

2 Deutung des Temperaturphänomens

Im DPG-Gutachten findet man den Satz: „Bekanntermaßen ist die Entropie eine der schwierigsten Größen der Physik.“ Leider erkenne ich aus dem Gutachten nicht, ob die Autoren einen Grund dafür angeben können. Es findet sich aber eine Aussage im Gutachten, die m. E. damit in Zusammenhang steht: „Der Begriff der Temperatur ist Schülern einfach zu vermitteln.“ Beim KPK heißt es etwas forsch: „Die eine dieser Größen ist die Temperatur, kennst Du schon.“ Beide Aussagen halte ich für zweifelhaft.

Ich bin der Überzeugung, dass uns die Entropie nur deshalb so schwierig erscheint, weil unsere Deutung des Temperaturphänomens auf einer Fehlvorstellung beruht, die aber so verfestigt ist, dass die „übliche“ Physik sich nicht davon lösen kann und im KPK auf die Empfindungsebene ‚warm-kalt‘ verwiesen wird. Ich vermute, dass es heute auf der Erde keinen lebenden Naturwissenschaftler gibt, dem in seiner Schulzeit im Rahmen der kinetischen Gastheorie nicht erzählt wurde, dass die Temperatur „mit der Heftigkeit der Bewegung“ der kleinen Teilchen zusammenhängt. Diese Verknüpfung – so schwammig sie auch ist – halte ich für eine Fehlvorstellung, die uns den einfachen Zugang zur Entropie verhindert. Eine Unzahl von Modellversuchen, Animationen sind auf dem Markt und verfestigen die Fehlvorstellung. Der KPK vermittelt zwar seinen Schülern diese Verknüpfung nicht, aber er bietet ihnen auch keine alternative Deutung und damit insgesamt keine Verständnismöglichkeit des Temperaturphänomens an.

Zur Auflösung dieser Verknüpfung wäre es hilfreich, der Frage nachzugehen: Wie bewegen sich Teilchen bei minus 50 K? Davor scheuen sich aber viele naturwissenschaftliche Lehrkräfte, weil sie unsicher sind, ob dies mit dem dritten Hauptsatz vereinbar sein kann. Wir blicken auf ein halbes Jahrhundert mit negativen absoluten Temperaturen als Deutung bestimmter thermodynamischer Phänomene zurück. (Literatur s. unten) Zunächst wurde in wissenschaftlichen Journalen darüber berichtet, dann in Hochschullehrbüchern und inzwischen haben diese Temperaturen in CD-Spielern und Laserpointern unseren Alltag erreicht. Die Physik wird weltfremd, wenn sie sich dieser Entwicklung verschließt.

Die Temperatur ist mit der Verteilung der thermischen Energie auf den gequantelten Energieniveaus eines Systems verknüpft und eine Inversion der Besetzungszahlen ermöglicht uns die negativen absoluten Temperaturen zu verstehen. Der KPK untersucht diese Frage, aber er scheut sich, diese Verknüpfung „Temperatur als Parameter der Verteilungskurve“ herzustellen, weil sie ihm eventuell als zu mathematisch abstrakt erscheint. Diesem Argument will ich mich nicht unbedingt verschließen, aber ich sehe einen Weg, der weiter führt.

Ein Vergleich mit dem radioaktiven Zerfall hat mir weitergeholfen. Die Halbwertszeit bei diesen Phänomenen kann ich einerseits als Parameter der zugehörigen Exponentialfunktion auffassen, andererseits aber auch als ein messbares Phänomen. Das ist im Falle der Temperatur aber ebenfalls möglich. Mit der Art der Verteilungskurve (der Besetzungszahlen der Energieniveaus) ist das Emissionsspektrum fest verknüpft und das Maximum der Emissionskurve ist ein messbares Phänomen. Aus den Emissionsspektren ermittelt man z. B. auch die Oberflächentemperaturen der Fixsterne. Die Planckschen Emissionskurven kann man als Funktion der Wellenlänge λ , der Frequenz f oder aber der Photonenenergie hf darstellen. Durch den Wienschen Verschiebungssatz besteht eine feste, messbare Relation zwischen der Energieverteilung auf den Niveaus und der Temperatur.

Die Neu-Definitionen von fundamentaler Temperatur und Entropie (gegenüber absoluter Temperatur und konventioneller Entropie) wie sie Kittel und Krömer vorschlagen werden der heutigen Entwicklung der Physik am besten gerecht. Gleichwohl hätte man bei genügender Weitsicht auch zu Carnots Zeiten darauf kommen können. Im Carnotschen Kreisprozess stellt sich der Wirkungsgrad als Quotient dar. Hätte man seinerzeit die Gaskonstante nicht herausgekürzt, so wäre damals bereits die Tür zur fundamentalen Temperatur offen gestanden:

$$\eta = \frac{R \cdot (T_w - T_k)}{R \cdot T_w} = \frac{R \cdot T_w - R \cdot T_k}{R \cdot T_w} = 1 - \frac{RT_k}{RT_w}$$

Beim Carnotschen Kreisprozess werden vier Arbeitsvorgänge ausgewertet, von denen aber nur zwei den Wirkungsgrad bestimmen: Bei der isothermen Expansion verrichtet das warme

Reservoir thermische Arbeit am System, um einfach nur die Temperatur konstant zu halten und bei der isothermen Kompression verrichtet das System thermische Arbeit am kalten Reservoir auch wiederum nur um die System-Temperatur konstant zu halten. Diese beiden Arbeitsbeträge sind nicht gleich groß und ihr Verhältnis bestimmt den Wirkungsgrad der Maschine.

Hätte man die Temperatur immer schon durch RT beschrieben, wäre dadurch automatisch die Entropie von den Energieeinheiten befreit gewesen. Statt $R \ln(W)$ nur noch $\ln(W)$, eine Anzahl, ein logarithmisches Maß für die Anzahl der Mikrozustände der dominanten Verteilung.

Im Lehrerheft zur Thermodynamik des KPK finde ich eine Fehleinschätzung der statistischen Thermodynamik: „*Und jemand, der nur die statistische Thermodynamik lehrt, kann kaum eines der Anwendungsprobleme lösen, die einem in der natürlichen und technischen Umwelt begegnen.*“ Es gibt keinen Zwang, „*nur die statistische Thermodynamik*“ zu lehren. Es ist auch nicht Aufgabe der Schule, sondern die der Ingenieure in der Industrie Anwendungsprobleme zu lösen. Die Aufgabe der Schule sehe ich darin, den Klassen ein Verständnis, und das heißt für mich eine plausible Deutung der Phänomene, nahe zu bringen. „Heiß“ und „kalt“ sind Wahrnehmungen, aber keine Deutungen des Temperaturphänomens, das dadurch im KPK nicht und in der üblichen Physik nur unvollständig verstanden werden kann. Ich denke, dass in Fragen der Temperaturdefinition noch nicht das letzte Wort gesprochen ist.

Seit Mitte der 80er Jahre habe ich etwa 25 Jahre Unterrichtserfahrung in der Vermittlung der Thermodynamik auf der Basis der Energiequantelung in S1 und S2 gesammelt. Vertieftes Verständnis, also detaillierte Deutungen der Standardentropien als Stoffeigenschaften, von Kalorimeterversuchen, vom chemischen Gleichgewicht, vom thermodynamischen Antrieb, vom Prinzip vom kleinsten Zwang, Entropiemaximum als Grundlage der Selbstorganisation von Systemen ... all das leistet die heutige Thermodynamik. Sie ist damit der klassischen Thermodynamik deutlich überlegen, die in weiten Teilen auch Vorgänge mit Temperaturänderungen immer noch isotherm zu beschreiben versucht und dabei – wie ich meine – scheitert.

Vermutlich hat die klassische Thermodynamik an der Isothermie festgehalten, damit sie nicht in Erklärungsnot kam, sagen zu müssen, was sich eigentlich ändert, wenn sich die Temperatur ändert. Denn das hätte sie nicht gekonnt, solange der Zusammenhang zwischen Verteilungsfunktion, Emission und Temperatur nicht plausibel gedeutet war.

M. J. Klein, „Negative absolute Temperature“, Physical Review 104, 589 (1956)

N. F. Ramsey, „Thermodynamics and statistical mechanics at negative absolute temperature“, Physical Review 103, 20 (1956)

Ch. E. Hecht, „Negative absolute temperatures“, J. Chem. Educ. 1967, 44, 124

G. Falk, W. Ruppel, „Energie und Entropie“, Springer Verlag 1976

P. W. Atkins „Physikalische Chemie“ 2. Auflage, VCH Weinheim 1996 S. 651

J. Wisniak, „Negative absolute temperatures, a novelty“, J. Chem. Educ. 2000, 77, 518

Ch. Kittel, H. Krömer, „Thermodynamik“, Oldenbourg Verlag, 2001, S. 448ff

A. Ferguson, „Temperature as a measure of distribution of particles over energy states: Would a negative absolute Temperature be very cold, or very hot?“, J. Chem. Educ. 2004, 81, 607