich ich seinen Ergebnissen vielfach nicht zustimmen kann, scheint meine Schrift erst nach Abschluss seiner Arbeit kennen gelernt zu haben. Ostwald führt in Bezug auf die hier erörterten Fragen keine Vorgänger an. — An erkenntnisstheoretischer Aufklärung scheint mir die Popper'sche Schrift am reichsten zu sein, gleichwohl ist dieselbe in keinem physikalischen Referatenjournal besprochen worden.

8. Bisher war vorwiegend von der Übereinstimmung der Energieformen die Rede, über welcher die bestehenden Unterschiede nicht übersehen werden dürfen, die insbesondere die Wärme den andern Formen gegenüber darbietet. Nimmt man den oben bezeichneten Standpunkt an, so erkennt man, dass 1. die blosse genaue Kenntniss der Energieerhaltung genügt, um den Carnot-Clausius'schen Satz zu gewinnen, und dass 2. wegen Gültigkeit dieses Satzes für die verschiedenen Energieformen eine Sonderstellung der Wärme durch diesen Satz nicht bedingt sein kann.

9. Was zunächst den ersten Punkt betrifft, so lässt, wie bereits erwähnt, die volle Einsicht in die Energieerhaltung nicht nur die Umwandlung einer Energieart A in eine andere B , sondern auch den hiemit nothwendig verbundenen Potentialfall von A und Potentialanstieg von B erkennen. Dass die beiden Eigenschaften der Energieverwandlung in zwei verschiedenen Sätzen, den sogenannten beiden Hauptsätzen der mechanischen Wärmetheorie formulirt worden sind, ist eben nur darin historisch begründet, dass zwischen der Erkenntniss der einen und der anderen zwei Decennien liegen. Erst nach einem weiteren Decennium kommen beide Eigenschaften in der Carnot-Clausius'schen Fassung zum Ausdruck, welche nichts Anderes ist, als ein vollständigerer Ausdruck der Thatsache, von welcher der erste Hauptsatz nur eine Seite darstellt.¹ Das Analogon hiefür fehlt nicht in der Geschichte der Physik. Wie ich anderwärts dargelegt habe,² ging neben der Einsicht, dass die Kräfte beschleunigungsbestimmende Umstände sind, durch zwei Jahrhunderte das Trägheitsgesetz als ein besonderer Satz einher, obgleich in diesem Falle beide Sätze sogar identisch sind, indem der letztere die negative Umkehrung des erstern darstellt.

¹ Es scheint mir also nicht ganz richtig, wenn Meyerhoffer (a. a. O. S. 560) sagt, dass der zweite Hauptsatz mit dem ersten identisch ist. Sicherlich hat Carnot nur den Niveaufall, Mayer nur die Energieumwandlung im Auge gehabt. Es sind dies aber allerdings verschiedene Seiten desselben Vorganges, die von einander nicht getrennt werden können.

² Die Mechanik in ihrer Entwicklung, S. 131.

10. In Bezug auf den zweiten Punkt ist Folgendes klar: Analogie ist keine Identität. Die Wärme kann also noch besondere Eigenschaften aufweisen, und zeigt diese wirklich. Diese Besonderheit liegt aber in von dem Carnot-Clausius'schen Satze unabhängigen Umständen. Jede Umwandlung einer Energieart A ist an einen Potentialfall dieser Energieart gebunden, auch für die Wärme. Während aber für die anderen Energiearten mit dem Potentialfall auch umgekehrt eine Umwandlung und daher ein Verlust an Energie der im Potential sinkenden Art verbunden ist, verhält sich die Wärme anders. Die Wärme kann einen Potentialfall erleiden, ohne — wenigstens nach der üblichen Schätzung — einen Energieverlust zu erfahren. Sinkt ein Gewicht, so muss es nothwendig kinetische Energie, oder Wärme oder eine andere Energie erzeugen. Auch eine elektrische Ladung kann einen Potentialfall nicht ohne Energieverlust, d. h. ohne Umwandlung erfahren. Die Wärme hingegen kann mit Temperaturfall auf einen Körper von grösserer Capacität übergehen und dieselbe Wärmeenergie bleiben. Das ist es, was der Wärme neben ihrer Energieeigenschaft in vielen Fällen den Charakter eines (materiellen) Stoffes, einer Menge gibt.¹

Findet zwischen zwei Körpern von den Temperaturen T_1 , T_2 und den Capacitäten c_1 , c_2 Leitungsausgleich statt, so befolgt die Ausgleichstemperatur T die Gleichung

$$(c_1 + c_2) T = c_1 T_1 + c_2 T_2,$$

wobei also die Black'sche Wärmemenge, oder besser gesagt, die Wärmeenergie unverändert bleibt. Auch der Poten-

¹ Ein sich arbeitslos ausdehnendes Gas behält seine Temperatur. Ein sich ausdehnender Körper von gegebener elektrischer Ladung erfährt nothwendig einen Potentialfall. Es sieht so aus, als ob dies mit der fehlenden Fernwirkung der Wärme zusammenhängen würde. Ob übrigens der Wärme die Fernwirkung wirklich fehlt, ist doch fraglich. Nichts hindert uns, einen Thermostrom einfach als einen Wärmestrom aufzufassen, der dann gewiss eine Fernwirkung hat. (Vergl. die Bemerkung in meinem Leitfaden der Physik, 2. Aufl. 1891, S. 221, woselbst auch auf die Fernwirkung chemischer Vorgänge hingedeutet ist.)

tialausgleich elektrisch geladener Körper entspricht der Gleichung

$$(c_1 + c_2) V = c_1 V_1 + c_2 V_2,$$

allein die elektrische Energie nach dem Ausgleich ist kleiner als die Energiesumme $W_1 + W_2$ vor dem Ausgleich. Es ist nämlich erstere

$$\frac{c_1}{c_1 + c_2} W_1 + \frac{2}{c_1 + c_2} \sqrt{c_1 c_2 W_1 W_2} + \frac{c_2}{c_1 + c_2} W_2 < W_1 + W_2.$$

Es würde nichts im Wege stehen, an die Stelle der jetzt gebräuchlichen Temperaturzahlen T die Wurzeln derselben $\tau = \sqrt{T}$ zu setzen; dann würde man die Wärmeenergie durch $\frac{c}{2} \tau^2$ ganz analog der elektrischen Energie $\frac{c}{2} V^2$ messen können, die bezeichnete Incongruenz würde aber dadurch nicht beseitigt werden, sondern auf einer andern Seite hervortreten.¹

11. Diese Eigenheit der Wärme hat nun auch besondere Folgen. Für einen Körper, der einen beliebigen umkehrbaren geschlossenen Kreisprocess durchmacht, ist nach Clausius $\int \frac{dQ}{T} = 0$, oder, wenn man in irgend einem Augenblick den umkehrbaren Process abbricht, so ist der Werth $\int \frac{dQ}{T}$ durch den augenblicklichen Zustand des Körpers vollkommen bestimmt, beziehungsweise für denselben charakteristisch. Deshalb hat die bezeichnete Grösse von Clausius einen besonderen Namen, den Namen Entropie erhalten.

Die analoge Grösse für einen umkehrbaren Energieprocess anderer Art, z. B. einen elektrischen, ist $\int \frac{dW}{V}$. Die Nullsetzung dieses Ausdruckes für einen geschlossenen Process würde in diesem Fall nur den selbstverständlichen Satz ergeben, dass der Körper, beim ursprünglichen Zustand angelangt, wieder dieselbe Elektrizitätsmenge enthält. Für den einfachsten umkehrbaren Carnot'schen Process ist für alle Energieformen

$$-\frac{W_1}{V_1} + \frac{W_2}{V_2} = 0,$$

¹ Man beachte z. B. die wesentliche Verschiedenheit der beiden Capacitätsbegriffe.

d. h. die Entropieänderung des arbeitenden Körpers oder die Summe der Entropieänderungen der beiden Körper von grosser Capacität ist gleich Null.

Für die Wärme kann dies Verhältniss beim nicht umkehrbaren Process gestört werden. Während der Energiewerth einer schweren Masse, einer elektrischen Ladung u. s. w. mit abnehmender Niveauhöhe nothwendig im Verhältniss dieser Niveauhöhe sinkt, muss dies in Bezug auf die Wärme nicht stattfinden. Ja dieselbe kann im äussersten Falle bei der blossen Überleitung, auch ohne Änderung des Energiewerthes sinken, so dass $W_1 = W_2$. Da $V_1 > V_2$, so wächst hiebei die Entropie. Wenn also auch für jede Energieart ein Analogon der Entropie aufgestellt werden kann, so ist diese Grösse doch nur im Fall der Wärme einer Vermehrung fähig.¹

12. Wenn verschiedene Niveauwerthe von Energien derselben Art zusammentreffen, so hängt es noch ganz von besonderen physikalischen Umständen ab, ob sie sich ausgleichen, ob und welche Energieumwandlungen eintreten. Zum Ausgleich mechanischer Energien gehört Beweglichkeit, zum Ausgleich elektrischer Leitungsfähigkeit. Das Energieprincip bestimmt nur die Beträge der Umwandlung, nicht die Umstände, unter welchen dieselbe eintritt. Diese zu ermitteln ist Aufgabe der Specialphysik.

Beim Ausgleich mechanischer, elektrischer und anderer Niveauunterschiede können Schwingungen eintreten, periodische Umwandlungen der potentiellen in kinetische Energie, wobei dieselben Zustände wiederkehren, der Process im Ganzen sich umkehrt, wenn auch die Elemente desselben nicht im

¹ Es ist also zwar richtig, dass man, wie Meyerhoffer (a. a. O. S. 568, 571) sagt, für jede Energieart ein Analogon der Entropie angeben kann (vergl. meine Mechanik, S. 469), dagegen ist es unrichtig, dass diese Grösse bei jedem Potentialausgleich eine Vermehrung erfährt. Dies gilt nur für die Wärme. Auch seine doppelte Messung von $\frac{Q}{T}$ ist mir unverständlich, da ich einen Unterschied zwischen »Temperatur« und »Nummer der Isotherme« nicht zugeben kann. Mit der Entropie ist das Wärmegewicht $\frac{Q}{T}$ nicht zu verwechseln. Die erstere kann wachsen, der Werth von $\sum \frac{Q}{T}$ bleibt, die Summe der Wärmecapacitäten.

Carnot'schen Sinne umkehrbar sind.¹ Insofern hiebei eine Umwandlung in Wärme stattfindet, bleibt die Umkehrung aus. Bei Temperaturdifferenzen können auch Umwandlungen der Wärmeenergie in andere Formen, wie z. B. bei Erregung eines Thermostroms stattfinden. In diesem Fall kann aber auch ein einfacher Niveausgleich ohne Umwandlung eintreten.²

Es sind also ausserhalb des Carnot-Clausius'schen Satzes liegend physikalische Specialerfahrungen, aus welchen die Verschiedenheit im Verhalten der Wärme und der übrigen Energiearten hervorgeht.

Es ist auch klar, dass eine vollständige Übereinstimmung der Umwandlungsgesetze aller Energien ineinander unserm Weltbilde nicht entsprechen würde. Jeder Verwandlung müsste dann eine Rückverwandlung entsprechen, und alle physikalischen Zustände, welche einmal da waren, müssten wieder hergestellt werden können. Dann wäre die Zeit selbst umkehrbar, oder vielmehr, die Vorstellung der Zeit hätte gar nicht entstehen können.³

Ich glaube, dass man zwischen der Umkehrbarkeit im Carnot'schen Sinne und zwischen der spontanen Periodicität eines Processes unterscheiden muss. Wenn Meyerhoffer (a. O. S. 569) meint, dass der Ausgleich von Potentialen derselben Art stets nicht umkehrbar sei, so ist zu bemerken, dass ein solcher Ausgleich überhaupt nur für die Wärme möglich ist. Andere gleichartige Potentiale gehen einen solchen Ausgleich nicht ohne Umwandlung ein, und häufig kehren dabei dieselben Zustände periodisch wieder.

Diese Eigenheit der Wärme kann auch mit der fehlenden Trägheit zusammenhängen, d. h. mit dem Umstande, dass durch die Temperaturdifferenzen Ausgleichsgeschwindigkeiten und nicht Ausgleichsbeschleunigungen bestimmt sind. Ähnliches findet auch bei Potentialdifferenzen statt, wenn diese genügend klein, beziehungsweise die Dämpfung genügend gross ist. Man könnte auch sagen, elektrische Energie verwandelt sich durch den Widerstand in Wärme, Wärmeenergie aber wieder in Wärme.

³ Vergl. Mechanik, S. 210 und Analyse der Empfindungen, S. 166 u. ff. Flüchtige Leser meiner Schrift über die »Erhaltung der Arbeit« haben angenommen, dass ich daselbst die Existenz nicht umkehrbarer Vorgänge überhaupt läugne. Man wird aber keine Stelle finden, welche so verstanden werden könnte. Was ich über den in Aussicht gestellten »Wärmetod« des Weltalls sage, halte ich noch aufrecht, nicht deshalb, weil alle Vorgänge umkehrbar wären, sondern weil Sätze über die »Energie der Welt«, die »Entropie der Welt« keinen fassbaren Sinn haben. Derartige Aus-

13. Wenn man zum erstenmal die hier dargelegte Übereinstimmung in dem Umwandlungsgesetz der Energien bemerkt, so erscheint dieselbe überraschend und unerwartet, da man den Grund derselben nicht sofort sieht. Demjenigen aber, der das vergleichend-historische Verfahren befolgt, kann dieser Grund nicht lange verborgen bleiben.

Die Arbeit ist seit Galilei, wiewgleich lange ohne den jetzt gebräuchlichen Namen, ein Grundbegriff der Mechanik und ein wichtiger Begriff der Technik. Die gegenseitige Umwandlung von Arbeit in lebendige Kraft, und umgekehrt, legt die Energieauffassung nahe, welche Huygens zuerst in ausgiebiger Weise verwendet, obgleich erst Th. Young den Namen Energie gebraucht. Nimmt man die Unveränderlichkeit des Gewichtes (eigentlich der Masse) hinzu, so liegt es in Bezug auf die mechanische Energie schon in der Definition, dass die Arbeitsfähigkeit (oder potentielle Energie) eines Gewichtes proportional der Niveauhöhe (im geometrischen Sinne) ist, und dass dieselbe beim Sinken, bei der Umwandlung, proportional der Niveauhöhe abnimmt. Das Nullniveau ist hiebei ganz willkürlich. Hiemit ist also die Gleichung

$$\frac{W_1}{h_1} = \frac{W_2}{h_2},$$

aus welcher alle übrigen folgen, gegeben.

Bedenkt man den grossen Vorsprung der Entwicklung, den die Mechanik vor den übrigen Gebieten der Physik hatte, so ist es nicht wunderbar, dass man die Begriffe der ersteren überall, wo es angien, anzuwenden suchte. So wurde z. B. der Begriff der Masse in dem Begriff der Elektrizitätsmenge von Coulomb nachgebildet.¹ Bei weiterer Entwicklung der

drücke durfte sich Descartes erlauben; der heutigen naturwissenschaftlichen Kritik gegenüber können dieselben nicht Stand halten. Auch aus der a. a. O. von mir hervorgehobenen Ähnlichkeit der Energien folgt nicht das Fehlen aller Unterschiede derselben. — Man bemerke auch, dass selbst alle Vorgänge, die rückgängig gemacht werden können, schon in der Geschwindigkeit, Beschleunigung u. s. w. ein nicht umkehrbares Element, die Zeit, enthalten.

¹ In welcher Weise sich der Begriff Elektrizitätsmenge aus der Theilbarkeit und Übertragbarkeit der elektrischen Kraft in correcter Weise ergibt,

Elektricitätslehre wurde ebenso in der Potentialtheorie der Arbeitsbegriff sofort angewendet, und es wurde die elektrische Niveauhöhe durch die Arbeit der auf dieselbe gebrachten Mengeneinheit gemessen. Damit ist nun auch für die elektrische Energie ebenfalls die obige Gleichung mit allen Consequenzen gegeben. Ähnlich gieng es mit anderen Energien.

Als besonderer Fall erscheint jedoch die Wärmeenergie. Dass die Wärme eine Energie ist, konnte nur durch eigenartige Erfahrungen gefunden werden. Das Mass dieser Energie durch die Black'sche Wärmemenge hängt aber an zufälligen Umständen. Zunächst bedingt die zufällige geringe Veränderlichkeit der Wärmecapacität c mit der Temperatur und die zufällige geringe Abweichung der gebräuchlichen Thermometerscalen von der Gasspannungsscala, dass der Begriff Wärmemenge aufgestellt werden kann, und dass die einer Temperaturdifferenz t entsprechende Wärmemenge ct der Wärmeenergie wirklich nahezu proportional ist. Es ist ein ganz zufälliger historischer Umstand, dass Amontons¹ auf den Einfall kam, die Temperatur durch die Gasspannung zu messen. An die Arbeit der Wärme dachte er hiebei nicht. Hiedurch werden aber die Temperaturzahlen den Gasspannungen, also den Gasarbeiten, bei sonst gleichen Volumänderungen, proportional. So kommt es, dass die Temperaturhöhen und die Arbeitsniveauhöhen einander wieder proportionirt sind.

Wären von den Gasspannungen stark abweichende Merkmale des Wärmezustandes gewählt worden, so hätte dies Verhältniss sehr complicirt ausfallen können, und die eingangs betrachtete Übereinstimmung zwischen der Wärme und den andern Energien würde nicht bestehen. Es ist sehr lehrreich, dies zu überlegen.

So liegt also in der Conformität des Verhaltens der Energien kein Naturgesetz, sondern dieselbe ist vielmehr durch

habe ich in meinem Vortrag auf der Wiener Elektricitätsausstellung 1883 zu zeigen versucht. Zeitschrift des Vereins »Lotos«. Prag 1884.

¹ Amontons, Mémoires de l'Académie. Paris. Année 1699, S. 90 und 1702, S. 155.

die Gleichförmigkeit unserer Auffassung bedingt und theilweise ist sie auch Glückssache.¹

14. Auf dem Standpunkt, der oben bezeichnet wurde, bemerken wir neben der Conformität der Energien noch einen besonderen Unterschied zwischen der Wärme und anderen Energieformen. Zwar ist das Verhältniss der verwandelten Energie zur übergeführten für alle Formen $\frac{V_1 - V_2}{V_2}$, und das Verhältniss der verwandelten Energie zum Gesamtaufwande derselben, der ökonomische Coefficient, für alle Formen $\frac{V_1 - V_2}{V_1}$, allein der Nullpunkt des Niveaus ist für alle Energien mit Ausnahme der Wärme willkürlich, oder wenigstens nach Umständen veränderlich, für die Wärme liegt er hingegen bei -273° C. fest. Der Grund hievon ist, dass die physikalischen Zustände der Körper meist durch die Differenzen der Potentialwerthe gegen die Nachbarkörper bestimmt sind, während in Bezug auf die hier in Betracht kommenden Zustände nicht die Temperaturdifferenzen, sondern die Temperaturen² massgebend sind. Ob der Körper fest, flüssig, gasförmig, ist durch seine Temperatur bestimmt, und insbesondere geht die Gasspannung, auf die es hier ankommt, proportional der absoluten Temperatur. Der absolute Nullpunkt muss also beibehalten werden, wenn die Wärmeenergien den Niveauhöhen proportional bleiben sollen, was die Bedingung der betrachteten Conformität ist.³

Nach der Carnot'schen Auffassung müssen dieselben Verhältnisscoefficienten, welche für Gase gelten bei denselben Temperaturen für alle Körper ihren Werth behalten. Es scheint

Ich habe die Sache also wohl richtig dargestellt, indem ich »Erhaltung der Arbeit«, S. 45 sagte Lediglich durch diese Form unterscheidet sich aber das Gesetz der Erhaltung der Kraft von anderen Naturgesetzen. Man kann leicht jedem andern Naturgesetz, z. B. dem Mariotte'schen, eine ähnliche Form geben.

Vergl. Mechanik, S. 469.

³ Carnot verwendet den absoluten Nullpunkt nicht. Deshalb kann er die ökonomischen Coefficienten so zu sagen nur empirisch bestimmen. Es fehlt ihm ein übersichtlicher Ausdruck.

hiernach der absolute Nullpunkt eine ganz besondere physikalische Bedeutung zu haben. In der That hat man angenommen, dass eine Abkühlung unter diese Temperatur nicht denkbar ist, dass ein Körper von -273° C. gar keine Wärmeenergie enthält u. s. w.

Ich glaube jedoch, dass diese Schlüsse auf einer unzulässigen allzukühnen Extrapolation beruhen. Schon anderwärts habe ich bemerkt, dass die Temperaturzahlen nichts anderes sind als Ordnungszeichen, die wir gewissen Merkmalen des Wärmezustandes nach irgend einer Regel zuordnen. Die Endlichkeit oder Unendlichkeit dieses Zeichensystems kann nichts über die Endlichkeit oder Unendlichkeit der Reihe der Wärmezustände entscheiden; dies ist vielmehr gänzlich Sache der Erfahrung.¹

In Bezug auf den hier erörterten Punkt muss aber noch Folgendes hinzugefügt werden. Das Princip des ausgeschlossenen perpetuum mobile sagt uns nur, dass wir aus einem beliebigen Körper zwischen den gegebenen Temperaturen T_1 , T_2 denselben Arbeitseffect ziehen können, den wir empirisch als das Maximum bei einem vollkommenen Gas gefunden haben. Durch welche Formel dieser Effect dargestellt wird, thut nichts zur Sache. Das Princip erlaubt uns aber keinen Schluss auf das Verhalten eines vollkommenen Gases ausserhalb der Wärmezustandsgrenzen, innerhalb welcher dasselbe erprobt wurde, und demnach ebensowenig auf das Verhalten irgend eines Körpers ausserhalb dieser Grenzen. Könnten wir ein vollkommenes Gas mit der Spannung Null herstellen, so wäre dies zur Arbeit überhaupt nicht verwendbar. Daraus würde aber nicht folgen, dass bei diesem und tieferen Wärmezuständen nicht doch noch andere Mittel, z. B. Thermostrome, Arbeit liefern könnten.²

¹ Vergl. Artikel in der Zeitschr. f. physik. chem. Unterricht. 1887, S. 6.

Der Nullpunkt des Geschwindigkeitsniveaus, des elektrischen Potentialniveaus u. auf der Erde kann sich beim Zusammentreffen mit einem andern Weltkörper sofort ändern. Es hat deshalb keinen fassbaren Sinn von einer Energie der Erde, geschweige denn von einer Energie der Welt zu sprechen. Ist der Nullpunkt der Gasspannung allein von allen möglichen Ereignissen unabhängig?

15. Es sei noch gestattet, auf den Entwicklungsvorgang des Energiebegriffes überhaupt einen Blick zu werfen. Derselbe verdankt seinen Ursprung der Analogie. Es sind immer die stärksten und geläufigsten Vorstellungen und Begriffe, welche zur Darstellung neuer Thatsachen herangezogen werden, welche gewissermassen das Streben haben, an die Stelle weniger geläufiger Vorstellungen zu treten. Zu den geläufigsten unbewusst entstehenden Begriffen gehört der Substanzbegriff. Unter Substanz versteht man gewöhnlich das absolut Beständige. Ich glaube jedoch gezeigt zu haben, dass es ein solches nicht gibt, dass vielmehr nur Beständigkeiten der Reaction (um einen chemischen Ausdruck zu gebrauchen), Beständigkeiten der Verbindung oder Bedingung existiren. Jede physikalische Beständigkeit kommt schliesslich immer darauf hinaus, dass eine oder mehrere Gleichungen erfüllt sind, also auf ein bleibendes Gesetz im Wechsel der Vorgänge.¹

Dies gilt selbst in den einfachsten Fällen. Wenn ein starrer Körper sich bewegt, sich hiebei für uns vom Grunde lostrennt, mit Ausnahme seines Ortes alle Eigenschaften zu behalten scheint, so kann diese Auffassung der genauen Kritik nicht Stand halten. Alle Reactionen des Körpers (z. B. in Bezug auf den Gesichts- und Tastsinn) ändern sich hiebei, und sind allerdings unter wiederkehrenden gleichen Umständen dieselben. Eine beweglichere und darum physikalisch brauchbarere Substanzvorstellung entsteht durch die Betrachtung eines flüssigen oder doch theilbaren (quasi flüssigen) Körpers. Hier ist es eine Summe von Reactionen, die beständig bleibt. Was an dem einen Orte fehlt, kommt an einem andern zum Vorschein. Die mathematische Form, welche der Substanzbegriff annimmt, ist der Begriff einer beständigen unveränderlichen Summe. Der geübten mathematischen Phantasie macht es allerdings nur mehr einen geringen Unterschied, ob die

Vergl. »Über die ökonomische Natur der physikalischen Forschung« Almanach d. Wiener Akademie. 1882, S. 173. Mechanik. 1883, S. 475. Beiträge zur Analyse der Empfindungen. Jena 1886, S. 161. The Monist. Chicago 1892, S. 207, Anmerkung.

constante Summe geben, demnach als eine Substanz aufgefasst werden können.

Die Frage, was R. Mayer in dieser Sache geleistet hat, die von verschiedenen Personen in so ungleicher Weise beantwortet wird, lässt sich, wie ich glaube, nur richtig beantworten, wenn man die verschiedenen, hier in Betracht kommenden Momente trennt. Dass mechanische Reactionen mit Wärmereactionen, elektrischen Reactionen überhaupt zusammenhängen, kann in keinerlei Weise durch Speculation gefunden werden, noch weniger die quantitative Beziehung derselben. Es ist durchaus Sache der Erfahrung, diesen Zusammenhang zu ermitteln.

Die Erfahrung kann lehren, dass eine gewisse Gruppe von Reactionen ($\alpha, \beta, \gamma \dots$) durch eine andere ($\lambda, \mu, \nu \dots$) vollkommen bestimmt ist, d. h., dass die Änderung der einen jene der anderen nach sich zieht. Die Erfahrung kann ferner lehren, dass eine solche Änderung von ($\lambda, \mu, \nu \dots$) wieder rückgängig gemacht werden kann. Die widerspruchslöse Auffassung beider Erfahrungen bringt nun mit sich, dass dann der Stand von ($\alpha, \beta, \gamma \dots$) wieder genau derselbe ist, wie zuvor, womit in Anwendung auf mechanische Reactionen das Princip des ausgeschlossenen Perpetuum mobile schon gegeben ist.¹

Die Form der begrifflichen quantitativen Darstellung dieses Zusammenhanges ist hiemit noch nicht gegeben. Hier zeigt sich nun bei Mayer ein gewaltiges Bedürfniss nach der einfachsten substanziellen Auffassung, welches gewöhnlich, wie ich glaube, fälschlich, als ein metaphysisches bezeichnet wird.² Es ist ein formales Bedürfniss, in dessen Kundgebung allein schon ein grosses Verdienst liegen würde. Mayer hat aber auch die quantitative Schätzungsweise der mechanischen und Wärmereactionen gefunden, welche die substanzielle Auffassung ermöglicht, wengleich sein Ver-

¹ Erhaltung d. Arbeit. S. 43.

Mechanik, 2. Aufl. 1889, S. 486, 487. Analyse d. Empfindungen, S. 161, 162, 163. In den eben angeführten Schriften und in »Erhaltung der Arbeit« habe ich versucht, mich in die intellectuelle Situation Mayer's zu versetzen. Meine Auffassung ist durch die später (1889) von Preyer publicirten Briefe Mayer's vollkommen bestätigt worden.

fahren nicht ganz einwurfsfrei ist, und Joule in Bezug auf diesen Punkt durch umfassende Begründung der Zulässigkeit der Mayer'schen Anschauung sich ein grösseres Verdienst erworben hat.¹

Wie sehr das formale, das experimentelle und das quantitativ-begriffliche Moment zu trennen sind, ist leicht zu sehen. In Bezug auf die anderen Energien (z. B. Elektrizität) hat Mayer dasselbe Bedürfniss der substanziellen Auffassung, er kennt auch die Verwandelbarkeit elektrischer Reaction in mechanische und umgekehrt; in Bezug auf den quantitativen Zusammenhang muss er sich aber mit einem Programm begnügen, das allerdings der Fachphysiker ausführen kann.²

Es scheint mir nun, dass durch die Trennung der bezeichneten Momente die Mystik beseitigt wird, welche man so gern in das Energieprinzip hineinträgt. Das Prinzip kann allerdings nicht ohne die Kenntniss wichtiger Thatsachen (der Abhängigkeit verschiedener Reactionen von einander) angewendet werden; allein die Hauptsache an demselben ist die spontane selbstthätige formale Auffassung der Thatsachen. Es handelt sich nicht so sehr um die Entdeckung neuer Thatsachen (welche grösstentheils längst bekannt, nur der Aufmerksamkeit entzogen waren), als um die Entdeckung einer Form der Auffassung, wie bei Copernicus. Ich kann hierin meinen Standpunkt von 1872 aufrecht halten.

Man kann, wie ich anderwärts schon gezeigt habe,³ die Substanzauffassung überall anwenden, z. B. das Mariotte-Gay-Lusac'sche Gesetz in der Form ausdrücken

$$\log(p) + \log(v) + \log(T) = \text{Const.}$$

¹ Mayer konnte in der That nicht wissen, dass das mechanische Äquivalent von der Temperatur z. B. unabhängig ist, dass eine einfache Proportionalität zwischen Wärme und Arbeit besteht, u. s. Dies ist durch Joule's umfassende Experimente nachgewiesen worden. Dagegen hat Mayer allein von allen Forschern gesehen, dass gar keine neuen Experimente zur Bestimmung des Äquivalentes nöthig sind, sondern dass bekannte Zahlen hiezu genügen.

² Das Programm, welches Mayer in seiner Arbeit von 1845 gibt, erscheint bei Helmholtz (1847) ausgezeichnet durchgeführt.

³ Erhaltung der Arbeit, S. 45.

Selbstverständlich gilt diese Auffassung nur für das begrenzte Thatsachengebiet, für welches sie aufgestellt ist. Dies verhält sich aber in andern Fällen ebenso, z. B. in Bezug auf die Black'sche Wärmemenge. Wenn Clausius durch physikalische Untersuchungen für den umkehrbaren Process die Gleichung findet

$$-\frac{Q'}{T_1} + Q\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) = 0,$$

und aus derselben den Äquivalenzwerth $\mp \frac{Q}{T}$ für eine einem Körper entzogene, beziehungsweise zugeführte, oder in Arbeit verwandelte, beziehungsweise aus Arbeit entstandene Wärmemenge ableitet, so ist dieser Äquivalenzwerth eine Schätzungsweise, welche absichtlich so gewählt ist, dass die Substanzauffassung ausführbar ist. Aber schon für den nicht umkehrbaren Process gilt diese Substanzauffassung nicht mehr. Man darf auch den Äquivalenzwerth nur auf die zugeführten und entzogenen Wärmemengen, nicht aber auf die in den Körpern verbleibenden anwenden, wenn man nicht zu ganz andern Ergebnissen gelangen will als Clausius. Gleichen z. B. zwei Körper von den Capacitäten c_1, c_2 ihre Temperaturen T_1, T_2 durch Leitung aus, so wird die Wärme des einen gesenkt, die Wärme des andern gehoben. Wendet man hiefür den durch das zweite Glied der linken Seite der obigen Gleichung dargestellten Äquivalenzwerth an, so findet man als Summe der Äquivalenzwerthe

$$\frac{1}{T} [c_1(T_1 - T) + c_2(T_2 - T)] = 0,$$

während im Clausius'schen Sinn die Summe der Äquivalenzwerthe positiv ist.¹

Man sieht, dass bei Anwendung des Äquivalenzwerthes auf die im Körper schon enthaltene Wärme die Black'sche

¹ Dieser Punkt ist mir seit 20 Jahren bekannt, und ich habe ihn mehrmals in den Vorlesungen erörtert. Anfangs schien mir die Brauchbarkeit des Entropiebegriffes überhaupt in Frage zu stehen, doch fand ich bald die hier gegebene Aufklärung. Die Bemerkung ist übrigens nicht neu, sondern findet sich in etwas anderer Form in einer Schrift, die, wie es scheint, eine geringe Verbreitung gefunden hat, und die ich erst kürzlich kennen gelernt habe.

Substanz an die Stelle der Clausius'schen tritt. Die Begriffe Wärmemenge, Wärmegewicht, Äquivalenzwerth, Entropie¹ müssen also ebenso wie die Thatsachengebiete, für welche sie aufgestellt sind, sorgfältig auseinandergehalten werden.

17 Ist man einmal so weit gelangt, so stellt man sich naturgemäss die Frage, ob denn die Substanzauffassung des Energieprincips, welche allerdings innerhalb sehr weiter Grenzen gilt, eine unbegrenzte Giltigkeit hat? Das Energie-maass beruht darauf, dass man irgend eine physikalische Reaction zum Verschwinden bringen und mechanische Arbeit an die Stelle setzen kann, und umgekehrt. Es hat aber keinen gesunden Sinn einer Wärmemenge, die man nicht mehr in Arbeit verwandeln kann, noch einen Arbeitswerth beizumessen.² Demnach scheint es, dass das Energieprincip ebenso wie jede andere Substanzauffassung nur für ein begrenztes Thatsachengebiet Giltigkeit hat, über welche Grenze man sich nur einer Gewohnheit zu lieb gern täuscht.

Ich bin sicher, dass ein Zweifel an der unbegrenzten Giltigkeit des Energieprincips ebenso Befremden erregen wird, als ein Bezweifeln der Constanz der Wärmemenge die Nachfolger Blacks befremdet hätte. Man bedenke aber, dass jede herrschende Theorie das Streben hat, ihr Gebiet über die Gebühr auszudehnen. Leslie berechnete seinerzeit die Spannkraft und Masse des Wärmestoffes mit derselben Sicherheit und Überzeugungstreue als man heute die Massen, Geschwindigkeiten, mittleren Weglängen der Gasmolecüle berechnet. Es handelt sich hier überall nicht um einen Streit über Thatsachen, sondern um die Frage der Zweckmässigkeit einer Auffassung.

Plank, Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. München 1879.

Das Entropiegesetz in Bezug auf nicht umkehrbare Prozesse enthält insofern eine unvollständige Aufstellung, als eine Ungleichung eine Unbestimmtheit übrig lässt.

² Ich habe schon in »Erhaltung der Arbeit« meine Ableitung des Energieprincips auf Fälle beschränkt, in welchen die Prozesse wieder rückgängig gemacht werden können. In anderen Fällen wird man wohl vergebens versuchen, das Princip plausibel zu machen; es bleibt in letzteren eine rein willkürliche und müssige Ansicht. Vergl. Analyse d. Empfind. S. 163. Anmerkg.

18. Als Hauptergebnisse der vorliegenden Untersuchung können folgende hingestellt werden: Die Energien zeigen in ihrem Verhalten eine Übereinstimmung, welche darin ihren historischen Grund hat, dass die Niveauhöhen von vornherein im mechanischen Arbeitsmaass gemessen wurden. In Bezug auf die Wärmeenergie ist jedoch diese Übereinstimmung einem historischen Zufall zu danken. Neben dieser Übereinstimmung weicht die Wärmeenergie darin von den übrigen Energien ab, dass dieselbe einen Potentialfall ohne Energieabnahme erfahren kann, und dass der Nullpunkt des Niveaus nicht willkürlich gewählt werden kann. Das Energieprincip besteht in einer eigenthümlichen Form der Auffassung der Thatsachen, deren Anwendungsgebiet jedoch nicht unbegrenzt ist.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse](#)

Jahr/Year: 1892

Band/Volume: [101_2a](#)

Autor(en)/Author(s): Mach E.

Artikel/Article: [Zur Geschichte und Kritik des Carnot'schen Wärmegesetzes. 1589-1612](#)