

Die linke und die rechte Seite der Gleichung $\Delta S = Q/T$



FRIEDRICH HERRMANN – MICHAEL POHLIG

Wärme Q und Entropie S sind zwei zentrale Größen der Wärmelehre. Die eine, nämlich Q , scheint die einfachere, anschaulichere Größe zu sein, die andere ist bekannt dafür, schwierig zu sein. Wir zeigen, dass dieser Eindruck die Sache nicht trifft: die Wärme Q ist eine außerordentlich tückische Größe. Die Entropie dagegen hat ihren schlechten Ruf zu Unrecht. Hat man einmal verstanden, dass die Entropie nahezu perfekt das beschreibt, was man umgangssprachlich unter Wärme versteht, so entdeckt man, dass sie eine der anschaulichsten physikalischen Größen überhaupt ist.

1 Einleitung

Es geht im Folgenden um die Einführung von zwei Größen im Physikunterricht: die Wärme Q und die Entropie S . Die Größen hängen über die Gleichung

$$\Delta S = \int_{\text{rev}} \frac{dQ}{T} \quad (1)$$

zusammen, wie sie CLAUSIUS, der als Erfinder der Entropie gilt, formuliert hat (MESCHÉDE, 2006). T ist die absolute Temperatur. Die Beiträge zum Integral müssen einem reversiblen Prozess entsprechen. In Schulbüchern findet man die Gleichung in der vereinfachten Form

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (2)$$

Sie wird verwendet, um die Entropie zu definieren, d.h. die Wärme Q und die absolute Temperatur T wurden vorher eingeführt.

Bei der Einführung einer neuen physikalischen Größe hat man immer die Wahl, die Größe operational zu definieren, d.h., indem man ein Messverfahren angibt, oder sie aus anderen Größen abzuleiten. Wenn man sie ableitet, setzt man voraus, dass die Ausgangsgrößen bekannt sind, d.h. dass man weiß, wie man ihre Werte bekommt, und dass man eine gute Anschauung von ihnen hat. Man hofft, dass die Definition auch zu einer Anschauung von der neuen Größe führt.

Wir betrachten zunächst ein etwas einfacheres Beispiel, bei dem wir in einer ähnlichen Situation sind. Den Impuls führt man gewöhnlich ein als abgeleitete Größe, über die Definitionsgleichung

$$p = m \cdot v$$

Von Masse und Geschwindigkeit haben wir eine klare Vorstellung, und wir wissen, wie man sie misst. Daraus ergibt sich auch eine Anschauung der Größe Impuls: Ein Körper, der schwer ist und sich schnell bewegt, hat viel Impuls. Er misst etwas, das man umgangssprachlich als Wucht bezeichnen könnte. Man hätte den Impuls aber auch über eine direkte Messung einführen können, etwa mit dem ballistischen Pendel.

Zurück zu Wärme und Entropie. Hier hat man so entschieden: Man führt zunächst die Energieform Wärme und die absolute Temperatur ein und definiert dann die Entropie über Gleichung (1) bzw. (2). Wir wollen im Folgenden zeigen, dass das keine gute Idee ist (für eine ausführlichere Darstellung siehe auch HERRMANN & POHLIG, 2021).

2 Urteile und Vorurteile zu Entropie und Wärme

Wir fragen zunächst danach, welche der beiden Größen S und Q die einfachere, die anschaulichere ist.

Spontan mag man sich für die Wärme entscheiden. Wärme ist Energie, und was Energie ist, weiß man aus anderen Zusammenhängen. Wärme ist diejenige Energie, die etwas zu tun hat mit dem warm oder kalt sein eines Körpers. Wenn man es bei dieser Vorstellung belässt, scheint die Wärme eine anschauliche Größe zu sein.

Spontan mag man sich für die Wärme entscheiden. Wärme ist Energie, und was Energie ist, weiß man aus anderen Zusammenhängen. Wärme ist diejenige Energie, die etwas zu tun hat mit dem warm oder kalt sein eines Körpers. Wenn man es bei dieser Vorstellung belässt, scheint die Wärme eine anschauliche Größe zu sein.

Die Entropie dagegen erscheint schwierig. Schon Gleichung (1) lässt das erkennen. Man muss ein Integral bilden, wobei eine merkwürdige Integrationsbedingung einzuhalten ist. Hier ein typisches Urteil (HEUSER, 2008, 30):

„Der Entropiebegriff gehört ohnehin zu den okkultesten Begriffen unserer Physik, die an Okkultem keinen Mangel leidet. Auf einem amerikanischen Cartoon sagt ein gelehrter Herr zu einem anderen: If you can live with entropy you can live with anything.“

Außerdem lernt man – auch im Chemieunterricht –, dass die Entropie ein Maß für Unordnung ist. Man versteht sie anscheinend nur richtig, wenn man die Welt auf der mikroskopisch-statistischen Ebene beschreibt. Konsequenterweise müsste man das gleiche Argument auch für die Temperatur gelten lassen und sagen: „Die Temperatur ist der Parameter in der Boltzmann-Verteilung, der umso größer ist, je mehr Energie das System enthält. Erst wenn du das weißt hast, du die Temperatur verstanden.“

Vielleicht lernt man auch noch, die Entropie sei ein Maß für die Irreversibilität eines Prozesses. Nun hat die Entropie aber auch einen Wert, wenn ein reversibler Prozess abläuft und auch wenn gar kein Prozess stattfindet. Was soll man sich in diesen Fällen unter Entropie vorstellen?

3 Eine anderes Urteil über die Wärme

Tatsächlich ist die physikalische Größe Q , der man den Namen Wärme gegeben hat, eine der schwierigsten Größen der Physik. Der Grund ist, dass sie eine so genannte Prozessgröße ist.

Neben der Wärme gehört nur noch die Arbeit in diese Kategorie; keine andere physikalische Größe ist eine Prozessgröße.

Was bedeutet es, eine Prozessgröße zu sein? Eine „normale“ physikalische Größe hat für eine gegebene Anordnung zu einem gegebenen Zeitpunkt einen bestimmten Wert. Manchmal, vor allem in der Thermodynamik, betont man diese Tatsache, indem man diese normalen Größen als Zustandsgrößen bezeichnet. Aber das Kriterium für eine Zustandsgröße schließt auch alle nichtthermodynamischen Größen ein: elektrische Feldstärke, elektrische Ladung, elektrische Stromstärke, Impuls, Winkelgeschwindigkeit, um nur einige zu nennen. Die Bezeichnung Zustandsgröße ist insofern überflüssig, als sie etwas bezeichnet, was der Normalfall ist.

Die beiden Prozessgrößen Wärme und Arbeit unterscheiden sich von allen anderen Größen darin, dass sie in einem gegebenen

Zustand eines physikalischen Systems keinen Wert haben. Nehmen wir irgendeinen Gegenstand, der vor uns steht: die Wärme (im Sinn der Physik) hat für ihn keinen Wert. Das bedeutet nicht etwa, dass ihr Wert null ist. Es bedeutet viel mehr: Wenn man nach ihrem Wert fragt, so hat man eine „dumme Frage“ gestellt.

Nun wäre es nicht ganz so schlimm, wenn man der Größe Q einen anderen, z.B. griechischen Namen gegeben hätte, unter dem man sich nichts vorstellen kann. Die Bezeichnung Wärme ist aber so suggestiv, dass man sich nur schwer damit abfinden kann, dass die Frage danach, wieviel Wärme ein Körper enthält keinen Sinn haben soll.

Wir wollen nachsehen, wie die Lehrbücher mit dieser Tatsache umgehen, siehe zunächst die Zitate 1 bis 3 In Kasten 1. Die Sätze sagen, dass Energie von einem Körper, nennen wir ihn A zu einem Körper B fließt, übertragen wird oder übertritt. Selbstverständlich nimmt dabei der Energieinhalt von A ab, und der von B zu. Die übergehende Energie nennt man Wärme.

Wenn man aber sagt, dass Wärme von A nach B geht, so beinhaltet diese Aussage, dass die Wärme vorher in A war, und sich nachher in B befindet. Dies ist keine physikalische Aussage; es ist die Logik, die unserer Sprache innewohnt. Jeder, der die Zitate 1 und 2 in Kasten 1 liest, wird so schließen. Es ist nicht zu erkennen, warum man nicht sagen dürfte, dass die Wärme von A ab- und die von B zunimmt.

Ähnlich verhält es sich mit dem Zitat 4 in Kasten 1. Wärme wird freigesetzt. Es ist vernünftig und logisch zu schließen, dass sie vorher zwar nicht frei, aber doch schon vorhanden war.

Die Lernenden werden mit dem Problem allein gelassen, und werden sich damit trösten, dass sich ja die Sätze im Bedarfsfall leicht nachsprechen lassen. Das trägt natürlich nicht dazu bei, dass die Physik als ein Fach wahrgenommen wird, in dem man mit seinem gesunden Menschenverstand zurechtkommt. Das Zitat 3 in Kasten 1 lässt immerhin erkennen, dass der Autor weiß, was er den Lernenden zumutet.

Schließlich noch eine Bemerkung zu Zitat 5 in Kasten 1, bei der versucht wurde, die Unstimmigkeit der Formulierung etwas abzumildern. Hier wird etwas genannt, das sich zuerst in A befindet, dann von A nach B geht, und dann in B steckt: die thermische Energie. Warum man ihm zwischendrin einen anderen Namen gibt, wird allerdings nicht klar. Tatsächlich ist es versteckt in dem kurzen Zwischensatz, es werde keine Arbeit verrichtet. Mit dieser Formulierung hat man aber ein neues Problem. Was versteht man unter thermischer Energie? Die Annahme scheint zu sein, dass es der Anteil der inneren Energie ist, der von der Temperatur abhängt. Nun lässt sich aber die innere Energie nicht in additive Beiträge zerlegen, von denen einer von der Temperatur abhängt und der Rest temperaturunabhängig ist. Wir landen also wieder bei der gesamten inneren Energie. Aber diese möchte wohl niemand mit der Wärme identifizieren.

Zitat 1

„Energie, die von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper niedrigere Temperatur fließt, heißt Wärmeenergie.“
GLAS, G. et al. (2020). *Metzler Physik*, Westermann, S. 162.

Zitat 2

„Die Wärme gibt an, wie viel innere Energie von einem Körper auf einen anderen übertragen wird.“
HOCHÉ, D. et al. (2022). *Duden Physik* Gymnasiale Oberstufe, Duden Schulbuch-Verlag, S. 175.

Zitat 3

„Mit dem Wort Wärme beschreibt man also die aufgrund eines Temperaturunterschieds übertretende Energie. Sie fließt stets von selbst vom heißeren zum kälteren Körper. Verwechsele nie die innere Energie mit der Wärme! Ein Körper hoher Temperatur hat viel innere Energie. Gibt er davon etwas ab, so nennt man die abfließende Energieportion, und nur diese, während des Abfließens Wärme. Im kalten Körper angekommen, ist es keine Wärme mehr; vielmehr wurde durch diesen Energieübergang dort die innere Energie und damit die Temperatur erhöht.“
BADER, F. et al. (2022). *Dorn-Bader Physik* in einem Band, Schroedel Verlag, S. 230.

Zitat 4

„Die Schmelzwärme, die man zum Schmelzen benötigt, wird beim Erstarren als Erstarrungswärme wieder freigesetzt.“
HOCHÉ, D. et al. (2022). *Duden Physik* Gymnasiale Oberstufe, Duden Schulbuch-Verlag, S. 179.

Zitat 5

„Das bedeutet, dass der eine Metallklotz thermische Energie abgibt und der andere Klotz diese thermische Energie aufnimmt. Bei diesem Vorgang wird keine mechanische Arbeit verrichtet. Die so übertragene thermische Energie heißt Wärme.“
APPEL, T. R. et al. (2022). *Impulse Physik* Oberstufe, Ernst Klett Verlag, S. 424.

Kasten 1. Zitate aus Schulbüchern

Wir möchten noch etwas einschieben: Man sollte auf keinen Fall die Frage stellen: Was ist Wärme wirklich? Es gibt nichts in der realen Welt, von dem wir behaupten könnten, es sei Wärme. Vielmehr konstruieren wir Theorien, mit denen sich die Natur mathematisch beschreiben lässt. Den Variablen der Theorie, also den physikalischen Größen, geben wir Namen, die, wenn sie gut gewählt sind, uns dabei helfen, uns ein Bild von ihnen zu machen.

Wir können zusammenfassen: Die Wärme Q ist eine tückische Größe. Der Eindruck, sie sei anschaulich, entsteht nur, wenn man nicht genau hinsieht.

4 Ein anderes Urteil über die Entropie

Wenn man die Entropie einführt wie oben geschildert, nämlich über Gleichung (1) oder (2), als Maß für die mikroskopische Unordnung oder als Maß für die Irreversibilität eines Prozesses erscheint sie tatsächlich als schwierige Größe.

Nun kann man sie aber auch anders einführen, und dabei stellt sich heraus, dass sie nicht nur nicht schwierig ist, sondern dass sie eine der anschaulichsten physikalischen Größen überhaupt sein kann.

Schon 1911 wies CALLENDAR (1911) darauf hin, dass die Entropie nichts anderes ist, als der von CARNOT eingeführte Wärmebegriff (im Original sowohl Chaleur, als auch Calorique genannt). Diese Größe ist eine Zustandsgröße, und sie ist anschaulich.

Uns hilft aber besonders eine überraschende Feststellung von JOB (1972): Die Entropie ist ein Maß für etwas, wovon auch jeder physikalische Laie eine sehr gute und klare Vorstellung hat, nämlich für das, was man umgangssprachlich Wärme nennt. Die Übereinstimmung ist so gut wie wir sie bei nur wenigen anderen physikalischen Größen kennen, und sie ist viel besser, als etwa bei Kraft oder Impuls.

In Tabelle 1 haben wir einige umgangssprachliche Aussagen formuliert, in denen das Wort Wärme vorkommt. Wenn man in diesen Sätzen das Wort „Wärme“ durch „Entropie“ ersetzt, bleiben sie korrekt. Damit keine Verwechslung passiert zwischen dem Wort Wärme im umgangssprachlichen Sinn und dem Namen der physikalischen Größe Q , haben wir es mit einem Sternchen versehen.

Wenn man diese Einsicht vermittelt, können Schüler/innen korrekt mit der Entropie umgehen. Es genügt zu erklären: Das was ihr umgangssprachlich „Wärme“ nennt, heißt in der Physik Entropie.

Ein entsprechender Unterricht, in dem auch ein Messverfahren der Entropie behandelt wird, ist die Wärmelehre im Karlsruher Physikkurs (HERRMANN, HAAS et al., 2023; HERRMANN, HAUPTMANN & SCHWARZE, 2023).

Es gibt inzwischen eine Reihe von Lehrbüchern für den Hochschulbereich, die die Thermodynamik entsprechend präsentieren (JOB & RÜFFLER, 2022; FUCHS, 2011; STRUNK, 2015; MEYN, 2021).

5 Schlussbemerkungen

Die Prozessgröße Wärme Q ist eine Größe, mit der nicht nur Schüler/innen Probleme haben und die leicht missverstanden wird. Auch die meisten Studierenden an der Universität können nicht erklären, warum es keinen Sinn hat, vom Wärmeinhalt eines Systems zu sprechen.

Wenn man von dieser Größe ausgehend die Entropie einführt, entsteht die bekannte Vorstellung, dass die Entropie eine besonders schwierige Größe ist. Tatsächlich kann die Entropie bei geeigneter Einführung zu einer der anschaulichsten Größen überhaupt werden. Nämlich wenn man sie einführt als ein Maß für das, was man umgangssprachlich Wärme nennt.

Die Wärme der Umgangssprache	Die Entropie
Ein Gegenstand enthält mehr Wärme* wenn er heiß als wenn er kalt ist.	Ein Gegenstand enthält mehr Entropie wenn er heiß als wenn er kalt ist.
Bei gleicher Temperatur enthält ein großer Gegenstand mehr Wärme* als ein kleiner.	Bei gleicher Temperatur enthält ein großer Gegenstand mehr Entropie als ein kleiner.
Wärme* geht von selbst von Stellen höherer zu Stellen niedrigerer Temperatur.	Entropie geht von selbst von Stellen höherer zu Stellen niedrigerer Temperatur.
Eine Wärmepumpe befördert Wärme* von draußen ins Haus hinein.	Eine Wärmepumpe befördert Entropie von draußen ins Haus hinein.
Bei der Verbrennung von Holz im Ofen, oder vom Wachs einer Kerze wird Wärme* erzeugt, d.h. es entsteht Wärme* , die vorher nicht da war.	Bei der Verbrennung von Holz im Ofen, oder vom Wachs einer Kerze wird Entropie erzeugt, d.h. es entsteht Entropie, die vorher nicht da war.
Auch bei mechanischer Reibung und in einem elektrischen Widerstand wird Wärme* erzeugt.	Auch bei mechanischer Reibung und in einem elektrischen Widerstand wird Entropie erzeugt.

Tabelle 1. Vergleich Wärme der Umgangssprache mit der Entropie

Literatur

CALLENDAR, H.L. (1911). The Caloric Theory of Heat and Carnot's Principle. *Proc. Phys. Soc. Lond.*, 23, 153–189.

FUCHS, H. (2011). *The Dynamics of Heat*. Springer.

HERRMANN, F., HAAS, K., LAUKENMANN, M., MINGIRULLI, L., MORAWIETZ, P. & SCHMÄLZLE, P. (2023). *Der Karlsruher Physikkurs für die Sekundarstufe I, Gesamtband*. KIT. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000154347> (31.01.2025).

HERRMANN, F., HAUPTMANN, H. & SCHWARZE, H. (2023). *Der Karlsruher Physikkurs für die Sekundarstufe II: Thermodynamik*. KIT. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000154291> (31.01.2025).

HERRMANN, F. & POHLIG, M. (2021). Which Physical Quantity deserves the name "Quantity of Heat"? *Entropy*, 23(8), 1078. <https://doi.org/10.3390/e23081078>.

HEUSER, H. (2008). *Unendlichkeiten – Nachrichten aus dem Grand Canyon des Geistes*. Teubner, 1. Auflage.

JOB, G. (1972). *Neudarstellung der Wärmelehre*. Akademische Verlagsgesellschaft.

JOB, G. & RÜFFLER, R. (2022). *Physikalische Chemie*. Springer Spektrum, 2. Auflage.

MESCHEDE, D. (2006). *Gerthsen Physik*. Springer, 23. Auflage.

MEYN, J.-P. (2021). *Wärme und Energie*. De Gruyter Studium.

STRUNK, C. (2015). *Moderne Thermodynamik*. De Gruyter.

Prof. Dr. FRIEDRICH HERRMANN, f.herrmann@kit.edu, ist jetzt im Ruhestand. Er hat am KIT Student/inn/en der Physik und des Lehramts Physik ausgebildet und war gleichzeitig Physiklehrer am Europagymnasium in Wörth am Rhein.

StD a.D. MICHAEL POHLIG, pohlig@kit.edu, war Physik-, Mathematik- und Informatiklehrer am Wilhelm-Hausenstein-Gymnasium in Durmersheim. Seit 2007 hat er am KIT einen Lehrauftrag im Bereich „Didaktik der Physik“. ■□