

Montag, 25. Februar 2013

Entgegnung zum Gutachten der DPG über den Karlsruher Physikkurs

Überblick

Die Stellungnahme besteht aus drei Teilen. Im ersten Teil wird Literatur aufgeführt, die im Zusammenhang mit den im DPG-Gutachten angesprochen Problemen steht. Dabei wird nur knapp erläutert, auf welche Details sich die einzelnen Veröffentlichungen beziehen. Diese Literatur widerlegt die Einwände, die im Gutachten gemacht werden.

Im zweiten Teil wird zu den Vorwürfen im Einzelnen Stellung genommen.

Der dritte Teil ist eine Abhandlung von *Georg Job* vom Institut für Physikalische Chemie der Universität Hamburg. Job war der wichtigste Ideenlieferant für die Teile Thermodynamik und Chemie des KPK, nämlich die Kapitel 10 bis 14 und 24 bis 26 in den Bänden für die Sekundarstufe I sowie der ganze Band 2 für die Sekundarstufe II.

Dem KPK zu Grunde liegende Literatur

Zur Mechanik mit Impulsströmen

Die Äquivalenz von Kraft und Impulsstrom (genauer Impulsstromstärke) wurde erstmals von Max Planck gezeigt.

M. Plack: Physikalische Zeitschrift, 9. Jahrgang, Nr. 23 (1908), S. 828

Auszug: „Wie die Konstanz der Energie den Begriff der Energieströmung, so zieht notwendig auch die Konstanz der Bewegungsgröße den Begriff der ‘Strömung der Bewegungsgröße’, oder kürzer gesprochen: der ‘Impulsströmung’ nach sich.“

Danach findet man das Konzept Impulsstrom in der physikalischen Literatur, allerdings erscheint es zunächst als ein Konzept für Fortgeschrittene.

Weyl, H.: Die Naturwissenschaften 12, III (1924)

Landau, L. D., Lifshitz, E. M.: Theory of Elasticity, Chapter 1, Section 2, Pergamon press, Oxford (1959)

Landau, L. D., Lifshitz, E. M.: The Classical Theory of Fields, Chapter 4, S. 91, Pergamon press, Oxford (1962)

Falk, G.: Physik – Zahl und Realität, Birkhäuser Verlag Basel, 1990, S. 70.

Fuchs, H.: The Dynamics of Heat, 2nd edition, Springer, New York, 2010, S. 75.

Dass es ein Potenzial hat, die Anfängermechanik zu vereinfachen, wurde Ende der siebziger Jahre vorgeschlagen, und zwar fast gleichzeitig von uns und von A. diSessa am MIT. (Die beiden Publikationen erschienen unabhängig voneinander. Der amerikanische Artikel erschien zwar etwas später, aber diSessa konnte von unserer Arbeit noch nichts wissen.)

Herrmann, F.: Mechanik – Abriß einer Neudarstellung, Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts, Heft 3, Hermann Schroedel Verlag, Hannover (1979), S. 80-87.

DiSessa, A.: Momentum flow as an alternative perspective in elementary mechanics, Am. J. Phys., Volume **48** 365-369 (1980)

Die Anwendbarkeit der Impulsstromdarstellung auf Fragen auf mittlerem Niveau wurde durch unsere Arbeitsgruppe untersucht. Daraus hervorgegangen sind mehrere Arbeiten:

Herrmann, F., Schmid, Gary B.: Statics in the momentum current picture, Am. J. Phys. **52**, 146 (1984)

Herrmann, F., Schmid, Gary B.: Momentum flow in the electromagnetic field, Am. J. Phys. **53**, 415 (1985)

Herrmann, F., Schmid, Gary B.: Analogy between mechanics and electricity, Eur. J. Phys. **6**, 16-21 (1985)

Heiduck, G., Herrmann, F., Schmid, Gary B.: Momentum flow in the gravitational field, Eur. J. Phys. **8**, 41-43 (1987)

Grabois, M., Herrmann, F.: Momentum flow diagrams for just-rigid static structures, Eur. J. Phys. **21**, 591-601 (2000)

Zur Entropie als Wärme

Dass sich die Eigenschaften der Entropie weitgehend mit denen der umgangssprachlichen Wärme decken, und dass die Entropie weitgehend übereinstimmt mit dem Wärmebegriff in der Zeit von etwa 1780 bis 1850 (der einer Zustandsgröße entsprach), wurde seit Anfang des 20. Jahrhunderts in der wissenschaftlichen Literatur mehrere Male hervorgehoben.

Callendar, H. L.: The caloric theory of heat and Carnot's principle, Proc. Phys. Soc. London **23**, p. 153 (1911)

Auszug: „Finally, in 1865, when its importance was more fully recognised, Clausius (Pogg. Ann. 125, p. 390) gave it the name of 'entropy', and defined it as the integral of dQ/T . Such a definition appeals to the mathematician only. In justice to Carnot, it should be called caloric, and defined directly by his equation $W = AQ(T - T_0)$, which any schoolboy could understand. Even the mathematician would gain by thinking of caloric as a fluid, like electricity, capable of being generated by friction or other irreversible processes. Conduction of caloric is closely associated with the electrons, and the science of heat would gain, like the science of electricity, by attaching a more material conception to the true measure of a quantity of heat, as distinguished from a quantity of thermal energy.“

Job, G.: Neudarstellung der Wärmelehre– Die Entropie als Wärme, Akademische Verlagsgesellschaft Frankfurt (1972)

Hund, F.: Geschichte der physikalischen Begriffe (Teil2) B·I·-Hochschultaschenbücher Bd. 544, Bibliogr. Institut Mannheim (1978)

Auszug S.105: „Historisch ist der am Mischungskalorimeter im 18. Jahrhundert entstandene und bei der Wärmeleitung im 19. Jahrhundert bewährte mit Q bezeichnete Begriff an den Anfang der quantitativen Wärmelehre gekommen, und S ist sehr viel später damit verknüpft worden. Irreversible Vorgänge standen also am Anfang. Man könnte (nach G. Job¹) heute auch den am reversiblen Carnot-Prozess gewonnenen Begriff S an den Anfang einer Lehre von den Wärmeerscheinungen stellen und Wärme nennen. Zum Verständnis des Kalorimeters und der Wärmeleitung käme man dann über den Energiesatz, mit dem man neben dem Begriff der Entropie-(„Wärme“-)Zufuhr $\Delta_z S$ und der Entropie-(„Wärme“-)Produktion $\Delta_p S$ einen Begriff der thermischen Energiezufuhr ΔQ und spezifischer thermischer Energien c_p und c_v gewinnen könnte.“

Falk, G.: Entropy, a resurrection of caloric – a look at the history of thermodynamics, Eur. J. Phys. **6**, 108-115 (1985)

Auszug: „Entgegen weit verbreiteter Lehrmeinung handelte es sich bei der durch Clausius eingeführten Entropie keineswegs um eine neue Größe der Physik, sondern um die Rekonstruktion einer viel älteren Größe, nämlich der hundert Jahre früher von dem schottischen Chemiker Black konzipierten 'Quantity of heat'. Dieselbe Größe benutzte Carnot unter dem Namen Calorique in seiner berühmten Abhandlung, in der er die Grundlagen der Thermodynamik entwickelte. Dass Entropie und Wärmemenge (im Sinne Blacks) lediglich zwei verschiedene Namen für dieselbe Größe sind, ist nicht nur für die Geschichte der Physik von Bedeutung, sondern sollte es vor allem für ihre Didaktik sein – besagt es doch, dass die Entropie anschaulich verstanden werden kann als die Menge von Wärme. Diese wie eine Art Substanz betrachtete Wärme befolgt einen 'halben' Erhaltungssatz: Sie kann zwar erzeugt, aber nicht vernichtet werden.“

Job, G., Rüffler, R.: Physikalische Chemie - Eine Einführung nach neuem Konzept mit zahlreichen Experimenten, Vieweg+Teubner Verlag, 2010.

Auszug S. 45: „Kernbegriffe der Wärmelehre sind Entropie S und Temperatur T . Während die Temperatur jedoch jedermann geläufig ist, gilt die Entropie als besonders schwierig, sozusagen als „schwarzes Schaf“ unter den physikochemischen Begriffen. Schulbücher haben sie früher ganz übergangen, einführende Physikbücher haben sie oft nur erwähnt und selbst Fachleute umgehen sie gern.

Doch warum meidet man eigentlich die Entropie? Denn an sich ist sie etwas ganz Einfaches: recht genau das, was man sich im Alltag unter Wärme vorstellt! Sie ist, grob gesagt, das Etwas, was man in einem Suppentopf anreichern muss, um das Kochgut zu erwärmen, was der Kaffee verliert, wenn er in der Tasse erkaltet, was in der elektrischen Herdplatte, dem Mikrowellenherd, dem Ölofen erzeugt wird oder was im heißen Wasser befördert, über die Heizkörper verteilt und durch wärmedämmende Wände in der Wohnung und wollene Kleidung im Leib zusammengehalten wird. Leider wurde früher der Name „Wärme“ in der Wissenschaft an eine andere Größe vergeben und damit S einer natürlichen Deutung beraubt. So wurde die Entropie nur abstrakt einführbar, d. h. indirekt durch Integration eines aus Energie und Temperatur gebildeten Quotienten definiert, und damit begrifflich schwer zu handhaben.“

Fuchs, H.: The Dynamics of Heat, Springer New York 2010

Auszug S. 116: „The quantity I have been calling *heat* in the interpretations of thermal processes was called caloric by Sadi Carnot and his contemporaries. This easily visualized and intuitively understood quantity best fits what after 1850 was called *entropy* in physics, chemistry, and engineering. Therefore, the concept of entropy which, in standard presentations of thermodynamics is considered to be formal, derived, and non-intuitive, has simple and intuitive roots. It is analogous to volume and to charge in fluids and electricity, respectively.“

Magnetische Ladung und magnetische Monopole

Die Größe, die im KPK magnetische Ladung genannt wird, heißt in der Literatur meist *magnetische Polstärke*, manchmal auch *magnetische Ladung* und bei Maxwell *Menge des Magnetismus*.

Maxwell, J. C.: Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus, Verlag von Julius Springer 1883, zweiter Band

Auszug, S. 7: „377. Die Menge Magnetismus, die ein Pol eines Magnets beherbergt, ist stets der Größe nach gleich und dem Zeichen nach entgegengesetzt der Menge Magnetismus, die der andere Pol desselben in sich birgt.

Allgemeiner: In jedem Magnete ist die Gesamtmenge an Magnetismus algebraisch genommen gleich Null.“

Sommerfeld, A.: *Elektrodynamik*, Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig 1964

Auszug, S. 39: „Wir gehen jetzt auf (9) zurück und bilden die Divergenz der links und rechts stehenden Vektoren. Dann folgt die Poissonsche Gleichung der Magnetostatik, nämlich

$$\Delta\psi = -\rho_m.$$

Auszug S. 78: „Wir kehren noch einmal zum Stabmagneten und zur Definition seiner Polstärke P zurück. Sie wird von unserem Standpunkt aus als Quantitätsgröße gegeben durch

$$P = \oint H_n d\sigma,$$

[...]. Diese Definition von P entspricht der Definition (7.2) der magnetischen Raumdichte $\rho_m = \operatorname{div} H$ und besagt, dass P gleich der Summe aller in der betreffenden Stabhälfte vorhandenen magnetischen Mengen $\rho_m d\tau$ ist.“

Macke, W.: *Elektromagnetische Felder*, Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig, 1960

Auszug S. 78: „Alle Folgerungen und Lösungen der elektrostatischen Theorie (1) lassen sich daher unmittelbar auf die Magnetostatik (2) übertragen. Als magnetische Ladungsdichten kommen allerdings nur solche in Frage, die durch Dipole hervorgerufen werden. Entsprechend (224.7) beschreibt

$$\rho_m(\vec{r}) = -\sum_i \vec{m}_i \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) \quad \vec{m} = q_m \vec{a}$$

die Magnetpoldichte magnetischer Dipole m_i , die sich an Orten \vec{r}_i befinden.“

Jackson, J. D.: *Classical Electrodynamics*, 2nd edition, John Wiley & Sons New York, 1975

Auszug S. 193: „Then with (5.93) it becomes a magnetostatic Poisson equation,

$$\nabla^2 \phi_M = -4\pi\rho_M$$

with the effective charge density,

$$\rho_M = -\nabla \cdot \mathbf{M} \text{ (Hier is M die Magnetisierung.)}$$

Bemerkungen zu den einzelnen Einwänden

Mit „der Autor“ ist im Folgenden der Autor des Textes des DPG-Gutachtens gemeint. Zitate aus dem Gutachten sind eingerückt.

Zur Mechanik mit Impulsströmen

Seite 2 und Seite 3

Wenn Kraft bzw. KPK-Impulsstrom als Ursachen den Wagen in gleichem Maße beschleunigen, müssten eigentlich beide Größen in Betrag und Richtung gleich groß sein. Während dies bei den Beträgen zutrifft, kann es bei den Richtungen Unterschiede geben, wie im Folgenden gezeigt wird.

...

In Abb.2a zieht ein Lastwagen einen Anhänger nach rechts (diese Situation ist mit der aus Abb. 1 vergleichbar). Der KPK-Impulsstrom zeigt nach links, während der Kraftpfeil nach rechts zeigt. In der nächsten Abb. 2b ist der Lastzug um 180° gedreht worden: Dem KPK zufolge hat sich die Richtung des KPK-Impulsstroms beim Übergang von Abb. 2a nach 2b nicht verändert. Dagegen ist die Richtung der Kraft der Drehung des Lastzugs um 180° gefolgt: In beiden Fällen, Abb. 2a und 2b, zeigt die Kraft in Richtung der Zugmaschine. Das ist auch vernünftig, weil sie die Ursache für die Beschleunigung des Anhängers ist.

Die Probleme des Autors kommen daher, dass er die Stromrichtung mit der Richtung des **Stromstärkevektors** verwechselt.

Unter der Richtung des Stroms einer skalaren Größe versteht man in der Physik allgemein die Richtung des **Stromdichtevektors**.

Ist die strömende Größe selbst, und damit auch die Stromstärke, ein Vektor, so ist die Stromdichte ein Tensor zweiter Stufe, gewöhnlich mechanischer Spannungstensor genannt. Man kann nun die drei kartesischen Komponenten des Impulses und der Impulsstromstärke einzeln betrachten und mit ihnen umgehen wie mit 3 Skalaren (unter der Voraussetzung, dass man das Koordinatensystem nicht mehr dreht). Zu jeder der drei Impulskomponenten gibt es nun wieder einen Stromdichtevektor, und damit eine Stromrichtung. Die Komponenten dieser drei Vektoren sind gerade die drei Zeilen des Spannungstensors (in kartesischer Komponentenschreibweise). Die Richtung der drei Impulsstromdichte-Vektoren ist natürlich zu unterscheiden von der Richtung des Stromstärke-(= Kraft-)Vektors. Der Autor des Gutachtens hat anscheinend diese beiden Richtungen miteinander identifiziert.

In dem entsprechenden Unterrichtsteil sind noch keine Vektoren eingeführt. Es wird also nur mit Impuls- und mit Impulsströmen einer einzigen Richtung gearbeitet. Es gibt noch keinen Stromstärkevektorpfeil, da nur die eine Komponente der Stromstärke auftritt. Es gibt dagegen eine Stromrichtung: die Richtung des Stromdichtevektors.

Dass man die Richtungen des Impulses und die der Stromdichten voneinander unterscheiden muss, wird im Unterricht ausführlich behandelt in Kapitel 6, Abschnitt 6.2 unter der Überschrift „Die Richtung des Stroms und die Richtung dessen was strömt“. Dort wird auch der folgende Merksatz formuliert: *Verwechsle nicht die Richtung des Weges mit der Richtung des transportierten Impulses.*

Eine weitere Schwierigkeit tritt auf, wenn sich z.B. zwei Schüler über die Ausrichtung ihrer Koordinatensysteme nicht einigen können. Dann werden sie verschiedene Antworten auf die Frage nach der Richtung des KPK-Impulsstroms geben. Und beide Antworten können gleichzeitig richtig sein! In Anbetracht solcher Probleme beginnt man zu sich zu fragen, ob der Richtung des KPK-Impulsstroms überhaupt eine objektive Realität zukommt und sie nicht nur eine willkürliche Festsetzung ist. Diese Überlegungen werden im nächsten Abschnitt noch vertieft.

Das ist in der Tat ein Problem. Aber solche „willkürlichen“ Festsetzungen haben wir überall in der Physik. Wenn wir den Wert einer physikalischen Größe angeben wollen, müssen wir den Nullpunkt bzw. Bezugssystem wählen. Ein Auto fährt relativ zur Erde mit 40 km/h in Richtung Osten. Ist die Geschwindigkeit positiv oder negativ? Das hängt davon ab, in welche Richtung man die Geschwindigkeitsachse orientiert. Aber man kann die Geschwindigkeit auch angeben in Bezug auf irgendeinen anderen Bezugskörper, die Sonne zum Beispiel. Damit müssen die Schüler auch klarkommen. Das ist Teil des Physikunterrichts. Diese Probleme treten auf, sobald wir ein Naturphänomen mathematisch beschreiben.

Seite 4

Da an dem System keine Bewegung zu erkennen ist, müsste ein aufgeweckter Schüler eigentlich fragen, wie man denn nachweisen könne, dass wirklich etwas durch die Feder fließt. Eine etwas schwierigere Frage könnte lauten: Warum ist an einem offensichtlich symmetrischen System eine Richtung vor der anderen ausgezeichnet? Und wenn der Lehrer das schon behauptet, wie kann er uns das beweisen?

...

Gibt es nun ein dem Amperemeter vergleichbares Instrument für den KPK-Impulsstrom? Ein solches Instrument wird in dem Schulbuch für den KPK nicht beschrieben.

Doch, ein solches Instrument wird im KPK beschrieben, auf Seite 36:

- verlängerte Feder: Impulsstrom in die eine Richtung,
- verkürzte Feder: Impulsstrom in die andere Richtung.

Die käuflichen Kraftmesser kann man nicht auf Druck beanspruchen.

Nebenbei: Wir haben einen Impulsstrommesser gebaut, den man auch umpolen kann. Wie ein Amperemeter nach dem Umpolen in die andere Richtung ausschlägt, so schlägt dieser Impulsstrommesser nach dem Umpolen in die andere Richtung aus. Wichtig ist dabei: Umpolen bedeutet nicht, dass man das Gerät einfach im Raum umdreht (das würde beim Amperemeter auch nicht zu einem anderen Ausschlag führen), sondern, dass man die Anschlüsse „innen“ und „außen“ vertauscht. Mit „innen“ ist der innere Stab, mit „außen“ der äußere Zylinder des Kraftmessers gemeint.

Der Kraftmesser ist deshalb mit der Glühbirne im elektrischen Fall vergleichbar, aber nicht mit dem Amperemeter.

Die Vorzeichen-Unempfindlichkeit der Glühlampe kommt von der Gleichung $P = U \cdot I$, in der beide Faktoren ihr Vorzeichen wechseln, wenn die elektrische Stromrichtung umgekehrt wird. Das Entsprechende ist beim Federkraftmesser nicht der Fall. Der Kraftmesser entspricht also in dieser Hinsicht dem Amperemeter.

Damit kann auch die Richtung des KPK-Impulsstroms willkürlich, d.h. unabhängig vom Geschehen im System allein durch eine neue Wahl des Koordinatensystems verändert werden. Wir schließen daraus: die Richtung des KPK-Impulsstroms ist keine Eigenschaft des Systems.

Die Tatsache, dass sich Vorzeichen und Beträge bei Bezugssystemwechsel ändern, heißt nicht, dass die entsprechenden Größen keine Eigenschaften des Systems beschreiben.

Seite 5

Es gibt diesen Strom in der Natur nicht. Damit hat der KPK-Impulsstrom auch keinen Platz im Gebäude der Physik und ganz gewiss auch nicht im Physikunterricht.

Ob es den Impulsstrom im Gebäude der Physik gibt, erkennt man daran, ob er in Büchern und sonstigen Veröffentlichungen auftritt, und das tut er.

Entropie und Wärme in der Thermodynamik

Seite 6

Auch bei den Begriffen Wärme und Energie bringen die Schüler ein gewisses Vorverständnis mit. Das gilt sicher nicht für die Entropie.

Hier sind wir anderer Meinung. Die Schüler haben ein gutes Vorverständnis für die Entropie, siehe auch die angegebene Literatur. Etwa Callendar: „In justice to Carnot, it should be called caloric, and defined directly by his equation $W = AQ (T - T_0)$, which any schoolboy could understand.“

Bekanntermaßen ist Entropie eine der schwierigsten Größen der Physik.

Dies ist eine weit verbreitete Meinung. Die entgegengesetzte Meinung ist allerdings auch verbreitet. (Siehe die angegebene Literatur)

Seite 7

Aber deshalb ist Entropie noch lange nicht der Wärme gleichzusetzen, auch keiner „umgangssprachlich“ so bezeichneten. Beide haben verschiedene Maßeinheiten, können also schon deshalb nicht gleich sein. Wärme misst man in Joule. Entropie in Joule/Kelvin.

Es trifft nicht zu, dass wir die Entropie mit der Wärme oder einer anderen energetischen Größe gleichsetzen.

Die Logik des Satzes stimmt auch nicht ganz. Man kann nicht sagen, dass man die umgangssprachliche Wärme in Joule misst.

Was wir tun, ist etwas, was im Physikunterricht gang und gäbe ist: Wir versuchen eine Anschauung von einer Größe zu erzeugen, indem wir zeigen, dass sie etwas misst, das wir aus dem Alltagsleben kennen.

Hier als Beispiel, wie man die Einführung der Kraft beginnt. Es sind Zitate aus zwei angesehenen Hochschulbüchern:

„Ebenso wie die Begriffe Länge und Zeit besitzt auch der Kraftbegriff eine unmittelbar anschauliche Bedeutung, die keiner weiteren Erklärung bedarf. Körperliche Kraft wird durch Muskeln ausgeübt, sie wird als eine Muskelempfindung vom Ausübenden erlebt.“

„Wir meinen, daß wir in unserem Muskelgefühl eine unmittelbare, wenigstens *qualitative* Vorstellung des Kraftbegriffs besitzen.“

Diese Zuordnung zwischen der Größe Kraft und dem Muskelgefühl ist gewiss nicht eindeutig.

Der KPK stützt seine Argumentationen fast ausschließlich auf die Gleichung $\Delta S = \Delta Q/T$, die im eingeschränkten Fall einer reversiblen Wärmezufuhr oder -abfuhr ΔQ bei einer Temperatur T die Entropieänderung ΔS angibt.

Die Gleichung kommt im KPK nicht vor. Die Autoren machen möglicherweise keinen Unterschied zwischen

$$\Delta S = \Delta Q/T$$

und

$$P = T \cdot I_S$$

(P = Leistung, I_S = Entropiestrom).

Ein wichtiger Unterschied in den Aussagen der beiden Beziehungen ist, dass sich die erste auf einen Raumbereich, die zweite auf eine Fläche bezieht. Die zweite ist daher unabhängig davon, ob Entropie produziert wird oder nicht.

Er wendet die Gleichung unverändert auch bei irreversiblen Prozessen an, obwohl dort $\Delta S \geq \Delta Q/T$ gilt.

Nein, er wendet sie nicht an.

Damit behindert er den Zugang zu den für das Verständnis unserer Welt so ungeheuer wichtigen irreversiblen Prozessen.

Irreversible Prozesse sind eines der zentralen Themen der Thermodynamik im KPK. Sie werden ab der 5. Unterrichtsstunde der Thermodynamik der Mittelstufe ausführlich behandelt.

Es gibt wichtige Prozesse, in denen die obige Formel gar nicht anwendbar ist, weil sich die Entropie als Zustandsgröße ohne Wärmezufuhr verändert.

Wir wenden die obige Formel nicht an. Dass sich die Entropie ohne Wärmezufuhr ändern kann, wird im Unterricht ausführlich behandelt, siehe Mittelstufenband 10.5 und 11.3, und Oberstufenband 1.5, 1.11, 2.7 und 7.4.

Seite 8

... so dass nach dem Temperatenausgleich mehr Entropie in dem System aus beiden Behältern ist als am Anfang. Das ist keineswegs ein kleiner Effekt, den man übergehen dürfte, sondern diese Entropiezunahme ist das Wesentliche an diesem Versuch überhaupt! Sie ist der eigentliche Antrieb für diesen Prozess: Die Entropiezunahme legt fest, dass der Wärmeaustausch vom heißeren zum kälteren Behälter erfolgt, aber eben niemals umgekehrt. Dieser entscheidende Aspekt wird vom KPK einfach verschwiegen.

Den fachlichen Bemerkungen des Gutachters stimme ich zu. Die Frage ist nur, wie man das im Unterricht macht. Im KPK wird die Rolle der Entropieerzeugung bei der Wärmeleitung auf S. 133 behandelt. Man kann uns nicht vorwerfen, etwas nicht an einer bestimmten Stelle des Unterrichtsgangs zu tun. Hinzu kommt, dass dieses Thema in den meisten Schulbüchern überhaupt nicht behandelt wird.

Seite 9

Hier stolpert der KPK über seine eigene Definition, dass nämlich die Entropie nur erhöht werden kann, wenn Wärme zugeführt wird und sich damit die Temperatur erhöht.

Das sagt der KPK nicht, das wäre unsinnig. Er sagt etwas anderes: Die Entropie nimmt zu durch Entropiezufuhr oder -produktion. Im vorliegenden Beispiel liegt Produktion vor, und das wird auch gesagt.

Hier verweist der KPK auf eine frühere Beobachtung, wo bei der Expansion eines Gases die Temperatur gesunken war. Dabei handelte es sich um eine adiabatische Expansion, bei der das Gas Arbeit verrichtet. Der KPK betont zutreffend, dass bei einem solchen Prozess die Entropie konstant bleibt, benutzt ihn aber - für uns nicht nachvollziehbar -, um die Expansion ins Vakuum zu erklären, bei der die Entropie zunimmt, wie der KPK schließlich selbst feststellt! Davon unabhängig sieht man sofort ein, dass sich die Temperatur des Gases nicht verändert, weil bei der Expansion ins Vakuum keine Arbeit nach außen verrichtet wird.

Das Verfahren, das der KPK hier benutzt, ist in der Thermodynamik gang und gäbe. Um zu verstehen, wie sich bestimmte Größen bei einem Übergang von einem Zustand A in einen Zustand B verhalten, geht man einen anderen Weg als den, den das System tatsächlich genommen hat. Dieses Vorgehen kann das Bilanzieren erleichtern. Im KPK wird der Übergang vom Zustand mit dem kleinen Volumen in den mit dem großen auf einem anderen Weg als der freien Expansion durchgeführt: Zuerst eine isentrope Expansion. Dabei nimmt die Temperatur ab. Um in den sich tatsächlich einstellenden Endzustand B zu gelangen muss man Entropie von außen zuführen. Auf diese Art versteht man, dass die Entropie von B tatsächlich größer sein muss als die von A. Und damit weiß man: Bei konstanter Temperatur enthält ein Gas um so mehr Entropie, je größer sein Volumen ist. Wenn der Autor, dieses Ergebnis an den Anfang stellen will, so ist das eine methodische Entscheidung, gegen die nichts einzuwenden ist. Wir haben einen anderen Weg gewählt. Siehe zu unserem Verfahren auch *Falk-Ruppel*, S. 248-249.

Seite 10

Der KPK geht auf diese physikalische Tatsache überhaupt nicht ein, sondern gibt in Tab. 1.3 ([5], S. 14) Werte für die Entropieleitfähigkeit von Stoffen an, indem er einfach die Wärmeleitfähigkeit durch eine willkürlich gewählte mittlere Temperatur teilt.

Nein, es wird nicht durch eine willkürlich gewählte mittlere Temperatur geteilt. Wenn man überhaupt so genaue Werte verwenden wollte, müsste man die normale, energetische Wärmeleitfähigkeit bei einer bestimmten Temperatur nehmen und durch genau diese Temperatur dividieren. Beide, die Wärmeleitfähigkeit und die Entropieleitfähigkeit sind temperaturabhängig.

Er setzt zwei physikalisch unterschiedliche Größen gleich und begeht damit einen elementaren Fehler. Die an den Anfang gestellte, fundamental falsche Identifikation von Entropie und Wärme führt sofort zu Widersprüchen.

Noch einmal: Wir setzen nicht zwei unterschiedliche Größen gleich, und wir identifizieren nicht Entropie und physikalische Wärme.

Magnetische Ladungen

Seite 11

Das ist kein Einzelfall, sondern wie oben schon berichtet ist bisher die Suche nach magnetischen Monopolen erfolglos geblieben. Also gibt es für magnetische Ladungen bisher keine experimentelle Rechtfertigung.

Der Autor unterscheidet nicht zwischen dem physikalischen System „magnetisch geladenes Teilchen“ und der physikalischen Größe „magnetische Ladung“. Körper oder Teilchen, die eine magnetische Nettoladung tragen, gibt es nicht. Aber schon um diese Tatsache auszudrücken, braucht man die physikalische Größe magnetische Ladung. Es ist aber sicher nicht meine Aufgabe, diese Größe zu verteidigen. Es gibt sie in der Literatur, siehe unsere Literaturangaben. Sie trägt dort verschiedene Namen: *magnetische Menge*, *Polstärke* oder *magnetische Ladung*. Wenn betont werden soll, dass es sich um die Ladung handelt, die auf magnetischer Polarisation beruht, benutzt man die Bezeichnungen *magnetische Polarisationsladung* oder *gebundene Ladung*. Nur Maxwell möchte ich noch einmal zitieren, da er sich besonders klar ausdrückt:

„Die Menge Magnetismus, die ein Pol eines Magnets beherbergt, ist stets der Größe nach gleich und dem Zeichen nach entgegengesetzt der Menge Magnetismus, die der andere Pol desselben in sich birgt. Allgemeiner: In jedem Magnete ist die Gesamtmenge an Magnetismus algebraisch genommen gleich Null.“

Das könnte für einen Schüler zunächst überzeugend klingen. Aber dann wird er fragen, wie man diese Ladungen räumlich trennen kann, so dass man von wirklichen Ladungen und nicht nur von Eigenschaften eines Stabmagneten sprechen kann.

Hier werden ungewöhnliche Forderungen an eine physikalische Größe gestellt. Was sind *wirkliche* Ladungen? Warum soll die Ladung nicht eine Eigenschaft des Magneten beschreiben? Die elektrische Ladung beschreibt doch auch eine Eigenschaft des Elektrons.

„Die Frage ist nicht, ob es magnetische Ladungen gibt oder nicht, sondern ob ihre Einführung zweckmäßig ist“. Das nun ist ein Argument, das das Vorgehen des KPK in den Augen seriöser Wissenschaftler vollständig diskreditiert.

Zur Frage, mit welchem Recht man eine physikalische Größe einführt, möchte ich einige Autoren zitieren, deren Aussagen mehr Gewicht haben als meine eigenen:

1. Aus einem von Heisenberg (Der Teil und das Ganze, Piper & Co Verlag München 1969 S. 91-92) nacherzählten Dialog mit Einstein:

Einstein: Aber Sie glauben doch nicht im Ernst, daß man in eine physikalische Theorie nur beobachtbare Größen aufnehmen kann.

Heisenberg: Ich dachte, daß gerade Sie diesen Gedanken zur Grundlage Ihrer Relativitätstheorie gemacht hätten? Sie hatten doch betont, daß man nicht von absoluter Zeit reden dürfe, da man diese absolute Zeit nicht beobachten kann. Nur die Angaben der Uhren, sei es im bewegten oder im ruhenden Bezugssystem, sind für die Bestimmung der Zeit maßgebend.

Einstein: Vielleicht habe ich diese Art von Philosophie benützt, aber sie ist trotzdem Unsinn. Oder ich kann vorsichtiger sagen, es mag heuristisch von Wert sein, sich daran zu erinnern, was man wirklich beobachtet. Aber vom prinzipiellen Standpunkt aus ist es ganz falsch, eine Theorie nur auf beobachtbare Größen begründen zu wollen...

2. *Einstein, A.*: Grundzüge der Relativitätstheorie, AkademieVerlag Berlin, 1973, S. 6

„Es ist deshalb nach meiner Überzeugung eine der verderblichsten Taten der Philosophen, daß sie gewisse begriffliche Grundlagen der Naturwissenschaft aus dem Kontrolle zugänglichen Gebiete des Empirische-Zweckmäßigen in die unangreifbare Höhe des Denknötigen (Apriorischen) versetzt haben. Denn wenn es auch ausgemacht ist, daß die Begriffe nicht aus den Erlebnissen durch Logik (oder sonstwie) abgeleitet werden können, sondern in gewissem Sinn freie Schöpfungen des menschlichen Geistes sind, so sind sie doch ebensowenig unabhängig von der Art der Erlebnisse, wie etwa die Kleider von der Gestalt der menschlichen Leiber.“

3. *Falk, G., Ruppel, W.*: Mechanik, Relativität, Gravitation, Springer-Verlag Berlin 1973, S. 2

„Schließlich ist es irrtümlich anzunehmen, die Objektivität der Physik bestünde darin, dass ihre Begriffe nichts zu tun hätten mit der menschlichen Fantasie oder überhaupt mit dem Menschen. Tatsächlich sind die physikalischen Größen Erfindungen des menschlichen Geistes, die dazu dienen, die verwirrende Fülle der uns umgebenden Erscheinungen durch durch einfache Regeln überschaubar zu machen.

Äther/Vakuum

Seite 12

Zwar kann man aufgrund der Quantenfeldtheorie das Vakuum als einen modernen Nachfolger des Äthers ansehen. Ein entscheidender Unterschied zum klassischen Äther ist aber, dass das Vakuum der Quantenfeldtheorie lorentz-invariant ist, damit der Relativitätstheorie genügt und somit kein Bezugssystem auszeichnet.

Wir können aus den Bemerkungen des Autors nicht ableiten, dass es unpassend wäre, das Vakuum der QED als Träger der elektromagnetischen Felder zu bezeichnen.

Anthologia Calorica

GEORG JOB

i. R. Institut für Physikalische Chemie, Universität Hamburg

Zusammenfassung: Zur Frage, durch welche Größe der Begriff Wärme am besten zu beschreiben ist, gibt es eine Reihe widersprüchlicher Auffassungen. Man sollte sie kennen, wenn man sich aus den abweichenden Angaben verschiedener Lehrbücher ein eigenes, konsistentes Bild von den Eigenschaften der Wärme zu machen versucht. In dem folgenden Beitrag werden neun mehr oder minder verbreitete Ansichten in Worten und Formeln kurz charakterisiert und mit Zitaten belegt und veranschaulicht.

Was ist Wärme? – Eine Frage, viele Antworten

Die Überzeugung, dass Wärme eine Energieform darstellt, ist anderthalb Jahrhunderte alt. Man sollte also erwarten, dass vielleicht nicht jedes Kind, aber doch jeder Physiker oder zu allermindestens jeder Physikprofessor heute ohne viel Wenn und Aber angeben kann, um *welche* Energieform¹⁾ es sich dabei handelt.

Aber diese Erwartung trügt. Zur Frage, was Wärme eigentlich ist oder wie man sie auffassen sollte, gibt es ein buntes Spektrum von Lehrmeinungen. Nicht einmal der Ansatz, Wärme sei eine spezielle Form der Energie, ist unbestritten. Diese Vielfalt der Auffassungen über einen zentralen Begriff passt schlecht zum Selbstverständnis des Naturwissenschaftlers. Daher werden Abweichungen meist stillschweigend übergangen, obwohl die Gegensätze unübersehbar und unvereinbar sind. Der unkundige Leser sieht sich mit widersprüchlichen Aussagen konfrontiert, die alle im zugehörigen Rahmen richtig sein können, sich aber dennoch nicht, wie er es erwartet, zu einem einheitlichen Bild der Wärme zusammenfügen lassen. Studenten etwa, die sich mit der Wärmelehre befassen müssen und verschiedene Fachbücher zu Rate ziehen, bringt die Auseinandersetzung mit diesen differierenden, jedoch nicht benannten und gegeneinander abgegrenzten Auffassungen in eine missliche Lage. Wie verheerend die Folgen sind, macht K. STIERSTADT in seinem Aufsatz „Was ist Wärme?“²⁾ deutlich (siehe Zitat im Block 4). Es wäre zu überlegen, ob sich frustrierende Erlebnisse dieser Art nicht vermeiden oder wenigstens mildern ließen, wenn man nicht die Meinungsverschiedenheiten über den Wärmebegriff verschweigt (wohl aus gut gemeinten lernpsychologischen Gründen), sondern umgekehrt diese Auffassungsunterschiede kenntlich macht und angemessen bespricht. Ziel dieses Beitrages ist es, auf dieses schwelende Problem aufmerksam zu machen.

Als Ursache für diese Meinungsvielfalt kann gelten, dass sich durch eine Energiegröße, ganz gleich wie man sie wählt, jeweils nur gewisse Aspekte des Wärmebegriffes wiedergeben lassen. CLAUDIUS operierte daher mit zwei Wärmegrößen, der einem Körper *zugeführten* Wärme Q und der in einem Körper *vorhandenen* Wärme H , die er der kinetischen Energie der ungeordneten Molekularbewegung gleichsetzte²⁾. Aber auch H und Q zusammen ergeben keine befriedigende Beschreibung. H ist heute als Größe ausgestorben und auf manchen Gebieten durch die Enthalpie ersetzt worden, geistert aber als Begriff oder Vorstellung nach wie vor durch viele Lehrbücher (vergleiche etwa die zum zweiten Block der Liste gehörende Zitate).

Das Bekenntnis des Verfassers eines Lehrbuches oder Aufsatzes zu einer bestimmten Auffassung bedeutet noch keineswegs, dass er sich auch konsequent daran hält. Immer wieder verirren sich unbewusst fremde Ausdrucksweisen in den Text, selbst bei Wissenschaftlern wie PLANCK oder GIBBS, die entscheidend an der Entwicklung der thermodynamischen Begriffe mitgewirkt haben.

¹⁾ Die Abgrenzbarkeit der Energieformen gegeneinander wird oft als selbstverständlich unterstellt, erweist sich aber oft als recht problematisch.

²⁾ Vgl. etwa R. Clausius: „Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie“ Vieweg: Braunschweig (1864) S.252

Ansichten über die Wärme im Überblick

In der nachstehenden Liste sind neun verschiedenen Auffassungen des Begriffes Wärme aufgeführt und in Stichworten gekennzeichnet. In der ersten Zeile jedes nummerierten Blockes steht links in Anführungszeichen ein möglicher Name und ganz rechts eine Formel, welche die Wärme durch andere physikalische Größen³⁾ umschreibt. Der besseren Vergleichbarkeit wegen wurde versucht, dabei möglichst immer dieselben Variablen S , T , U ... zu verwenden. Vor der Formel steht die Angabe „Prozess“- oder „Zustandsgröße“, ein Merkmal, aus dem man auf den rechnerischen Aufwand beim Umgang mit der Wärme schließen kann. Schon das Integralzeichen in der Formel bei den Prozessgrößen lässt diese als die mathematisch schwierigeren erkennen. In den Zeilen danach folgt jeweils eine ganz knappe Kennzeichnung des Wärmebegriffs, sowie einige Angaben zu Verbreitung, Vor- und Nachteilen der jeweiligen Auffassung. In der Liste finden sich auch zwei überlebte, aber in verschiedenen Redewendungen und Begriffsbildungen noch nachklingende oder wieder auftauchende Auffassungen (Block 8 und 9).

- | | | | |
|----|---------------------|--|---------------------------------------|
| 1) | „orthodox“ | | Prozessgröße $\int T d_a S$ |
| | <i>Wärme ist:</i> | die durch thermische Kontakte einem System zugeführte Energie | |
| | <i>Verbreitung:</i> | unter Thermodynamikern bevorzugte Auffassung | |
| | <i>Vorteil:</i> | streng definierte Begriffe | |
| | <i>Nachteil:</i> | abstrakter Kalkül, anwendungsferne Begriffsbildung: Es gibt keinen Wärmeinhalt, keine Wärmeerzeugung, keine Reibungswärme; selbst Begriffe wie Wärmeleitung und Wärmekapazität sind nicht theoriekonform und werden nur mangels besserer Bezeichnungen geduldet. | |
| | <i>Bemerkung:</i> | gilt unter ihren Vertretern als einzig korrekte Auffassung | |
| | | | |
| 2) | „mechanistisch“ | | Zustandsgröße $\frac{f}{2} NkT$ |
| | <i>Wärme ist:</i> | die in der regellosen Molekularbewegung steckende (kinet.) Energie | |
| | <i>Verbreitung:</i> | die „herrschende Meinung“ in einführenden Physikbüchern, Enzyklopädien und Lexika | |
| | <i>Vorteil:</i> | vergleichsweise anschaulich und anspruchslos, wegen dehnbarer Begriffe gut geeignet zur Vermittlung fast jeder Art von Einsicht | |
| | <i>Nachteil:</i> | so dehnbar wie die Begriffe, so vage sind auch die Erkenntnisse; versagt bei Spinsystemen, Hohlraumstrahlung, entarteten Gasen | |
| | <i>Bemerkung:</i> | Relikt der mechanistischen Physik des 19. Jahrhunderts | |
| | | | |
| 3) | „chaokalendarisch“ | | Zustandsgröße $U(S, ...) - U(0, ...)$ |
| | <i>Wärme ist:</i> | ungeordnete Energie | |
| | <i>Verbreitung:</i> | beginnt die mechanistische Auffassung zu ersetzen oder zu ergänzen | |
| | <i>Vorteil:</i> | auch anwendbar auf Spinsysteme, Hohlraumstrahlung, entartete Gase | |
| | <i>Nachteil:</i> | ähnlich vage Begriffe wie im Falle der mechanistischen Auffassung | |
| | <i>Bemerkung:</i> | Verallgemeinerung der zu engen mechanistischen Auffassung | |

³⁾ Es bedeutet S die Entropie, N die Atomzahl (bei einfachen Feststoffen) oder Molekelzahl (bei Gasen), k die BOLTZMANN-Konstante, T die Temperatur, U die innere Energie, ferner $dS = d_a S + d_i S$ das Entropiedifferential, das (in Anlehnung an BRØNSTED, PRIGOGINE und andere) in einen durch Zustrom von außen und eine durch Erzeugung im Innern hervorgerufenen Beitrag, $d_a S$ und $d_i S$, aufgeteilt ist.

- 4) „reformiert“ Prozessgröße $\int T dS$
- Wärme ist:* die zu Entropiezufuhr oder Entropieerzeugung erforderliche Energie
Verbreitung: gelegentlich vorgeschlagen und benutzt
Vorteil: erlaubt es, von Wärmeerzeugung durch Reibung, elektrischen Strom, chemische Reaktion usw. zu sprechen
Nachteil: es gibt keinen Wärmeinhalt
Bemerkung: Erweiterung der sehr restriktiven orthodoxen Auffassung
- 5) „anergetisch⁴⁾“ Zustandsgröße TS
- Wärme ist:* der isotherm nicht als Arbeit verfügbare Teil der inneren Energie
Verbreitung: mehr beiläufig verwendet, selten systematisch benutzt
Vorteil: latente Wärme bei Dehnung, Magnetisierung, Reaktionen usw. sind als Differenzen des Wärmeinhalts berechenbar
Nachteil: nicht erweiterungsfähig auf andere als isotherme Prozesse
Bemerkung: Erweiterung der orthodoxen Auffassung um den Begriff Wärmeinhalt
- 6) „akalorisch“ entfällt
- Wärme ist:* wie Arbeit ein überflüssiger Begriff
Verbreitung: gelegentlich vorgeschlagen, selten praktiziert
Vorteil: vermeidet die unnötige und leicht missverständliche Differenzierung der Energie in Arbeiten und Nichtarbeiten
Nachteil: die Ausschaltung des Wärmebegriffs bei der Diskussion von Wärmeeffekten wirkt paradox
Bemerkung: Verzicht auf die problematischen Prozessgrößen Wärme und Arbeit
- 7) „entropokalorisch“ Zustandsgröße S
- Wärme ist:* keine Energie, sondern identisch mit der Entropie
Verbreitung: sporadisch, jedoch mit zunehmender Tendenz
Vorteil: frei von abstrakten Größen, alle Rechengänge kurz und anschaulich, mit der außerwissenschaftlichen Wärmeverstellung voll kompatibel
Nachteil: widerspricht alten Denkgewohnheiten, Wärmeleitung in Medien ohne merkliche thermische Ausdehnung (in der Technik häufig vorkommend) ist als Energiefluss einfacher darstellbar als als Entropiefluss
Bemerkung: Abkehr von der Zwangsvorstellung, Wärme sei eine Energieform
- 8) „archekalorisch^{†)}“ bei reversiblen Vorgängen Zustandsgröße S
- Wärme ist:* ein der elektrischen Ladung oder einem Stoff vergleichbares Fluidum
Verbreitung: nur in Namen von Wärmegrößen und -begriffen überlebend
Vorteil: besonders einfach und anschaulich
Nachteil: wegen der angenommenen Wärmeerhaltung falsche Deutung vieler Wärmeeffekte (etwa der Reibungswärme)
Bemerkung: erste Erfolge bei der quantitativen Beschreibung der Wärmeeffekte

⁴⁾ Anergie \equiv „Unarbeit“. In der technischen Thermodynamik bezeichnet man das Produkt $T_0 \cdot S$, in dem T_0 die Umgebungstemperatur bedeutet, als *Anergie*; $U - T_0 S$ wird *Exergie* genannt.

- 9) „kinetokalorisch“^{†cc} entfällt
Wärme ist: die Folge unsichtbarer Teilchen- oder Ätherschwingungen
Verbreitung: als qualitative Beschreibung weitest verbreitet
Vorteil: erklärt modellhaft eine Vielzahl von Erscheinungen
Nachteil: nur qualitativ
Bemerkung: erste Versuche zu einem atomistischen Verständnis der Wärmeeffekte

Zitate

1. „Orthodoxe“ Auffassung Prozessgröße $\int T d_a S$

G. KORTÜM / H. LACHMANN: „Einführung in die chemische Thermodynamik“, Verlag Chemie, Weinheim 1981

S. 16: Der Begriff „Wärme“ ist schwer zu definieren Die Erkenntnis, dass Wärme eine Energieform darstellt, wurde relativ spät gewonnen.

S. 60: Der Energiesatz verlangt, dass in diesem Fall [nicht vollständig adiabatischer Prozess] eine weitere Energieform Q zwischen System und Umgebung ausgetauscht worden sein muss, so dass $Q = \Delta U - A$. Q wird als Wärme bezeichnet, sie stellt die Differenz zwischen der Änderung der inneren Energie eines Systems und der zwischen System und Umgebung ausgetauschten Arbeit bei beliebigen Prozessen dar. Durch diese Definition wird die Wärme auf schon bekannte Größen zurückgeführt, sie ist nichts anderes als eine Energieform.

M. BORN: „Kritische Betrachtungen zur traditionellen Darstellung der Thermodynamik“
 Physik. Zeitschr. 1921, 22, 218 ... 286

S. 221: Sobald man erkannt hat, dass Körper erwärmt werden können, ohne dass die umgebenden Körper ihnen Wärme abgeben, nämlich etwa durch Aufwendung mechanischer Arbeit, verliert der Begriff der Wärmemenge zweifellos seinen Inhalt. Erst muss das Gesetz dieser Verwandelbarkeit bekannt sein, bevor man wissen kann, unter welchen speziellen Vorichtsmaßnahmen die Warmheit durch eine Quantitätsgröße „Wärmemenge“ gemessen werden darf. Wir werden daher den Begriff Wärmemenge zunächst nicht einführen und ihn erst nachträglich an die im ersten Hauptsatz formulierten Erfahrungen anschließen.

1. Hauptsatz: Um einen Körper (oder ein System von Körpern) von einem bestimmten Anfangszustand zu einem bestimmten Endzustand auf adiabatische Weise zu bringen, ist immer ein und dieselbe mechanische Arbeit (bzw. äquivalente elektrische Energie) notwendig, unabhängig von der Art des Überganges. Hält man den Anfangszustand fest, so ist demnach die Arbeit A nur noch von den Parameterwerten des Endzustandes abhängig; man schreibt $A = U - U_0$ wo U eine Funktion des Zustandes ... und U_0 ihr Wert im Anfangszustand ist. U heißt die Energie des Systems.

S. 222: Jetzt können wir die Wärmemenge auch für ganz beliebige Prozesse definieren: dazu muss angenommen werden, dass die Energie als Funktion des Zustandes bekannt und die bei einem beliebigen Prozess aufgewandte Arbeit gemessen sei, dann ist die bei dem Prozess zugeführte Wärme $Q = U - U_0 - A$. Im folgenden spielt der Begriff Wärme keine selbstständige Rolle; wir gebrauchen ihn durchaus nur als kurze Bezeichnung der Differenz von Energiezunahme und zugeführter Arbeit.

2. „Mechanistische“ Auffassung Zustandsgröße $\frac{f}{2} Nk T$

C. GERTHSEN / H. O. KNESER / H. VOGEL: „Physik“; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1986

S. 193: Was ist Wärme? Die ganze Wärmelehre lässt sich in einem Satz zusammenfassen: Wärme ist ungeordnete Molekülbewegung. Wir beginnen mit der Feststellung, dass Wärmeenergie nichts anderes ist als kinetische⁵⁾ Energie der ungeordneten Molekülbewegung.

S. 196: Freiheitsgrade Moleküle können nicht nur Translationsenergie haben, sondern auch Rotationsenergie. Außerdem können ihre Bestandteile ... gegeneinander schwingen. Jede solche unabhängige Bewegungsmöglichkeit nennt man einen *Freiheitsgrad*. Bei einer Schwingung sind ... kinetische und potentielle Energie im Mittel gleich groß. Daher hat ein Teilchen im Kristall i. allg. 6 Freiheitsgrade, 3 der kinetischen, 3 der potentiellen Schwingungsenergie. Es gilt der *Gleichverteilungssatz ...: Auf jeden Freiheitsgrad entfällt im thermischen Gleichgewicht die gleiche mittlere Energie, und zwar für jedes Molekül $W_{FG} = (1/2) kT$* . Ein Molekül mit f Freiheitsgraden enthält also die mittlere Gesamtenergie $W_{mol} = (f/2) kT$.

S. 197: Wärmekapazität Ein homogener (aus lauter gleichen Molekülen bestehender) Körper der Masse M enthält M/m Moleküle der Masse m . Jedes davon braucht die Energie $(1/2) fk(T_2 - T_1)$, um von T_1 nach T_2 zu gelangen, der ganze Körper braucht also die Energie $\Delta W = (M/m) (f/2) k \Delta T$. Man nennt das Verhältnis $C = \Delta W / \Delta T = (M/m) (f/2) k$ die *Wärmekapazität* des Körpers. Bezogen auf 1 kg eines bestimmten Stoffes erhält man die *spezifische Wärmekapazität* $c = \Delta W / (M \Delta T) = fk / (2m) = \dots$

S. 199: Kalorimeter Die spezifische Wärmekapazität c kann mit dem *Mischungskalorimeter* bestimmt werden. In einem Gefäß bekannter Wärmekapazität C_w befindet sich eine Wassermasse m_1 der Temperatur T_1 . Der Probekörper, dessen c gemessen werden soll, hat die Masse m_2 und wird auf T_2 erhitzt. Lässt man ihn in das Kalorimeter fallen, stellt sich nach einer Weile eine Mischungstemperatur T_m ein. Der Energiesatz fordert Gleichheit von abgegebener und aufgenommener Wärmemenge: $Q_2 = cm_2(T_2 - T_m) = Q_1 = (c_0 m_1 + C_w) (T_m - T_1)$. c_0 ist die spezifische Wärmekapazität des Wassers. Es folgt $c = \dots$

S. 201: Der erste Hauptsatz der Wärmelehre Führt man einem System von außen die Wärmeenergie ΔQ zu, so kann sie teilweise zu einer Arbeitsleistung $-\Delta W$ verbraucht werden Der Rest von ΔQ führt zur Steigerung der inneren Energie U des Systems um ΔU : $\Delta Q = \Delta U - \Delta W$. Die innere Energie kann Bewegungsenergie der Moleküle sein ... , also zu einer Erwärmung führen Sie kann aber auch zum Umbau oder zum Aufbrechen des Festkörper- oder Flüssigkeitsverbandes dienen (Schmelz-, Verdampfungs-, Lösungsenergie). Sie kann auch in Arbeit gegen chemische und elektro magnetische Kräfte bestehen.

R. W. POHL: „Mechanik, Akustik, Wärmelehre“, S. 248ff; Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1962

S. 244: Das Verständnis der Wärmelehre wird erleichtert, wenn man das früher so oft angewandte Wort „Wärmemenge“ ganz vermeidet und vom Worte Wärme nur sparsam Gebrauch macht.

S. 248: Das Wort Wärme wird leider noch immer nebeneinander in zwei verschiedenen Bedeutungen benutzt. Meist kennzeichnet es nicht eine besondere Form der Energie, wie es die Worte potentielle, kinetische, elektrische und magnetische Energie tun. Meist kennzeichnet das Wort Wärme lediglich eine besondere Art, in der Energie aus einer Stoffmenge in eine andere *übergeht*: Es ist der Übergang, der *unter Ausschluss aller sonstigen Hilfsmittel* allein durch eine *Temperaturdifferenz* verursacht wird. Wir nennen einen solchen Übergang kurz

⁵⁾ Wärme und Wärmeenergie werden synonym gebraucht. Später wird stillschweigend – im Widerspruch zur Feststellung am Anfang – auch der potentielle Anteil der Schwingungsenergie der Wärmeenergie zugerechnet.

„thermisch“, vermeiden also zur Kennzeichnung dieses Übergangs das Wort Wärme. – Im Sonderfall bezeichnet Wärme den kinetischen Anteil einer inneren Energie. Wir werden es allein in diese Bedeutung benutzen.

3. „Chaokalorische“ Auffassung Zustandsgröße $U(S, \dots) - U(0, \dots)$

F. J. DYSON: „What Is Heat?“, Scientific American 1954, 191, No. 3 (September), 58...63

S. 58: Wärme ist *ungeordnete Energie*. Die zwei Worte genügen, um die Natur der Wärme zu erklären. ... Energie kann ohne Unordnung vorkommen. Zum Beispiel trägt eine fliegende Gewehr­kugel oder ein $^{235}\text{Uran}$ -Atom geordnete Energie. ... Wenn die Kugel auf eine Stahlplatte prallt, geht ihre Bewegungsenergie in eine Zufallsbewegung der Atome in Geschoss und Platte über. Diese ungeordnete Energie wird in Form von Wärme fühlbar Wenn das [Uran-]Atom zerfällt, wird die Bewegungsenergie der fliegenden Bruchstücke durch Zusammenstöße in eine Zufallsbewegung der Elektronen und Atome in der Umgebung verwandelt, das heißt in Wärme. ... Diese zwei Beispiele veranschaulichen das allgemeine Prinzip, dass Energie als Wärme erscheint, sobald sie ungeordnet ist. Umgekehrt gilt, dass Unordnung ohne Energie vorkommen kann und dass Unordnung Wärme wird, sobald Energie hinzukommt. Um zu sehen, wie Wärme erzeugt wird, indem man Energie der Unordnung zufügt, betrachte man die Luft in einer Fahrradpumpe. Vor einer Verdichtung bewegen sich die Luftatome bereits zufällig in alle Richtungen. Das heißt, dies ist ein ungeordnetes System und seine Energie liegt als Wärme vor, obwohl wir sie nicht fühlen, weil die Luft nur Zimmertemperatur hat. Nun pumpen wir kräftig. Wenn wir die Luft schnell verdichten, erhitzt sie sich, und wir fühlen, dass die Pumpe heiß wird. Die Luft hat dieselbe Unordnung wie zuvor, aber mehr Energie. Durch die verrichtete Arbeit haben wir mehr Energie in die Luft gedrückt und die beobachtete Wärmeerzeugung ist die Folge dieser Energiezufuhr zu der schon vorhandenen Unordnung.

S. 61: Wenn elektromagnetische Wellen ungeordnet sind, erscheinen sie als Wärme wie andere Formen der Energie auch. Ungeordnete elektromagnetische Energie ist eine Form der Wärme, die zum leeren Raum gehört, genauso wie ungeordnete Bewegung der Atome eine Form der Wärme ist, die zur Materie gehört.

K. STIERSTADT: „Was ist Wärme? – Erfahrungen mit einem Vorlesungskonzept“, Phys. Bl. 1983, 39, 126 ... 128
„verbal chaokalorisch, faktisch reformiert“

S. 126: Die Fragen „Was ist Wärme, was ist Temperatur?“ werden von etwa 90% der Physikstudenten im Vorexamen und von etwa 65% im Hauptexamen falsch oder sehr unvollständig beantwortet. ... Inzwischen wissen wir aber, dass sie [die Wärmelehre] eines der begrifflich schwierigsten Gebiete der Physik ist. ...

S. 127: Ich habe die 30 gebräuchlichsten Lehrbücher der allgemeinen Physik und der Wärmelehre sowie einige Lexika daraufhin durchgesehen, ob die Begriffe Wärme und Temperatur vernünftig eingeführt sind. Das Ergebnis ist niederschmetternd: Insgesamt habe ich für die Temperatur (bzw. die Wärme) 10 (bzw. 9) befriedigende und 25 (bzw. 26) unbefriedigende Erklärungen der genannten Art gefunden. ... [STIERSTADT propagiert als Konsequenz davon eine Wärmelehre auf quantenstatistischer Grundlage, die er in Stichworten skizziert:] Wärme ist eine Form ungeordneter Energie. Temperatur ist ein Maß für die Änderung dieses ungeordneten Anteils. Quantitativer Ausdruck für die Unordnung ist notwendig, z. B. die Zahl ω der möglichen Energiezustände. ... [Weitere Schritte seines „Königsweges“ sind:]

$$[\omega \text{ „geglättet“}] \quad \Omega(E) \equiv \int_E^{E+\delta E} \omega(E') dE', \quad \text{Definition der Temperatur: } T \equiv 1/k (\partial \ln \Omega / \partial E)^{-1},$$

$$\text{Definition von Arbeit } \Delta W \text{ und Wärme } \Delta Q: \quad \Delta(\ln \Omega) = \frac{\partial \ln \Omega}{\partial E} \Delta E + \frac{\partial \ln \Omega}{\partial V} \Delta V \equiv \frac{\Delta Q}{kT} - \frac{\Delta W}{kT} \text{ usw.}$$

4. „Reformierte“ Auffassung Prozessgröße $\int T dS$

J. N. BRØNSTED: „Principles and Problems in Energetics“, Interscience Publishers, New York, London 1955

S. 2: ... der Verfasser dieses Buches macht auf einige Ungenauigkeiten in der herkömmlichen Deutung aufmerksam, die auf eine Mehrdeutigkeit der Grundbegriffe zurückzuführen sind. Dies gilt besonders für den Wärmebegriff, der in der klassischen Darstellung nur im Fall der Wärmeleitung befriedigend definiert ist.

S. 56: Daher scheint es vertretbar und sprachlich konsequent ... allgemein den gleichen Namen für δQ in der Gleichung $T dS = \delta Q$ zu verwenden, ganz gleich, ob die Entropie dem System von außen zugeführt oder in seinem Innern erzeugt wird.

W. RUPPEL: „Entropie und Wärme“ in Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts, Heft 1, Schroedel Verlag, Hannover 1977.

S. 92: Der Gebrauch des Wortes Wärme ist so verworren und hat sich historisch so wenig im Einklang mit dem Kalkül der Thermodynamik entwickelt, dass das Wort „Wärme“, ganz im Gegensatz zur „Entropie“, mehr als ein Hindernis als ein Hilfsmittel beim Verständnis der Thermodynamik ist.

G. FALK / W. RUPPEL: „Energie und Entropie“, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1976.

S. 92: Die zur Energieform⁶⁾ Wärme gehörige extensive Variable ... hat den Namen *Entropie* S . Es ist also die Energieform $Wärme = T dS$. Die intensive Variable T heißt die absolute Temperatur. Durch [diese Gleichung] werden die beiden Variablen T und S ... auf einmal eingeführt. ... Die Wärme ist aber kein *Energieanteil*, sondern eine Energieform. Ebenso sind Sätze wie „Wärme ist ungeordnete Bewegung von Teilchen“ oder „Wärme ist kinetische Energie der Teilchen“ irreführend; denn sie besagen, dass Wärme eben kinetische Energie, also doch wieder ein Energieanteil sei. Dass aber Wärmeenergie nicht in einem System „drinsteckt“, sondern nur bei *Energieaustausch* auftritt, wie alle Energieformen, ist der springende Punkt der Thermodynamik, auf den man nicht hartnäckig genug hinweisen kann.

5. „Anergetische“ Auffassung Zustandsgröße TS

H. H. STEINOUR: „Heat and Entropy“, J. Chem. Educ. 1984, 25, 15...20.

S. 16: Es ist lehrreich im Hinblick auf diese Betrachtungen die bekannte Gleichung zu untersuchen, die die innere Energie in zwei Teile aufspaltet, $E = A + TS$ wovon der erste, A , eine Energie darstellt, die, soweit sie abgebar ist, Arbeit bei der Temperatur T zu verrichten vermag. Die Größe A kann daher als Arbeitsinhalt bei der Temperatur T angesehen werden und wird in der Tat oft so genannt. Entsprechend erscheint TS für die Rolle des Wärmeinhalts ausersehen Mach (12) scheint ebenfalls TS als Wärme betrachtet zu haben. Trevor (19, 20) zeigt klar, dass er sich früher TS als Wärme gedacht hat Berthelot (2) und Leaf (5) nennen TS „thermische Energie“. Dodé (4) nennt es „Wärmeenergie“ und in einem Fall „Wärme“. Babor und Thiessen (1) sagen ausdrücklich, dass TS „tatsächlich Wärme ist oder eine Energieform, die nur als Wärme greifbar ist.“

6. „Akalorische“ Auffassung entfällt

H. A. BENT: „A Note on the Notation and Terminology of Thermodynamics“, J. Chem. Educ. 1972, 49, 44...46.

⁶⁾ Der Begriff „Energieform“ wird hier ausschließlich im Sinne von „Energie-Übertragungsform“ gebraucht, während die verschiedenen „Energie-Daseinsformen“ (kinetische, potentielle, elektrische usw.) als „Energieanteile“ bezeichnet werden.

S. 44: In der chemischen Thermodynamik sind gewöhnlich drei Dinge im Auge zu behalten: ein System, seine thermische Umgebung und seine mechanische Umgebung. ... Vereinbarungsgemäß ist die thermische Umgebung in starre, wärmeleitende Wände eingeschlossen, die mechanische Umgebung in bewegliche, wärmedämmende Wände. ... Die folgenden Abkürzungen haben sich als nützlich erwiesen.

$\sigma \equiv$ das System $\mathcal{G} \equiv$ die thermische Umgebung $wt \equiv$ die mechanische Umgebung. ... In dieser Schreibweise lauten die algebraischen Ausdrücke für den ersten und zweiten Hauptsatz ... $\Delta E_{\text{total}} = \Delta E_{\sigma} + \Delta E_{\mathcal{G}} + \Delta E_{wt} = 0$ ([Gl.] 5) $\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\sigma} + \Delta S_{\mathcal{G}} \geq 0$ ([Gl.] 6) ferner gilt gemäß Definition: $\Delta S_{\mathcal{G}} = \Delta E_{\mathcal{G}}/T \dots$ ([Gl.] 7). Die Gleichungen (5) – (7) sind bei allen üblichen Aufgaben in der chemischen Thermodynamik anwendbar. Die Gleichung (5) für den ersten Hauptsatz schreibt man gewöhnlich als $\Delta E = q - w$ ([Gl.] 8) ...

$q \equiv$ Energie, die die thermische Umgebung verliert $\equiv -\Delta E_{\mathcal{G}}$

$w \equiv$ Energie, die die mechanische Umgebung gewinnt $\equiv \Delta E_{wt}$

$\Delta E \equiv$ Energieterm, der sich aus der Energieerhaltung ergibt $\equiv \Delta E_{\sigma}$

S. 46: Zusammenfassend gesagt, die „ σ - \mathcal{G} - wt -total“-Schreibweise erlaubt es, den ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik in symmetrischer, analoger, leicht merkbarer Form auszudrücken ... Die Schreibweise bringt Klarheit in die Definitionen von „ q “ und „ w “ und bietet die Möglichkeit, die oft quälenden Ausdrücke „Wärme“ und „Arbeit“ aus dem thermodynamischen Vokabular zu streichen, indem man diese durch die zwar umständlicheren, aber eindeutigeren Wendungen ersetzt: „Energie, die die thermische Umgebung verliert“ bzw. „Energie, die die mechanische Umgebung gewinnt“.

G. M. BARROW: „Thermodynamics Should Be Built on Energy – Not on Heat and Work“
J. Chem. Euc. 1988, 65, 122...125

S. 122: „Wärme“ und „Arbeit“ sollten von der thermodynamischen Bühne verschwinden. Man sehe sich einmal an, was in Thermodynamikbüchern oder irgendwelchen Chemiebüchern, die sich mit Thermodynamik oder Thermochemie befassen, über Wärme und Arbeit gesagt wird. Man findet viele vage und seltsame Aussagen. Wärme „fließt“ oder „Wärme ist eine Form der Energie“ oder „Wärme ist Energie im Übergang“ oder sie ist „Energie an der Grenze“ oder sie ist „der Vorgang“ oder „der Mechanismus“ durch den Energie übertragen wird. Arbeit „wird getan“ oder „wird umgewandelt in Wärme“. Wir werden vor den Schwierigkeiten, die diese Begriffe verursachen, schon bei der Geburt der modernen Thermodynamik gewarnt. In ihrem Buch „Thermodynamics“ [McGraw-Hill: New York, 1923, S. 53] schrieben Lewis und Randall:

Es gibt zwei Begriffe, Wärme und Arbeit, die eine wichtige Rolle in der Entwicklung der Thermodynamik gespielt haben. Aber ihr Gebrauch hat oft eine Verschwommenheit in diese Wissenschaft gebracht, die der größten Genauigkeit fähig wäre.

Die Schwierigkeiten, die Wärme und Arbeit mit sich bringen, setzen sich mit der Weiterentwicklung der Thermodynamik fort. ... Wir werden dann zu einer ganz unnötigen Auseinandersetzung mit „unvollständigen Differentialen“ und seltsamen Differentialsymbolen – rundes d , großes d , quergestrichenes d – veranlasst. Der Bezug zur Wärme stammt von der Wärmetheorie des 18. und frühen 19. Jahrhunderts, wo man glaubte, Wärme sei die Wirkung eines „Caloricum“ genannten Stoffes. ... Die „kalorische Periode“ endete. Indem wir das Wort „Wärme“ weiterbenutzen, verharren wir in einer „modifizierten kalorischen Periode“. Es ist Zeit, dieses linkische Überbleibsel der Vergangenheit aufzugeben.

S. 123: Im Gegensatz zu Wärme und Arbeit ist Energie eine wohlbestimmte Eigenschaft. ... Davidson [Statistical Mechanics; McGraw-Hill: New York, 1962] meint, „es ist wichtig, dass man Wärme und Arbeit als Änderungen definiert, die nicht im System, sondern in der Umgebung auftreten.“ Wenn wir die Energie heranziehen, fällt es uns leichter, das System und seine thermische und mechanische Umgebung gleichartig zu behandeln. ... Auf diese Weise können wir statt von Wärme von der Energieänderung in der thermischen Umgebung,

ΔU (therm), sprechen. Analog kann man statt von Arbeit von der Energieänderung in der mechanischen Umgebung, ΔU (mech), reden.

S. 125: Schlussfolgerungen. Es gibt in der Thermodynamik keine Rolle für die schlüpfrigen Begriffe „Wärme“ und „Arbeit“. Wir sollten mit Energien umgehen, insbesondere in der Thermodynamik mit den Energien von System und seiner thermischen und mechanischen Umgebung.

7. „*Entropokalorische*“ Auffassung Zustandsgröße S

H. L. CALLENDAR: „The Caloric Theory of Heat and Carnot’s Principle“; Proc. Phys. Soc. 1911, 23, 153 ... 189.

S. 178: Niemand zu der Zeit [19. Jahrhundert] scheint ... erkannt zu haben, dass die Entropie lediglich das Caloricum [der Wärmestoff] unter einem anderen Namen war.

S. 184: Das Caloricum besitzt eine wichtige Eigenschaft, die wesentlich für ein natürliches Maß der Wärmemenge ist, nämlich bei einem reversiblen Austausch unverändert zu bleiben Wenn wir daher als Maß der Wärmemenge das Caloricum übernehmen, das je nach Temperatur mehr oder weniger Energie besitzt, werden alle Gleichungen und Herleitungen, die Gleichgewichte betreffen, sehr vereinfacht und leichter erhältlich.

H. U. FUCHS: „The Dynamics of Heat“, Springer-Verlag, New York, Berlin ... 1996

S. 65: Die hier eingeführte Größe Wärme, die so viel mit dem alten Begriff des Caloricums gemein hat, trägt eindeutig die Merkmale dessen, was Physiker, Chemiker und Ingenieure Entropie nennen.

S. 66: Deshalb ... sollte die Entropie im ersten Akt des Dramas als zentrale Figur der Wärmelehre erscheinen, nämlich als formales Maß an der Größe Wärme, für die wir sehr brauchbare Alltagsvorstellungen besitzen. Um die Vorstellung weiter zu festigen, wollen wir in Abschnitt 1.3 für die Beschreibung einfacher Wärmeerscheinungen das Wort *Wärme* verwenden. Vom Abschnitt 1.4 an wird dann der Begriff *Entropie* benutzt. Auch danach ist stets die Entropie gemeint, wenn umgangssprachlich von Wärme die Rede ist. In Ausdrücken wie „Der Körper wurde erwärmt“ oder „Bei diesem Vorgang wurde Wärme erzeugt“ soll auch weiterhin das Wort Wärme statt Entropie beibehalten werden.

8. „*Archekalorische*“[†] Auffassung bei reversiblen Vorgängen Zustandsgröße S

A. L. LAVOISIER, P. S. DE LAPLACE: „Zwei Abhandlungen über die Wärme von 1780 und 1784“ Ostwalds Klassiker, Band 40, Engelmann, Leipzig 1892.

S. 5: Die Physiker sind nicht einer Meinung über die Natur der Wärme. Mehrere unter ihnen betrachten sie als eine Flüssigkeit welche in der ganzen Natur verbreitet ist und welche die Körper mehr oder weniger durchdringt, je nach dem Grade der Temperatur und der ihnen eigenen Fähigkeit, sie zurückzuhalten. Sie kann sich mit den Körpern verbinden und in diesem Zustande hört sie auf, auf das Thermometer zu wirken und sich von einem Körper zum anderen mitzuteilen. Nur im Zustand der Freiheit, welche ihr gestattet, sich in den Körpern ins Gleichgewicht zu setzen, bildet sie das, was wir freie Wärme nennen.

9. „*Kinekalorische*“[†] Auffassung entfällt

A. L. LAVOISIER, P. S. DE LAPLACE: „Zwei Abhandlungen über die Wärme von 1780 und 1784“ Ostwalds Klassiker, Band 40, Engelmann, Leipzig 1892.

S. 5: Andere Physiker glauben, dass die Wärme nichts ist, als das Ergebnis unmerklicher Bewegungen der Moleküle der Materie. ... Um diese Hypothese zu entwickeln, machen wir darauf aufmerksam, dass bei allen Bewegungen ... ein allgemeines Gesetz besteht, welches die Geometer mit dem Namen „Gesetz von der Erhaltung der lebendigen Kräfte“ bezeichnet haben.

Quellen:

- R. CLAUSIUS : „Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie“; Vieweg: Braunschweig (1864), S. 252
- G. KORTÜM / H. LACHMANN: „Einführung in die chemische Thermodynamik“, Verlag Chemie, Weinheim 1981
- M. BORN: „Kritische Betrachtungen zur traditionellen Darstellung der Thermodynamik“
Physik. Zeitschr. 1921, 22, 218...286
- C. GERTHSEN / H. O. KNESER / H. VOGEL: „Physik“; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1986
- R. W. Pohl: „Mechanik, Akustik, Wärmelehre“, S. 248ff; Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1962
- F. J. DYSON: „What is Heat?“; Scientific American 1954, 191, No. 3 (September), 58...63
- K. STIERSTADT: „Was ist Wärme? – Erfahrungen mit einem Vorlesungskonzept“; Phys. Bl. 1983, 39, 126...128
- J. N. BRØNSTED: „Principles and Problems in Energetics“, Interscience Publishers, New York, London 1955
- W. RUPPEL: „Entropie und Wärme“ in Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts, Heft 1, Schroedel Verlag, Hannover 1977
- G. FALK / W. RUPPEL: „Energie und Entropie“; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1976
- H. H. STEINOUR: „Heat and Entropy“; J. Chem. Educ. 1984, 25, 15...20
- H. A. Bent: „A Note on the Notation and Terminology of Thermodynamics“; J. Chem. Educ. 1972, 49, 44...46
- G. M. BARROW: „Thermodynamics Should Be Built on Energy – Not on Heat and Work“
J. Chem. Educ. 1988, 65, 122...125
- G. N. LEWIS / M. RANDALL „Thermodynamics“, McGraw-Hill: New York, 1923, S. 53
- H. L. CALLENDAR: „The Caloric Theory of Heat and Carnot’s Principle“; Proc. Phys. Soc. 1911, 23, 153...189
- H. U. FUCHS: „The Dynamics of Heat“, Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg ... 1996
- A. L. LAVOISIER / P. S. DE LAPLACE: „Zwei Abhandlungen über die Wärme von 1780 und 1784“ Ostwalds Klassiker, Band 40, Engelmann, Leipzig 1892