

Drei Chancen für die Entropie

M. Pohlig

*Wir stehen selbst enttäuscht und sehn betroffen
den Vorhang zu und alle Fragen offen.
Bertold Brecht, Der gute Mensch von Sezuan*

Prolog

„Das Konzept der Entropie ist ohne Zweifel eines der okkultesten Konzepte der Physik“ [1]. Heuser spricht mit diesem Satz, der in seinem Duktus jeden Widerspruch undenkbar erscheinen lässt, einer großen Menge von Physiklehrerinnen und Physikern aus dem Herzen und treibt, einen amerikanischen Cartoonisten zitierend die Polemik auf die Spitze: „If you can live with entropy you can live with anything“. Dagegen steht H. L. Callendars¹ (1863 – 1930) Überzeugung, Entropie könne auf eine Weise verständlich gemacht werden, „which any schoolboy could understand“ [2]. Konträrer könnte eine Antwort auf Heuser nicht ausfallen, wenn es denn eine Antwort wäre, denn das letzte Zitat stammt aus dem Jahr 1911, ist somit nahezu 100 Jahre älter als Heusers Polemik. Callendars Behauptung blieb nahezu unbeachtet und geriet in der „Physikergemeinde“ allzu schnell in Vergessenheit. Für die Didaktik der Physik war das eine Tragödie. Mehr als ein Mal bot sich die Chance, die Entropie so einzuführen, dass sie jeder Schuljunge – und wie wir heute gerne ergänzen, auch jedes Schulmädchen – verstehen kann. Und damit wird die Tragödie schon fast zur Tragikomödie, und wie es sich für die Tragikomödie gehört, geht sie gut aus, zumindest bleibt dies zu hoffen.

1. Akt – Blacks „Quantity of Heat“

Nachdem sich wissenschaftliche Untersuchungen von Wärmephänomenen 150 Jahre lang (ca. 1600 bis 1750) hauptsächlich im Messen der Temperatur erschöpften, schlug der schottische Arzt, Chemiker und Physiker Joseph Black² (1728 – 1799) in seinen „Lectures on the Elements of Chemistry“ einen neuen Weg ein:

„Wenn wir z. B. ein Pfund Wasser in einem Gefäß haben und zwei Pfund Wasser

¹ Professor der Physik am ‘Imperial College of Science and Technologies’ in London. 1886 beschreibt Callendar ein Präzisionsthermometer, das auf dem elektrischen Widerstand von Platin basiert. Er ist Autor des Buches „Properties of steam and thermodynamic theory of turbines“.

in einem anderen, und beide Wassermengen gleich heiß sind, was man mit einem Thermometer nachweist, dann ist offensichtlich, dass die zwei Pfund Wasser die doppelte ‚Menge an Wärme‘ enthalten müssen wie ein Pfund.“³ [3]

Als erster stellte er damit fest, dass zur Beschreibung thermischer Phänomene die Temperatur allein nicht ausreicht, eine zweite physikalische Größe also nötig ist. Er unterschied zwischen der, wie wir heute sagen, intensiven Größe Temperatur und der extensiven quantity of heat.⁴

Blacks Ausführungen legen es nahe, dass man eine Temperaturdifferenz als Ursache für einen Strom ansieht, und dass man seine quantity of heat sich als eine Art Substanz vorstellen darf. Damit wird Blacks quantity of heat zu einer Größe, von der man sich leicht eine Anschauung bilden kann. Man könnte hier einwerfen, dass sich hinter dieser Größe nichts anderes verbirgt als das, was man heute die Energieform Wärme nennt. Dabei übersieht man allerdings, dass Blacks Wärmemenge, also seine quantity of heat, eine Zustandsgröße ist und schon deshalb nicht mit der Energieform Wärme verwechselt werden darf, die keine Zustandsgröße ist. Davon wird später noch einmal und ausführlicher die Rede sein.

Heute wissen wir, dass Blacks Vorstellung von quantity of heat sich perfekt mit dem deckt, was wir Entropie nennen [4]. Unter Verwendung von Bohrmaschinen mit stumpfen Bohrern konnte man auf Grund der Reibung schon zu Blacks Zei-

² J. Black, schottischer Physiker und Chemiker, führte die ‚latente Wärme‘ und die ‚spezifische Wärme‘ ein. Er entdeckte das Kohlenstoffdioxid und Magnesium. Er war Professor für Chemie und Medizin an der ‚University of Edingburgh‘ und Freund und Mentor seines Assistenten James Watt.

³ „If, for example, we have one pound of water in a vessel, and two pounds of water in another, and these two quantities of water are equally hot, as examined by a thermometer, it is evident, that the two pounds must contain twice the quantity of heat that is contained in one pound.“ (Black, 1803 [3])

⁴ Quantity of heat = Wärmemenge

ten kaltes Wasser bis zum Kochen aufheizen. Es sollte also nicht überraschen, dass quantity of heat einem halben Erhaltungssatz gehorcht, dass sie zwar erzeugt, aber nicht zerstört werden kann. Was war der Grund, dass sich Blacks Vorstellung von quantity of heat sprich Entropie nicht durchsetzen konnte? Vermutlich war es die Überzeugung, dass etwas, was man sich mengen- oder substanzartig vorstellt, automatisch einen Erhaltungssatz erfüllen müsste. Eine „creatio ex nihilo“ kam einem göttlichen Schöpfungsakt gleich und war damals im wahrsten Sinne des Wortes undenkbar. Die psychologische Barriere war möglicherweise zu hoch, um das Erzeugen einer substanzartigen quantity of heat akzeptieren zu können. Ein kleiner Schritt noch, und man hätte eine Anschauung von der Entropie gehabt, die jeder Schuljunge hätte verstehen können – die erste Chance war ungenutzt vertan.

2. Akt – Carnots ‚Calorique‘

Auf der Suche nach Antworten auf die Fragen „Gibt es eine prinzipielle Grenze für die Weiterentwicklung von Wärmekraftmaschinen?“ und „Wodurch ist die Grenze festgelegt?“ formulierte Carnot (1796 – 1832) in seinem Werk „Réflexions sur la puissance motrice du feu“:

„Die Erzeugung von bewegender Kraft ist daher bei Dampfmaschinen nicht [...] auf einen wirklichen Verbrauch des Wärmestoffs⁵ zurückzuführen, sondern auf seinen Übergang von einem heißen zu einem kalten.“⁶ [5] Um den Inhalt dieses Satzes seinen Lesern zu veranschaulichen, setzt Carnot die Dampfmaschine in Analogie zu einem Wasserrad.⁷ Beiden ‚Maschinen‘ gemeinsam ist, dass sie zwei Reservoir benötigen. So gilt für die Dampfmaschine: Calorique – also Wärmestoff – kann

⁵ Das französische Wort ‚calorique‘ wurde von Ostwald mit ‚Wärmestoff‘ und das Wort ‚chaleur‘ mit Wärme übersetzt.

⁶ Hervorhebungen dieser Stelle finden sich sowohl in der deutschen Übersetzung [5] als auch in Carnots Original [6].

⁷ And I cherish more than anything else the Analogies, my most trustworthy masters; Johannes Kepler (Optics, Quoted in Polyá, 1973)

Arbeit (bewegende Kraft) verrichten, wenn der Wärmestoff von einem Reservoir höherer Temperatur T_1 zu einem Reservoir tieferer Temperatur T_2 fließt.

In Analogie dazu gilt für das Wasserrad: Masse kann Arbeit verrichten, wenn sie von einem Reservoir höheren Gravitationspotenzials gh_2 zu einem Reservoir tieferen Gravitationspotenzials gh_1 strömt. Bei vorgegebenen Temperaturen bzw. Gravitationspotenzialen arbeiten beide Maschinen optimal, d. h. beide liefern maximale Arbeit, wenn sie reversibel arbeiten. Um Carnots Analogie zur Wärmemaschine vollends gerecht zu werden, müsste man das Wasserrad etwas gekünstelt Massenmaschine [7] nennen.

Abb. 1 veranschaulicht die prinzipielle Funktionsweise beider Maschinen und macht die Analogie auch auf der grafischen Ebene deutlich. Aus heutiger Sicht sind Carnots Überlegungen korrekt, wenn wir Carnots ‚calorique‘ mit der Größe Entropie gleichsetzen. Die verrichtete Arbeit kann dann als

$$W = \Delta E = \Delta S (T_2 - T_1)$$

bzw.

$$W = \Delta E = \Delta m (gh_2 - gh_1)$$

im analogen Fall des Wasserrads geschrieben werden. Dabei ist ΔS die Entropiemenge, die vom Reservoir höherer zum Reservoir tieferer Temperatur strömt. Entsprechend ist Δm die Masse, die vom Reservoir höheren zum Reservoir tieferen Gravitationspotenzials strömt.

Wieder war für eine Größe, die wir heute Entropie nennen, ein Konzept entwickelt, das sehr anschaulich ist. Der Grund dafür ist, dass Carnot von *calorique* wie von einem Stoff spricht. Eine bessere Entscheidung als die Masse, Inbegriff des

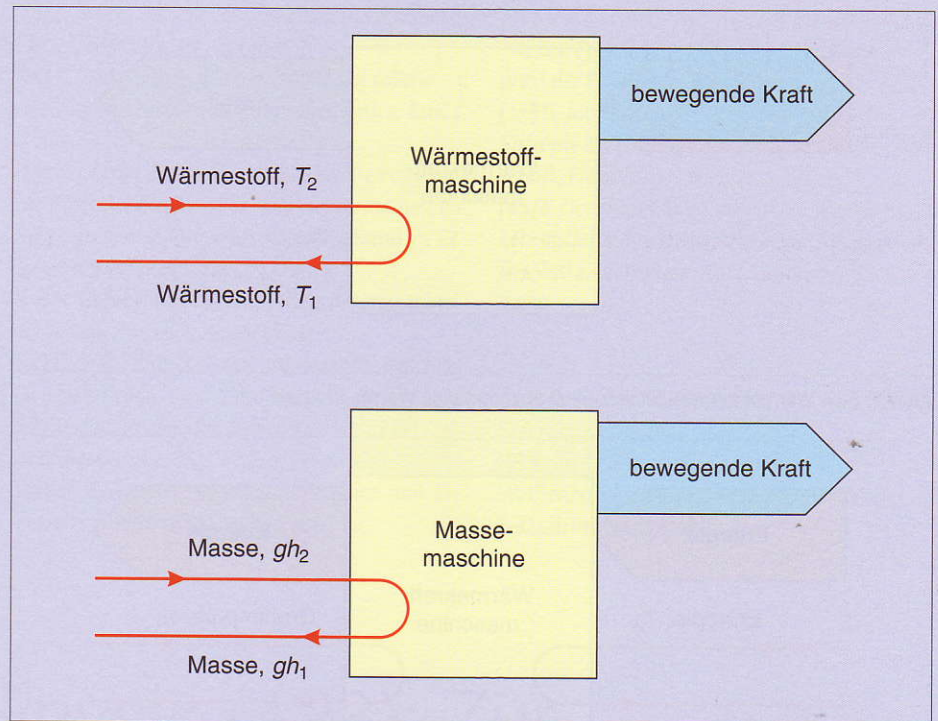


Abb. 1: Flussdiagramme zur Veranschaulichung der Carnotschen Idee von Dampfmaschine und Wasserrad⁸

Stofflichen, als analoge Größe zu wählen, konnte nicht getroffen werden.

Es lohnt sich, nach den Gründen zu suchen, weshalb auch diese Chance, es war die zweite, ungenutzt blieb. Vermutlich gibt es zwei davon. Zum ersten dürfte die Stoffartigkeit des Wärmestoffs, als realer Stoff und damit quasi als ein zusätzliches chemisches Element verstanden, für viele immer noch zwangsläufig die Erhaltung der Größe bedeuten.⁹ Carnot selbst hatte damit kein Problem. Deutlich wird das, wenn er schreibt:

„Der in der Feuerung durch Verbrennung entwickelte Wärmestoff (*calorique*) durchdringt die Wände des Kessels, und erzeugt den Dampf, indem er sich sozusagen demselben einverleibt.“¹⁰ [5].

Der zweite Grund dürfte von größerem Gewicht gewesen sein. Es war die Einführung der Größe Energie durch Joule (1814–1889) und Mayer (1814–1878). Natürlich war die Einführung der Energie für die

⁹ Nur so ist ein Satz von H. Berg zu verstehen, den er in der Einleitung zu Oswalds Klassiker Band 37, Auflage 1 (2003) schreibt: „Obwohl er [Carnot] fälschlicherweise von einem Wärmestoff ausging...“ [5]

¹⁰ Heute würde man sagen: Beim Verbrennen wird Entropie erzeugt. Diese strömt (konduktiv) durch die Wände des Kessels und steckt nach dem Phasenwechsel im Wasserdampf. Letzteres kann man übrigens von der Energie nicht behaupten. [8]

Natur- und Ingenieurwissenschaft eine große Errungenschaft. Das Missgeschick bestand darin, dass ihre Erfinder das alte Konzept der Wärme mit einer sogenannten Energie(austausch)-form gleichsetzten. Anders als *Blacks quantity of heat* und *Carnots calorique* verlor damit die Wärme ihren Status als Zustandsgröße. Sie wurde zu einer einem Prozess zugeordneten Größe, ein Umstand, den man leicht übersieht, weshalb die Autoren vieler Physikbücher vor einer solchen Verwechslung eindringlich warnen: „Es ist demnach korrekt zu sagen, dass ein System eine große Menge ‚Innerer Energie‘ enthält, es ist aber nicht korrekt, wenn man sagt, dass ein System eine große Menge ‚Wärme‘ oder eine große Menge ‚Arbeit‘ enthalte. ‚Wärme‘ ist etwas, das nicht in einem System enthalten ist. Sie ist eher ein Maß für die Energie, die verursacht durch einen Temperaturunterschied, von einem zu einem anderen System strömt.“¹¹ [9]. Das Verbot, von Wärme so zu sprechen, als könnte sie in einem Körper enthalten sein, führte dazu, dass der Gebrauch des Wortes ‚Wärme‘ in der Physik im krassen Widerspruch zu seinem

¹¹ „It is correct then, to say that a system has a large amount of internal energy, but it is not correct to say that a system has a large amount of heat or a large amount of work. Heat is not something that is contained in a system. Rather, it is a measure of energy that flows from one system to another because of a difference in temperature.“ [9]

⁸ Die Beschreibung von Dampfmaschine und Wasserrad, will man sie wissenschaftlich nennen, müssen von der konkreten Realisierung unabhängig sein. „Um das Princip der Erzeugung von Bewegung durch Wärme in seiner ganzen Allgemeinheit zu betrachten, muss man sie sich unabhängig von jedem Mechanismus und jedem besonderen Agens vorstellen; man muss Überlegungen durchführen, welche ihre Anwendung nicht nur auf Dampfmaschinen haben, sondern auf jede denkbare Wärmemaschine, welches auch der Stoff sei, und in welcher Art man auf ihn wirkt.“ [5] Dies hat u. a. die Konsequenz: „Überall, wo ein Temperaturunterschied besteht, und wo daher die Wiederherstellung des Gleichgewichts des Wärmestoffs eintreten kann, kann auch die Erzeugung von bewegender Kraft stattfinden.“ [5]

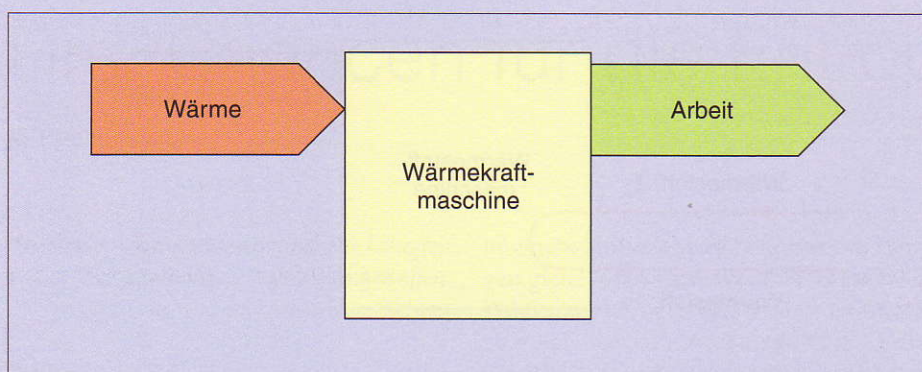


Abb. 2: Eine Wärmekraftmaschine wandelt ankommende Wärme in Arbeit um.

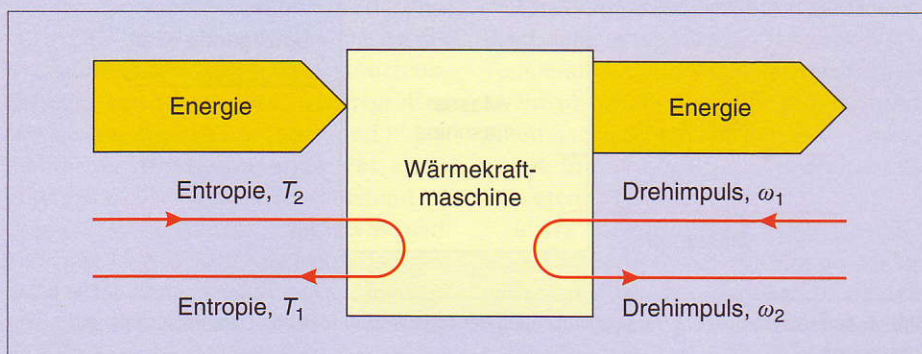


Abb. 3: Energieumlader-Diagramm der Wärmekraftmaschine

Gebrauch im täglichen Leben steht. Selbstverständlich sagt jeder, das Wasser einer Wärmflasche enthalte umso mehr Wärme, je höher die Temperatur ist – es sei denn, er ist Physiker. Der weiß, dass man diesen Satz nicht sagen darf. Die Änderung der Bedeutung des Wortes ‚Wärme‘ in der Physik kann man auch in einer Modifikation unseres Flussbildes verdeutlichen. Die Wärmekraftmaschine wird zum Energiewandler, sie bekommt Wärme, die sie nicht besitzen kann, und gibt Arbeit ab, die sie nicht besessen hat.¹² Da das alte Konzept der Zustandsvariable Wärme (*quantity of heat* und *calorique*) aus der Physik verschwunden war, war es auch nicht mehr möglich, Wärmebilanzen zu machen. Physiker, aber auch Chemiker und Ingenieure befanden sich nun in einer schwierigen Situation. Sie brauchten eine Größe, die den Wärmeinhalt eines Körpers angab, die aber nicht Wärme heißen durfte.

Intermezzo mit Folgen – Clausius' Entropie

Clausius (1822-1888) führte die Entropie über eine Gleichung ein, die die Änderung des Entropieinhaltes eines Körpers mit der dabei reversibel zugeführten ‚Wärme‘ (Energieaustauschform) verknüpft.

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}$$

Das δ -Zeichen in δQ_{rev} deutet an, dass es sich bei der reversibel absorbierten Wärme nicht um eine Zustandsvariable handelt, was sie aber sein müsste, um ΔQ_{rev} schreiben zu können. Die Entropie verliert aufgrund dieser Definition jegliche Anschauung; mit weitreichenden Konsequenzen: Wir können uns keine Anschauung von Entropiedichte machen. Wir können uns nicht vorstellen, dass Entropie strömen kann und nur schwer akzeptieren, dass Entropie gespeichert werden kann. Entropie ist zu einem der schwierigsten Konzepte der Physik geworden. Sie ist schon gar nicht einem Schuljungen zumutbar. Es wundert also nicht, wenn Callendar meint, „Eine solche Definition spricht nur Mathematiker an“ [2]. Die Wiederholung des eingangs aufgeführten Zitats des Mathematikers Heuser, „Das Konzept der Entropie ist ohne Zweifel eines der okkultesten Konzepte der Physik.“ [1] belegt indes, dass auch Mathematiker die Clausius'sche Definition nicht erhellend finden.

3. Akt – Auferstehung der Black'schen Quantity of heat und Carnot'schen Calorique

Callendar beginnt seine ‚Presidential Address‘ die den Titel „The Caloric Theory of Heat and Carnot's Principle“ trägt, mit dem vielsagenden Satz:

„Die calorische Theorie der Wärme ist jetzt schon so lange vergessen, dass sie kaum noch erwähnt wird, es sei denn als Beispiel für ursprüngliche Unwissenheit; aber sie war überhaupt nicht so unlogisch, wie sie im allgemeinen dargestellt wird.“ [2]

In seiner Publikation beweist Callendar akribisch, dass die Entropie, wie sie Clausius entwickelt hat, und die ‚Wärme‘ (*calorique*), wie sie Carnot verstanden hat, die gleichen Größen sind. Für Callendar ist die Anschaulichkeit des Carnot'schen *calorique* (= Wärme in der Umgangssprache) damit eins zu eins auf die Entropie übertragbar.

Das war der Stand im Jahr 1911. Die „Physikergemeinde“ nahm von Callendars Beweis jedoch keine Notiz. Die Thermodynamik war fertig entwickelt und es gab andere Gebiete der Physik, denen sich zuzuwenden eher lohnte. 1972 veröffentlichte G. Job sein Buch „Neudarstellung der Wärmelehre – die Entropie als Wärme“. [11]. Wie schon der Titel vermuten lässt, spricht der Autor über Entropie wie es Black über *quantity of heat* und Carnot über *calorique* getan haben. G. Falk, der die Arbeit von Job kannte, aber, wie auch Job, nicht die von Callendar, bewies 1985 erneut, was Callendar bewiesen hatte. Anders als Callendar schloss Falk in seinen Ausführungen auch Blacks Vorstellungen mit ein und kommt zum Schluss: „Entgegen weitverbreiteter Lehrmeinung handelt es 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 [1824] 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 die Didaktik sein – besagt es doch, dass die Entropie anschaulich verstanden werden kann als Menge der Wärme. Diese wie eine Art Substanz betrachtete Wärme befolgt einen halben Erhaltungssatz: Sie kann zwar erzeugt, aber nicht vernichtet werden.“ [4]

Abb. 3 zeigt eine letzte Modifikation des Wärmekraftmaschinen-Diagramms. Die Wärmekraftmaschine (WKM) bekommt Energie mit dem Träger Entropie und lädt sie auf den Träger Drehimpuls um. Die Entropie kommt bei der höheren Temperatur T_2 an und verlässt die WKM bei der niedrige-

¹² Interessant ist, dass in diesem Umwandler-Diagramm die beiden einzigen Größen auftauchen, die keine Zustandsgrößen sind. Alle anderen Größen in der Physik sind Zustandsgrößen.

ren Temperatur T_1 . Auf der anderen Seite kommt der Drehimpuls bei einer niedrigeren Winkelgeschwindigkeit ω_1 in die WKM und verlässt sie wieder bei einer höheren Winkelgeschwindigkeit ω_2 . [12] Die Entropie hat ihre dritte Chance so eingeführt zu werden, dass sie jedes Schulmädchen und jeder Schuljunge verstehen kann. Ob auch diese Chance vertan oder doch genutzt wird, wird die Zukunft zeigen.

Literatur

[1] H. Heuser: *Unendlichkeiten*, Teubner Verlag, Wiesbaden 2008

[2] H. L. Callendar: *The Caloric Theory of Heat and Carnot's Principle*, Proc. Phys. Soc. London, 23 (1911) 153

[3] J. Black: *Lectures on the Elements of Chemistry*, J. Robinson ed., Edinburgh

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

[5] S. Carnot: *Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers*, 1824. Übersetzt und herausgegeben von W. Ostwalds Klassiker Band 37, Reprint der Bände 37, 180, 99 (2003)

[6] S. Carnot: *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, Bachelier, Paris 1824

[7] G. Falk: *Physik, Zahl und Realität*, Birkhäuser, Basel 1990

[8] M. Pohlig: *Antrieb und Wärmebilanz bei Phasenübergängen*, PdN-PhiS 2/55 (2006)

[9] P. A. Tipler: *Physics for science and Engineers*, Palgrave Macmillan 2003

[10] R. Clausius: *Über die bewegende Kraft der Wärme* (1850). Ostwalds Klassiker Band 37 Reprint der Bände 37, 180, 99. 2003

[11] G. Job: *Neudarstellung der Wärmelehre – die Entropie als Wärme*, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt a. M. 1972

[12] F. Herrmann: *Der Karlsruher Physikkurs, Ein Lehrbuch für den Unterricht in der Sekundarstufe 1, Teil 1*, 6. Auflage, Aulis Verlag Deubner, Köln 2003

Anschrift des Verfassers

StD Michael Pohlig,
Wilhelm-Hausenstein-Gymnasium,
Weißenburger Str. 42, 76448 Durmersheim,
E-Mail: michael@pohlig.de