

155 Noch einmal: Die Messung der Entropie

ZUSAMMENFASSUNG

Die Entropie kann im Prinzip so gemessen werden wie andere mengenartige Größen auch: Man überträgt die zu messende Menge auf das Messgerät.

Gegenstand

Die Entropie gilt als schwierige Größe – unter anderem deshalb, weil man meint, sie sei schwer zu messen.

Mängel

Die Kenntnis eines Messverfahrens ist wichtig für das Verständnis einer neu eingeführten physikalischen Größe. Je leichter das Messverfahren zu durchschauen ist, desto besser; man kann auch sagen: je „direkter“ die Messung, desto direkter die Anschauung [1].

Oft ist aber das Messverfahren, das am leichtesten zu durchschauen ist, nicht gleichzeitig das genaueste und bequemste. Um ein Verständnis, eine „Anschauung“ für eine Größe zu erlangen, kann es daher zweckmäßig sein, ein Messverfahren vorzustellen, das zwar nicht genau und das vielleicht auch technisch schwer zu realisieren ist, das dafür aber transparent und begrifflich einfach ist.

Wie steht es in dieser Hinsicht mit der Entropie? Sie wird gewöhnlich eingeführt auf die Clausiussche Art: „Wir ordnen ... jedem Zustand des Systems eine Funktion S zu, die wir als die Entropie des Zustandes bezeichnen und deren vollständiges Differential dS bei einer reversiblen Änderung

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

ist, wobei dQ die aufgenommene Wärmemenge, T die Temperatur ist, bei der die Aufnahme erfolgt.“ [2]

Was für eine Messung man anstellen muss, um die Werte der Entropie zu bestimmen, ist aus einer solchen Definition allerdings schwer zu erschließen. Woran erkennt man, dass die Zustandsänderung des Systems, an dem man die Messung ausführen möchte, reversibel ist? Wie misst man die aufgenommene Wärmemenge? Oder kurz: Wie macht man's konkret?

Nun kann man die Entropie sehr bequem messen, indem man gerade die Erzeugbarkeit, also die Irreversibilität, ausnutzt [3]. Das wäre das technisch einfache (und billige und genaue) Verfahren. Wie könnte aber ein begrifflich einfaches Verfahren aussehen?

Zur Beantwortung dieser Frage orientieren wir uns daran wie man andere Größen misst, die mit der Entropie eine wichtige Eigenschaft gemeinsam haben: die mengenartigen oder extensiven Größen.

Für solche Größen kann die Messung im Prinzip immer folgendermaßen ablaufen: Man überträgt den zu messenden Betrag der Größe auf das Messgerät. Das Messgerät reagiert mit einem Ausschlag oder einer Anzeige.

In dieser Lage ist man etwa bei der elektrischen Ladung. Man überträgt die zu messende Ladung auf ein Elektrometer. Das Elektrometer zeigt einen dem Wert der Ladung entsprechenden Ausschlag. Die Messung ist zwar ungenau; sie zeigt aber deutlich eine Eigenschaft der elektrischen Ladung, nämlich, dass geladene Körper Kräfte aufeinander ausüben, und vor allem wird deutlich, dass die Größe Mengencharakter hat.

Analog kann man mit dem Impuls verfahren: Man überträgt ihn auf das „Messgerät“, und dieses reagiert sichtbar mit einem Ausschlag. Das ballistische Pendel stellt ein solches Messgerät dar. Ein ähnliches Verfahren der Impulsmessung wird in [4] beschrieben.

Kann man auf analoge Art die Entropie messen? Das entsprechende Gerät zeigt Abbildung 1: Ein Behälter mit einer Eis-Wasser-Mischung. (Eine etwas kompliziertere und technisch perfektere Variante ist das Bunsensche Eiskalorimeter.) Man führt der Eis-Wasser-Mischung die zu messende Entropiemenge zu. Dabei wird ein Teil des Eises geschmolzen. Die Menge des geschmolzenen Eises ist ein Maß für die zugeführte Entropie.

Da 1g flüssiges Wasser 1,40 J/K mehr Entropie hat als 1 g Eis, kann man an der Menge des geschmolzenen Eises direkt auf die zugeführte Entropie schließen. Da das flüssige Wasser eine größere Dichte hat als das Eis, kann man die Entropie auch direkt am Steigrohr ablesen.



Abb. 1. Man führt der Eis-Wasser-Mischung den zu messenden Entropiebetrag zu. Die Menge des dabei schmelzenden Eises ist ein Maß für die zugeführte Entropie.

Als technisches Messgerät ist das Gerät nicht geeignet. Das Problem ist: Man muss die zu messende Entropie auf das Messgerät bringen, ohne dabei neue Entropie zu erzeugen, d.h. in einem reversiblen Prozess. Das ist im Prinzip möglich, im Labor aber nicht leicht zu realisieren. Einzelheiten sind in [5] beschrieben.

Herkunft

Dass man ein so einfaches und im Grunde nahe liegendes Messverfahren gewöhnlich nicht vorstellt, hat wohl damit zu tun, dass man die Entropie nicht als mengenartige, bilanzierbare Größe versteht. Tatsächlich ist diese Eigenschaft kaum zu erkennen, wenn sie auf die Clausiussche Art eingeführt wird.

So wurde erst 1911, also über 50 Jahre nach Clausius' Arbeit, von Jaumann die lokale Bilanzgleichung, für die Entropie formuliert [6], übrigens im selben Jahr, als Callendar zeigte, dass die Clausiussche Entropie mit dem Carnotschen Caloricum übereinstimmt [7].

Entsorgung

Man lasse von der Behauptung ab, die Entropie sei eine schwer messbare Größe. Ihre Messung ist begrifflich von der selben Art wie die der elektrischen Ladung. Die praktische Messung, etwa im Physikunterricht der Schule ist sogar besonders einfach.

[1] *F. Herrmann*: Altlasten der Physik, Teil 2, Artikel 2.2: [Direkte und indirekte Messung](#)

[2] *Gerthsen, Kneser, Vogel*: Physik, 13. Auflage, Springer-Verlag Berlin, S. 183

[3] *F. Herrmann*: Altlasten der Physik, Teil 1, Artikel 16: [Die Messung der Entropie](#)

[4] *F. Herrmann, M. Schubart*: Measuring momentum without the use of $p = mv$ in a demonstration experiment, Am. J. Phys. 57, 858 (1989)

[5] *G. Job, R. Ruffler*: Physikalische Chemie: Eine Einführung nach neuem Konzept mit zahlreichen Experimenten (Studienbücher Chemie), Vieweg und Teubner 2010, S. 59

[6] *F. Jaumann*: Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze, Wiener Berichte CXX, Abt. IIa, S. 385-530.

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