maßstäbe
Das wissenschaftsjournalistische Magazin der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

PTB

Aus den *maßstäben* Heft 7 „Die Unveränderlichen“ (2006)

Andrea Hoferichter

Die K&k-Connection

Mit Boltzmann zur Temperatur

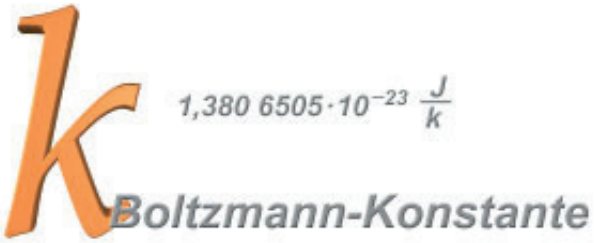
Eis, Wasser und darüber Dampf: Die Mixtur aus festem, flüssigem und gasförmigem Wasser heißt Tripelpunkt und kann ausschließlich bei einer Temperatur von 273,16 Kelvin beziehungsweise 0,01 Grad Celsius existieren. Diese Temperatur ist momentan noch die Basis für die Definition der Temperatureinheit Kelvin. Metrologen wollen das Kelvin aber über den unumstößlichen Zahlenwert einer Naturkonstanten festlegen. Wissenschaftler der PTB in Berlin feilen an der Messung dieser Konstanten.

(Stichwort: Kelvin)

Mehr entdecken: Der QR-Code führt Sie zur Webseite dieser *maßstäbe*-Ausgabe.

Die K&*k*-Connection

Eis, Wasser und darüber Dampf: Die Mixtur aus festem, flüssigem und gasförmigem Wasser heißt Tripelpunkt und kann ausschließlich bei einer Temperatur von 273,16 Kelvin beziehungsweise 0,01 Grad Celsius existieren. Diese Temperatur ist momentan noch die Basis für die Definition der Temperatureinheit Kelvin. Sie kann jedoch leicht schwanken, wenn das Wasser verunreinigt ist oder wenn es Isotope – also Atome eines Elements aber unterschiedlicher Kernmasse, in ungewöhnlichen Mengen enthält. Metrologen wollen das Kelvin deshalb über den unumstößlichen Zahlenwert einer Naturkonstanten festlegen. Wissenschaftler der PTB in Berlin feilen zurzeit an der Messung dieser Konstanten.



Ein Februartag in Berlin-Charlottenburg, vor dem sandgelb gestrichenen Backsteinbau der PTB. Die Temperatur wassertripelpunktsverdächtig. Drinnen, im Büro von Bernd Fellmuth, Leiter der Arbeitsgruppe „Tieftemperaturmetrologie“ der PTB, ist es um gefühlte 20 Grad wärmer. Fellmuth, weißhaarig mit Bart und Lesebrille, erklärt in waschechter Berliner Mundart, es sei die sogenannte Boltzmann-Konstante, kurz: klein *k*, um die man bei der Definition des großen K für die Temperatureinheit Kelvin nicht umhin könne. „In keinem physikalischen Gesetz taucht die Boltzmann-Konstante ohne die Temperatur auf“, betont der Physiker. „Sie stellt den Zusammenhang zwischen der mittleren mechanischen Energie von Atomen oder Molekülen und der thermischen Energie des Gesamtsystems her.“ Denn je stärker Atome schwingen und je flotter Gasteilchen durch die Luft flitzen, desto höher ist die Temperatur. Doch obwohl die Verkupplung von Boltzmann-Konstante und Kelvin, von klein *k* und groß K, auf der Hand liegt: Bisher hat niemand den Zahlenwert der Konstanten, deren hintere Kommastellen Wackelkandidaten sind, genau genug ermitteln können, um der aktuellen Tripelpunktdefinition des Kelvin wirklich Konkurrenz zu machen. „Dafür müsste die Zahl auf die sechste Stelle hinter dem Komma genau bekannt sein“, erklärt Fellmuth. Genau um diese Stelle ringen die Berliner Forscher zurzeit.

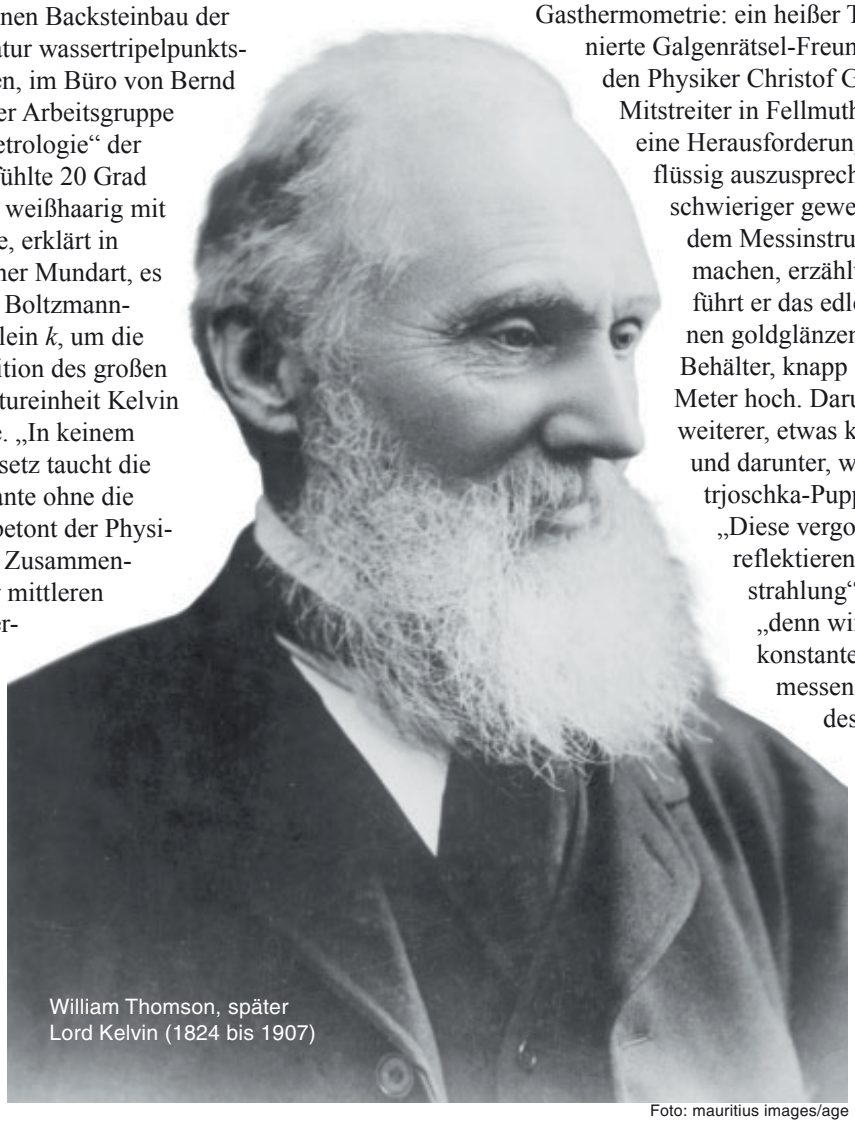

William Thomson, später Lord Kelvin (1824 bis 1907)

Foto: mauritius images/age

Ihre Messmethode heißt Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie: ein heißer Tipp für passionierte Galgenrätsel-Freunde und selbst für den Physiker Christof Gaiser, jüngster Mitstreiter in Fellmuths Arbeitsgruppe, eine Herausforderung. Dieses Wort flüssig auszusprechen sei bald schwieriger gewesen als sich mit dem Messinstrument vertraut zu machen, erzählt er. Im Labor führt er das edle Stück vor: Einen goldglänzenden kreisrunden Behälter, knapp einen halben Meter hoch. Darunter steckt ein weiterer, etwas kleinerer Behälter und darunter, wie bei einer Matrjoschka-Puppe, noch einer. „Diese vergoldeten Zylinder reflektieren störende Wärmestrahlung“, erklärt Gaiser, „denn wir müssen bei konstanter Temperatur messen.“ Das Herzstück des Messinstruments steckt im dritten Zylinder: Zwei doppelwandige Kupfer-Röhrchen mit Durchmessern wie Zwei-Euro-Stücke. Es sind Kondensatoren, deren Innen- und Außenwände im

schnellen Wechsel elektrisch entgegengesetzt aufgeladen werden. Einer der Kondensatoren ist komplett evakuiert, zwischen den Wänden des anderen strömt das Messgas Helium. Durch das Helium erhöht sich die Ladungsdichte auf den Kondensatorwänden. Diesen Effekt können die Physiker als Kapazitätsänderung messen und daraus die Dielektrizitätskonstante des Heliums ermitteln. Der Hintergrund: Ein Gasatom besteht aus einem elektrisch positiv geladenen Atomkern und negativ geladenen Elektronen drumherum. Zwischen zwei elektrisch entgegengesetzt aufgeladenen Flächen driften nun Kern und Elektronen ein wenig – zigarrenförmig – auseinander. Die Dielektrizitätskonstante ist dabei ein Maß dafür, wie geordnet sich die Gasatome zwischen den Kondensatorwänden ausrichten. Sie hängt also von der Bewegungsenergie der Teilchen ab und deshalb letztlich mit der Boltzmann-Konstante zusammen. „Bei bekannter Temperatur können wir aus der Druckabhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten schließlich die Boltzmann-Konstante errechnen“, fasst Gaiser den Weg zum begehrten Zahlenwert zusammen. Die Forscher vergleichen ihre experimentell ermittelten Werte dabei immer wieder mit denen aus theoretischen Berechnungen. Erst wenn Theorie und Experiment übereinstimmen, ist das Ziel erreicht. Der große Vorteil der elektrophysikalischen Messmethode gegenüber klassischen Druck- und Temperaturmessungen, mit denen die Boltzmann-Konstante ebenfalls berechenbar ist: Die Zahl der Gasatome im Messbehälter spielt keine Rolle. Sie in ausreichender Genauigkeit zu ermitteln ist derzeit eine unlösbare Aufgabe.

Zurzeit betreiben die Berliner Physiker ihre Apparatur ausschließlich bei sehr tiefen Temperaturen von nur wenigen Kelvin. „Bei diesen Temperaturen frieren sämtliche Verunreinigungen aus“, erklärt Gaiser. „Das sind ideale Bedingungen, um sich mit der Messmethode vertraut zu machen.“ Ziel sei es jedoch, am Tripelpunkt von Wasser zu messen, um einen direkten Bezug zur aktuellen Kelvin-Definition zu schaffen. Bis es soweit ist, wartet noch eine Menge Arbeit auf die Wissenschaftler. Die Messanlage muss umgebaut werden, unter anderem um auch bei höheren Temperaturen Verunreinigungen zu vermeiden. So soll sie beispielsweise besser abgedichtet werden, damit sich keine Moleküle aus der Luft unter die Heliumteilchen schummeln können und so das Messergebnis verfälschen. „Wir müssen außerdem noch ein geeigneteres Material für die Kondensatoren finden als Kupfer“, ergänzt Gaiser die notwendigen Schritte. Die Kupferelektroden der aktuellen Kondensatoren seien zu druckempfindlich und könnten sich während der Messungen verformen. Insgesamt helfen vier weitere PTB-Arbeitsgruppen die nötige Messtechnik an ihre Grenzen zu treiben, um Drücke, Kapazitäten und Temperaturen ausreichend genau erfassbar zu machen. Anfang nächsten Jahres soll mit dem Aufbau der neuen Anlage begonnen werden.

Spitzenreiter im Boltzmann-Konstante-Messen sind derzeit noch amerikanische Forscher des National Institute of Standards and Technology (NIST). Sie können den bisher besten Wert für die Konstante vorweisen. Ihre Strategie: Sie messen die Schallgeschwindigkeit in einer mit Gas gefüllten stählernen Kugel. Wie schnell der Schall den Weg durch die Kugel findet, hängt wie die Dielektrizitätskonstante letztlich von der Bewegungsenergie der Gasteilchen ab und so mit der Boltzmann-Konstante zusammen. Auch französische und italienische Forscher versuchen mit eben dieser Methode der Boltzmann-Konstanten auf der sechsten Stelle hinter dem Komma Herr zu werden. Wissenschaftler prüfen zudem die Tauglichkeit weiterer neuartiger Messstrategien, weltweit und mit Hochdruck. Es gehe den Physikern dabei jedoch nicht vorrangig um einen Wettkampf, sagt Gaiser: „Am schönsten wäre es, wenn alle unabhängig voneinander zum gleichen Ergebnis kommen würden.“ Gehen die Pläne der Physiker auf und werden nötige Gelder nicht unerwartet aufs Eis gelegt, sollte die sechste Stelle der Boltzmann-Konstante spätestens 2011 dem Nebel entrückt sein und eine „wasserfreie“ Neudefinition des Kelvin ermöglichen.

ANDREA HOFERICHTER

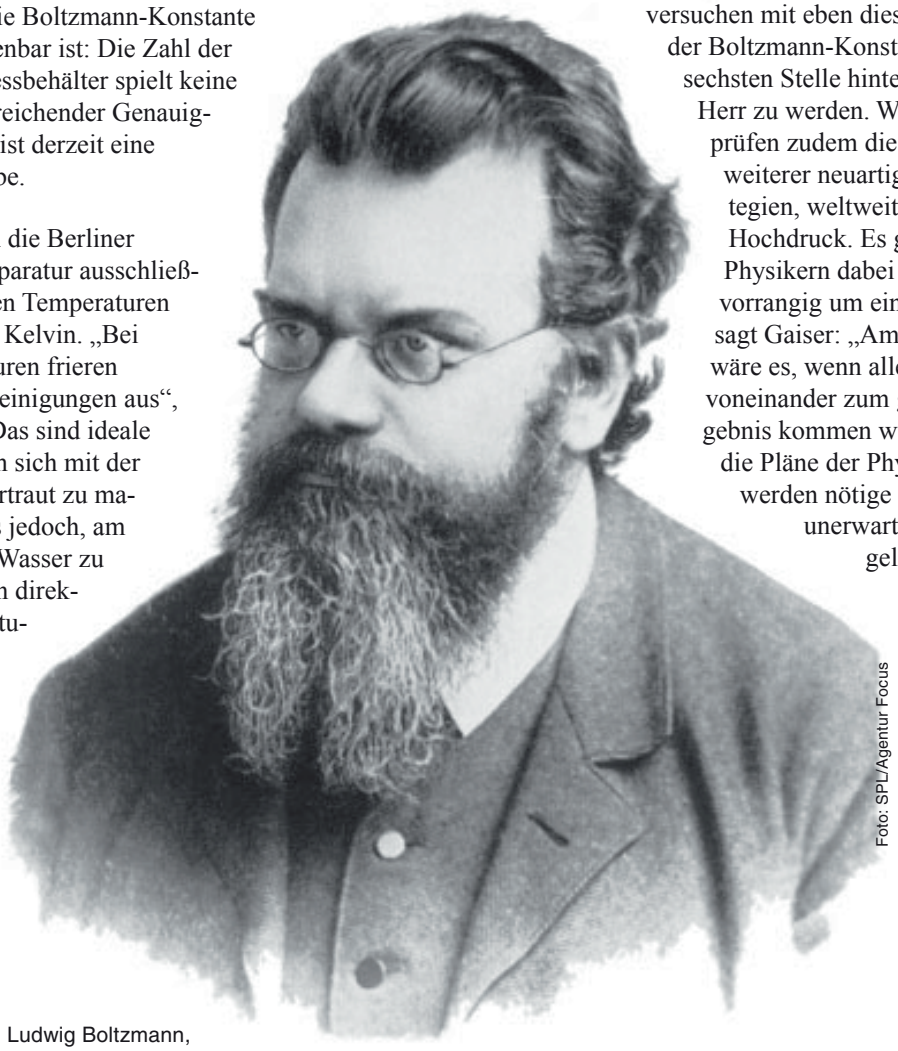


Foto: SPL/Agentur Focus

Ludwig Boltzmann, (1844 bis 1906)

Auf Wasser gebaut

Das Wasser aus dem Ozean rund um die Antarktis könnte halbwegs funktionieren, das aus dem Eisberg eher nicht – zur exakten Realisierung der Temperaturskala, die ja auf Wasser als Grundstoff basiert. Das Problem: Wasser ist nicht gleich Wasser. Denn die Komponenten Wasserstoff und Sauerstoff kommen in mehreren Spielarten, den Isotopen, vor. Und diese verschiedenen Isotope beeinflussen – zwar gering, aber doch merklich – die Schmelz- und Siedetemperatur. Zur Definiton der Temperaturskala hat man sich daher auf eine ganz spezielle Wassersorte verständigt, auf das „Standard Mean Ocean Water“, einer Mixtur ozeanischen Wassers. Der Eisberg scheidet daher aus: Er wurde wahrscheinlich von einem Gletscher „gekalbt“ und besteht letztlich aus Schnee, der eine für Meerwasser untypische Isotopenzusammensetzung hat.

jes

Aufwärts von absolut Null: die Kelvinskala

Negative Temperaturen gibt es bei ihr nicht. Denn die Kelvinskala beginnt am „absoluten Temperaturnullpunkt“. Tiefer geht nicht. Da ein Schritt auf der Kelvinskala einem Schritt auf der Celsiusskala entsprechen sollte, ergibt sich die aktuelle, etwas sperrige Definition: „Ein Kelvin ist der 273,16te Teil der Temperatur des Tripelpunktes von Wasser.“ Gelingt es, die Boltzmann-Konstante hinreichend genau zu bestimmen, dann könnte die Kelvin-Definiton in Zukunft so lauten: „Ein Kelvin ist die Änderung der thermodynamischen Temperatur, die zu einer Änderung der thermischen Energie von exakt $1{,}380\,6505 \cdot 10^{-23}$ Joule führt.“ Dieser Zahlenwert ist derjenige der (dann festgelegten) Boltzmann-Konstante.

ah

Chaos mit Konstante

Unordnung breitet sich wie von selbst aus. Was uns alltägliche Erfahrungen lehren, fasst die Thermodynamik („Wärmelehre“) in ihrem zweiten Hauptsatz zusammen: „Alle spontanen Prozesse der Natur sind mit einer Zunahme der Entropie verbunden.“ Die Entropie S als Maß für die Unordnung hat auch Ludwig Boltzmann beschäftigt. Seinen Berechnungen zufolge musste sie mit dem Logarithmus der Gesamtzahl aller möglichen Zustände W wachsen und zwar um einen bestimmten Faktor: die Boltzmann-Konstante. Das Gesetz lautet $S = k \log W$ und ziert bis heute Boltzmanns Grabstein auf dem Wiener Zentralfriedhof.

ah

Foto: mauritius images/Superstock