

METROLOGIE

Das Kelvin wird „universal“

Zusammen mit anderen Basiseinheiten des SI wird das Kelvin neu definiert.

Wolfgang Buck

Im Zuge der Französischen Revolution gab es große Anstrengungen, das damals verworrene Messwesen zu vereinheitlichen. So sollte z. B. das Längenmaß nicht mehr „auf der Armlänge eines König basieren“. Heute stellt sich die Suche nach universellen Maßeinheiten aufs Neue: Die Basiseinheiten sollen künftig mit Hilfe von Naturkonstanten definiert werden, um sie so unabhängig von physikalischen Maßverkörperungen, sog. Artefakten, oder speziellen Messvorschriften zu machen. Auch das „Kelvin“, die Einheit der Temperatur, gilt es nun neu zu definieren.

Anders als Länge oder Masse lässt sich die Temperatur nicht durch materielle Maßverkörperungen darstellen und aufbewahren. Temperaturen addieren sich auch nicht einfach, wenn man separate Systeme zusammenbringt.¹⁾ Daher wird als Vergleichsmaßstab für die Temperaturmessung eine Skala verwendet, die international von der Generalkonferenz der Meterkonvention in Paris festgelegt und mit der Jahreszahl ihrer Festlegung bezeichnet wird.

Zur Zeit gilt für Temperaturen größer als 0,65 K die Internationale Temperaturskala von 1990 (ITS-90), ergänzt durch die Provisorische Tieftemperaturskala von 2000 (PLTS-2000) im Bereich von 0,001 K bis 1 K. Auch diese Skala wird weiter untersucht und ergänzt bzw. ersetzt, wenn verbesserte Ergebnisse vorliegen.

Temperatur-Fixpunkte bilden die „Markierungen“ der Skalen. Das sind in der Regel die Temperaturen von Phasenübergängen, also Siedepunkte, Tripelpunkte oder Schmelz- bzw. Erstarrungspunkte von Materialien mit definierten Eigenschaften wie Reinheitsgraden oder Mischungsverhältnissen. Diese Temperaturen werden mit Hilfe von „primären Thermometern“ bestimmt, deren Messprinzip auf einem fundamentalen Naturgesetz beruht, das die thermodynamische Temperatur T nur mit anderen messbaren Größen und bekannten Konstanten in Verbindung bringt (vgl. Tabelle „Primäre Thermometer...“).

Um die Einheit der Temperatur zu definieren, griffen die Metrologen 1954 einen hundert Jahre alten Vorschlag von Lord Kelvin auf. Demnach wird ein Temperaturintervall durch den absoluten Temperaturnullpunkt mit Wert 0 K und den Tripelpunkt des Wassers (TPW) mit Wert 273,16 K festgelegt [1]. Diese Werte sind exakt und besitzen definitionsgemäß keine Unsicherheit [2]. Explizit lautet demnach die derzeitige Definition:



Corbis Digital Stock

Eine Neudefinition des Kelvins wird zwar keine Auswirkungen auf den Alltag haben, aber die Temperatureinheit auf eine neue universelle Basis stellen.

„Das Kelvin, die Einheit der thermodynamischen Temperatur, ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers“ [3].

Damit hängt die Eindeutigkeit der Kelvin-Definition allerdings von den Eigenschaften einer ausgewählten Substanz ab. Eigentlich kein Problem, könnte man meinen, denn schließlich ist Wasser auf unserem Planeten sehr verbreitet. Also dürfte es an keinem Ort der Welt problematisch sein, diese Kelvin-Definition umzusetzen – man muss nur gewisse Reinheitsgebote ausreichend beachten. In den letzten Jahren haben jedoch eine Reihe von Präzisionsuntersuchungen prak-

1) Die Temperatur ist eine „intensive“ und keine „extensive“ Größe.

KOMPAKT

- Derzeit ist das Kelvin, die Einheit der thermodynamischen Temperatur, über den Tripelpunkt des Wassers definiert.
- Um die Temperatureinheit künftig unabhängig von einem bestimmten Material (Wasser) und speziellen Messvorschriften zu machen, soll das Kelvin mit Hilfe einer geeigneten Naturkonstanten definiert werden.
- Eine neue universelle Definition könnte dann lauten: „Ein Kelvin ist diejenige Änderung der thermodynamischen Temperatur T , die einer Änderung der thermischen Energie kT um exakt $1,38065 \cdot 10^{-23}$ Joule entspricht.“ Der richtige Zahlenwert für k ergibt sich voraussichtlich erst 2011.

Dr. Wolfgang Buck,
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Institut Berlin,
Abteilung 7, Abbestr.
2-12, 10587 Berlin

tische Vorbehalte gegen die Verwendung des TPW zutage gefördert. Hinzu kommt, dass die gewünschte Unabhängigkeit der Kelvin-Definition von einem bestimmten Material und damit auch von Zeit und Raum sich so nicht erreichen lässt.

Das „Comité International des Poids et Mesures“, das höchste Gremium der Internationalen Meterkonvention zwischen den Sitzungen der Generalkonferenz, hat im Herbst 2005 den nationalen metrologischen Staatsinstituten empfohlen, für das Kelvin sowie das Kilogramm [4], das Ampere und das Mol geeignete Vorschläge vorzulegen, um diese vier Basiseinheiten auf der übernächsten Generalkonferenz 2011 gemeinsam neu zu definieren [5].

Ein Reinheitsgebot für Wasser

Der TPW wird in einer zylindrischen abgeschmolzenen Glaszelle (Abb. 1) realisiert, die mit reinem Wasser befüllt ist. Zwei wesentliche Effekte beeinträchtigen die Funktion der Zelle und die verlässliche Darstellung des Tripelpunkts: die je nach Herkunft des Wassers unterschiedliche Isotopenzusammensetzung und Verunreinigungen, die entweder schon bei der Herstellung oder im Laufe der Zeit durch die Abgabe von mineralischen Bestandteilen der Glaswand eingebracht werden. Eine gute Zelle kann den Tripelpunkt mit einer Unsicherheit von $\pm 50 \mu\text{K}$ (relativ $\pm 1,8 \cdot 10^{-7}$) reproduzieren.

Ob eine Zelle „gut“ ist, lässt sich nur durch den Vergleich mit anderen Zellen nachweisen, denn um die Verunreinigung zu bestimmen, muss man die Zelle zerstören. Daher ist für die gesicherte Darstellung des TPW immer ein ganzes Ensemble von Tripelpunktzellen nötig. Die erwähnten Untersuchungen haben nun ergeben, dass z. B. bei einem internationalen Vergleich von 27 Zellen nur die Hälfte die obige Übereinstimmung erreichte, also brauchbar war. Zwei der ausgesonderten Zellen wichen sogar mehr als $200 \mu\text{K}$ vom Mittelwert ab. In einer anderen Langzeituntersuchung wurde bei einer ähnlichen Anzahl von Zellen eine vermutlich auf lösliche Mineralien in der Zellwand zurückzuführende Drift von $4 \mu\text{K}$ pro Jahr entdeckt. Das würde in 20 Jahren immerhin eine Abweichung von $80 \mu\text{K}$ bedeuten. Hier hatte ein Drittel der Zellen eine weit größere Abweichung und musste aus dem Vergleich ausgeschlossen werden. Der Einfluss der natürlichen Variation der Isotopenverhältnisse $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ und $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ ist von ähnlicher Größenordnung, lässt sich aber durch eine Vorschrift über das zu verwendende Wasser eliminieren, da sich diese Verhältnisse in der Zelle nicht mehr ändern. So gibt es inzwischen eine Klarstellung des „Comité Consultatif de Temperature“ von 2005, dass zur Darstellung des TPW nur Wasser mit einer ganz bestimmten Isotopen-



zusammensetzung zu verwenden ist, die dem Referenzmaterial „Vienna Standard Mean Ocean Water“ (VSMOW) der Internationalen Atomenergiebehörde in Wien entspricht. Das ist aber eine Substanz, die nicht überall auf der Welt verbreitet, sondern nur von einer Stelle zu beziehen ist. Die derzeitige Definition des Kelvins ist also unbefriedigend und genügt nicht den Ansprüchen moderner Metrologie.

Mehr Stabilität mit Konstanten

Derzeit besteht keine Notwendigkeit, die Struktur des internationalen Einheitensystems bei der Neudefinition der Basiseinheiten grundsätzlich zu verändern oder gar neue Basiseinheiten zu wählen [6]. Das Kelvin sollte also nicht aus diesem System verschwinden. Gleichzeitig erscheint es auch nicht erforderlich, die Unsicherheiten der geltenden Definitionen zu verbessern, da sie gegenwärtig ausreichen.

Langfristig lohnt es sich aber schon, durch den Bezug zu einer Naturkonstante eine garantierte zeitliche Stabilität zu gewinnen. Eine neue Definition sollte sowohl für die tägliche Anwendung in Entwicklung und Produktion als auch für die physikalische Grundlagenforschung von Nutzen sein. Schließlich sollte keine Diskontinuität in der Größe der Einheit entstehen, um Rekalibrierungen und Umrechnungen zu vermeiden. Die Unsicherheit des Wertes der zu verwendenden Naturkonstanten

sollte somit in der gleichen Größenordnung liegen wie die Unsicherheit bei der bisherigen Definition.

Dem Beispiel der Längeneinheit folgend, für deren Definition 1983 der Wert der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum festgelegt wurde, soll auch die neue Definition des Kelvins mit Hilfe der Festlegung einer Naturkonstante vorgenommen werden, deren Wert dann – weil selbst Maßstab – nicht mehr zu messen ist und die Unsicherheit Null besitzt. Da die Temperatur T eines Systems proportional zu dessen thermischer Energie kT ist, bietet es sich an, den Proportionalitätsfaktor zwischen beiden, die Boltzmann-Konstante k , als die geeignete Naturkonstante zu wählen. Wenn man sich dabei nicht an den bestehenden Konventionen orientieren wollte, könnte man einer „neuen“ Boltzmann-Konstanten einen beliebigen Zahlenwert zuweisen, z. B. die Eins. Dann würden allerdings alle bisher in Kelvin angegebenen Temperaturen andere, im Falle der Eins winzige Zahlenwerte annehmen. Um diesen Umrechnungsaufwand zu vermeiden, sollte der festzulegende Wert von k so gewählt sein, dass die Temperaturwerte nach der neuen Definition sich nicht von den Werten davor unterscheiden. Kurzfristig sollte also in der Praxis niemand etwas von der Neudefinition merken. Langfristig wäre jedoch ein Gewinn an Stabilität und Universalität zu verbuchen.

► **Abb. 1** Eine Wassertripelpunktzelle besteht aus einem zylindrischen Glaskolben, in den ein zentrales, oben offenes Glasrohr zur Aufnahme von Thermometern eingeschmolzen ist.

Die Boltzmann-Konstante

Der derzeit international akzeptierte Wert von $1,3806505 \cdot 10^{-23}$ J/K für die Boltzmann-Konstante wurde im vergangenen Jahr zusammen mit den neuesten CODATA-Werten der anderen Naturkonstanten veröffentlicht [7] und besitzt eine relative Unsicherheit von $1,8 \cdot 10^{-6}$. Diese Werte beruhen im Wesentlichen auf einer einzigen Messung der Gaskonstanten R mit Hilfe der akustischen Gasthermometrie am amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST) im Jahre 1988. Die relative Unsicherheit von $1,7 \cdot 10^{-7}$ der Avogadro-Konstanten N_A , die zur Umrechnung auf die Boltzmann-Konstante nach $k = R/N_A$ benötigt wird, ist hierbei vernachlässigbar. Nur eine einzige genaue Messung lässt sich jedoch nicht als ausreichende Basis für eine Festlegung des Zahlenwerts ansehen. Deshalb erarbeiteten Experten aller Metrologie-Institute im Januar 2005 auf einem Workshop über „Methoden für neue Bestimmungen der Boltzmann-Konstante“ in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Berlin ein Konzept und einen Zeitplan, um bis 2011 einen auf mehrere unterschiedliche Methoden abgestützten zuverlässigen neuen Wert von k zu erhalten.

Die dafür ins Auge gefassten Methoden berücksichtigen, dass die thermische Energie pro Freiheitsgrad nicht direkt zugänglich ist. Daher müssen makroskopische Größen gemessen werden, deren Temperaturabhängigkeit mit der thermischen Energie korreliert ist [8]. Für Gase ist die thermische Energie proportional zur mittleren kinetischen Energie der Atome oder Moleküle, aus denen das Gas besteht. In einem abgeschlossenen Volumen V ist diese Energie für den Druck p des Gases verantwortlich. Dieser Zusammenhang wird bei vernachlässigbarer Wechselwirkung zwischen den Teilchen durch die Zustandsgleichung des idealen Gases beschrieben. Das auf diesem Gesetz beruhende Thermometer ist das offenbar schon von Galileo Galilei benutzte Gasthermometer, von dem es heute mehrere Modifikationen gibt. Die Variante mit konstantem Volumen, bei der die exakte Bestimmung der effektiven Gasmenge problematisch ist, wird nicht für absolute Messungen verwendet. Dafür kann die mit der Temperatur sich ändernde lokale Dichte eines Gases über die damit verbundene Änderung der Dielektrizitätskonstanten (DCGT) oder des Brechungsindex (QSCR, RIGT) ermittelt werden. Auch die Schallgeschwindigkeit u_0 in einem Gas ist temperaturabhängig und kann im akustischen Gasthermometer (AGT) als Temperaturindikator benutzt werden, wobei eine Proportionalität zwischen u_0^2 und T gilt. Die kinetische Energie der Gasteilchen lässt sich auch mit Laserspektroskopie aus der Doppler-Verbreiterung von Absorptionslinien (DBT) bestimmen. Verwendet man die Leitungselektronen eines metallischen Widerstandsmaterials als „Messsubstanz“, eignet sich das elektrische Johnson-Rauschen (JNT) nach der Nyquist-Formel zur Thermometrie. Schließlich emittiert ein isothermer Hohlraum, in dem die Lichtquanten mit den Wänden im thermischen Gleichgewicht

sind, Gesamtstrahlung (integriert über alle Wellenlängen) nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (TRT) und spektral aufgelöste Strahlung nach dem Planckschen Strahlungsgesetz (SRT).

Diese primären Thermometer sollen nun im Einzelnen vorgestellt werden. Die ihnen zugrunde liegenden Formeln sind in der Tabelle zusammengestellt, zusammen mit den derzeit erreichten sowie den mittelfristig zu erwartenden Unsicherheiten für die Bestimmung der Boltzmann-Konstanten [9]. Eine kompakte Darstellung aller gängigen Methoden findet sich in [10].

Die Gasthermometrie

In einem Gas hängen eine Reihe von Messgrößen von der Temperatur ab. Die Gesetzmäßigkeiten sind in der Regel für ideale Gase abgeleitet und die Wechselwirkung zwischen den Gasteilchen durch Virialkoeffizienten berücksichtigt. Doch diese sind für die Genauigkeitsanforderungen an k nicht ausreichend exakt bekannt. Daher führt man die Messungen durch Extrapolation auf verschwindenden Druck oder verschwindende Dichte so durch, dass die Näherung des idealen Gases genügt.

Akustische Gasthermometrie (AGT)

Der derzeit international akzeptierte Wert für die Boltzmann-Konstante wurde, wie erwähnt, am NIST von Michael Moldover und Mitarbeitern durch akustische Gasthermometrie bestimmt.²⁾ Von diesem Verfahren erwartet man auch künftig die kleinsten

2) Diese Methode wird nicht nur am NIST, sondern mittlerweile auch am italienischen Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) und am französischen Institut National de Métrologie (LNE-INM-CNAM) verwendet.

Primäre Thermometer für die Bestimmung der Boltzmann-Konstante			
Methode	Physikalisches Gesetz	Relative Standard-Unsicherheit	
		derzeit	mittelfristig
Akustisches Gasthermometer (AGT)	$u_0 = \sqrt{\gamma_0 RT/M}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer (DCGT)	$p = kT(\epsilon - \epsilon_0)/a_0$	$15 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$ bis $2 \cdot 10^{-6}$
Gesamtstrahlungsthermometer (TRT)	$L = (2\pi^4/15c_0^2 h^3) (kT)^4$	$32 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Spektrales Strahlungsthermometer (SRT)	$L_\nu = (2h/c_0^2) \nu^3 \times [\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1}$		$50 \cdot 10^{-6}$
Johnson-Rauschthermometer (JNT)	$\langle U^2 \rangle = 4kTR_{el}\Delta\nu$		10 ppm
Quasi-sphärische Hohlraumresonatoren (QSCR)	$p = kT(n^2 - 1)\epsilon_0/a_0$	$40 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$
Brechungsindex-Gasthermometer (RIGT)	$p = kT(n^2 - 1)\epsilon_0/a_0$	$300 \cdot 10^{-6}$	$30 \cdot 10^{-6}$
Doppler-Verbreiterungsthermometer (DBT)	$\Delta\nu_D = \sqrt{2kT/mc_0^2} \nu_0$	$800 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$

c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	u_0	Schallgeschwindigkeit bei verschwindendem Druck und sehr niedriger Frequenz
h	Plancksches Wirkungsquantum	T	Temperatur
k	Boltzmann-Konstante	a_0	statische elektrische Polarisierbarkeit
L	Gesamtstrahlungsleistung	$\gamma_0 = c_p/c_v$	Verhältnis der spezif. Wärmen
L_ν	spektrale Strahlungsleistung	$\Delta\nu_D$	Doppler-Breite einer Spektrallinie der Frequenz ν_0
M	Mol-Masse des Gases	ϵ	Permittivität (Dielektrizitätskons.)
m	Atommasse	ϵ_0	elektrische Feldkonstante
n	Brechzahl	ν	Frequenz
p	Druck		
R	molare Gaskonstante		
R_{el}	elektrischer Widerstand		
$\langle U^2 \rangle$	mittlere quadrat. Rauschspannung		

Unsicherheiten. Zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante wird die Schallgeschwindigkeit eines Gases (im erwähnten Fall des Edelgases Argon) bei der Temperatur des TPW ermittelt und k aus der entsprechenden Formel in der Tabelle berechnet, wobei man R durch $k \cdot N_A$ ersetzt. Im vorliegenden Fall des realen Gases wird das Quadrat der Schallgeschwindigkeit nach dem Druck entwickelt und die akustischen Virialkoeffizienten werden durch die Dichtekoeffizienten ausgedrückt. Die Schallgeschwindigkeit u_0 für den idealen Fall erhält man durch Messung bei verschiedenen Drücken und Extrapolation auf verschwindenden Druck.

Die gängige experimentelle Anordnung ist ein Kugelresonator mit einem Volumen von wenigen Litern (Abb. 2), in den das Messgas gefüllt wird und der auf der Temperatur des TPW gehalten wird. Eine große Unsicherheitskomponente ist die Homogenität der Temperatur über das gesamte Thermometervolumen, da die TPW-Temperatur nur am Ort des diese Temperatur tragenden Widerstandsthermometers garantiert ist. Die Schallgeschwindigkeit wird durch die Untersuchung der Resonanzen akustischer Wellen bestimmt. Die Resonatordimension wurde am NIST ursprünglich durch Füllung mit hochreinem Quecksilber bekannter Dichte ermittelt. Künftig soll der Resonator mit Hilfe von Mikrowellen-Resonanzen ausgemessen werden, um die Abhängigkeit von der Quecksilberdichte zu vermeiden. Außer dem Anschluss an die Tripelpunkttemperatur sind die Hauptfehlerquellen bei diesen Experimenten die Unsicherheiten der Resonatorabmessungen, der Molmasse, der Reinheit von Argon, der Extrapolation auf verschwindenden Druck und der Position der Schallgeber und -empfänger. Bei Helium als Messgas lässt sich die Unsicherheit reduzieren, da dessen Molmasse sehr genau bekannt und die Zahl der Parameter in der Virialentwicklung kleiner ist. Moldover schätzt, dass mit der gegenwärtigen Messtechnik bei diesem Verfahren eine Unsicherheit vom $1 \cdot 10^{-6}$ erreichbar ist.

Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie (DCGT)
 Der Verwendung der Zustandsgleichung des idealen Gases und damit des klassischen Gasthermometers konstanten Volumens zur Bestimmung von k sind dadurch Grenzen gesetzt, dass sich die erreichbaren Unsicherheiten bei der Gasmengenbestimmung wegen der Unvermeidbarkeit von Totvolumina und Gasadsorption nicht weit genug reduzieren lassen. Als Ausweg bietet sich an, die Dielektrizitätskonstante oder den Brechungsindex des Messgases zu verwenden, weil diese beiden Messgrößen eine lokale Information



Abb. 2 Am amerikanischen National Institute of Standards and Technology wurde mit diesem akustisches Gasthermometer der bislang genaueste Wert der Boltzmann-Konstante ermittelt.

über die Gasdichte ohne Kenntnis des Gefäßvolumens ermöglichen. Die Bestimmung der Dielektrizitätskonstante von Helium wird in der Thermometrie bei tiefen Temperaturen schon seit Jahrzehnten benutzt und ist, verglichen mit der Messung des Brechungsindex, das ausgereifere und eher Erfolg versprechende Verfahren mit den weitaus kleineren Unsicherheiten.

Für ein ideales Gas ist die Permittivität (Dielektrizitätskonstante) gegeben durch $\epsilon = \epsilon_0 + \alpha_0 \cdot N/V$, dabei ist ϵ_0 die elektrische Feldkonstante, α_0 die statische elektrische Polarisierbarkeit der Gasatome und N/V deren Anzahldichte. Durch Einsetzen dieses Quotienten in die Zustandsgleichung erhält man als Zusammenhang zwischen Druck und Dielektrizitätskonstante $p = kT(\epsilon - \epsilon_0)/\alpha_0$. Die Hauptunsicherheit rührte bis vor kurzem von der Polarisierbarkeit α_0 des Heliums

her. In den letzten Jahren haben große Fortschritte bei deren ab-initio-Berechnung, – die Unsicherheit liegt deutlich unter $1 \cdot 10^{-6}$ – das DCGT erst konkurrenzfähig gemacht.

Sehr kritisch ist allerdings, dass man ein ϵ bestimmen muss, dessen Wert ganz nahe bei 1 liegt. Um k auf $1 \cdot 10^{-6}$ angeben zu können, muss ϵ mit einer Unsicherheit von $1 \cdot 10^{-9}$ gemessen werden. Dies ist auch bei der heute verfügbaren Technik als Absolutwert nicht möglich. Deshalb wird das Experiment in der PTB (Abb. 3) mit zwei identischen Kondensatoren durchgeführt, die gemeinsam auf der Temperatur des TPW gehalten werden. Das Volumen, das den Messkondensator C enthält, wird mit Helium bei unterschiedlichem Druck gefüllt, um auf die Kapazität C_0 bei verschwindendem Druck extrapolieren zu können, während der Referenzkondensator sich im Vakuum befindet und zum Brückenabgleich genutzt wird. Auch eine solche vergleichende Anordnung zur Bestimmung von $(C - C_0)/C_0$ stellt extreme Anforderungen an die Kapazitätsmessung und erfordert eine neu zu entwickelnde Messtechnik.

Aus der Steigung von ϵ als Funktion von p lässt sich durch Extrapolation zum Druckwert Null schließlich k ermitteln. Eine erhebliche Fehlerquelle bei dieser Messung ist die Deformation des Messkondensators durch den Gasdruck auf Grund der Kompressibilität κ_{eff} des Kondensatormaterials. Dieses Problem soll durch ein spezielles Design der Kondensatoren und die interferometrische Kontrolle der Längenausdehnung gelöst werden. Auch die Druckmessung gilt es durch den Einsatz neuer Drucknormale bis an die Grenzen des Machbaren zu verbessern. Die Abschätzung aller Faktoren lässt eine mit der akustischen Thermometrie vergleichbare Gesamtunsicherheit von etwa $1 \cdot 10^{-6}$ erwarten.

Die Strahlungsthermometrie

Die Strahlungsthermometrie basiert auf dem Zusammenhang der emittierten Strahlungsleistung eines Schwarzen Körpers und seiner Temperatur, die unabhängig von Material und Form nur von Naturkonstanten abhängt. Primäre Thermometrie, wie sie zur Bestimmung von k am TPW erforderlich ist, setzt eine absolute Bestimmung der Strahlungsleistung voraus. Das heißt, dass die Flächen der Aperturblenden und deren Abstand sowie der Emissionsgrad des Schwarzen Körpers unabhängig ermittelt werden müssen. Misst man die spektrale Strahlungsleistung, wird das Plancksche Strahlungsgesetz (SRT) verwendet, bei der über alle Wellenlängen integrierten Gesamtstrahlungsleistung (Abb. 4) das Stefan-Boltzmann-Gesetz (TRT).

Für die absolute radiometrische Messung wird ein elektrisches Substitutionsradiometer eingesetzt, bei dem die in einem Empfängerhohlraum absorbierte Strahlung dessen Temperatur erhöht. Wenn dieser Empfänger im verwendeten Wellenlängenbereich möglichst „schwarz“ ist, d. h. einen Emissionsgrad sehr nahe bei Eins besitzt, erreicht man die geringste Unsicherheit. In einer zweiten Messung wird bei geschlossener Eingangsapertur dieselbe Temperaturerhöhung durch elektrische Heizleistung erzeugt, die sich aus dem Produkt von Heizstrom und angelegter Spannung sehr genau bestimmen lässt. Um die benötigte Empfindlichkeit zu erreichen, muss die Wärmekapazität des Hohlraums möglichst klein sein. Dies lässt sich durch Kühlung auf Temperaturen in der Nähe der Siedetemperatur von flüssigem Helium erreichen. Diese absoluten Empfänger heißen deshalb Kryoradiometer.

Die heute erreichte Unsicherheit dieser Detektoren liegt bei einigen 10^{-5} . Das National Physical Laboratory in Teddington bei London erwartet mit einem speziellen Gesamtstrahlungsthermometer, dem „Absolute Radiation Detector“, der derzeit entwickelt wird, eine relative Unsicherheit von $2 \cdot 10^{-5}$ für die Stefan-Boltzmann-Konstante σ , was eine Unsicherheit für k von $5 \cdot 10^{-6}$ bedeuten würde. Dies dürfte aufgrund von Beu-

gungs- und Streulichtanteilen nur schwer zu unterbieten sein.

Der Vorteil des spektralen Strahlungsthermometers besteht darin, dass mit einem Bandpassfilter ein Spektralbereich ausgewählt werden kann, innerhalb dessen sich die Absorption und die anderen optischen Eigenschaften des Hohlraumempfängers sehr genau bestimmen lassen. Da aber nur ein Teil des emittierten Spektrums gemessen wird, ist die Intensität im Detektor geringer als bei der Gesamtmessung. Außerdem muss die Durchlasskurve des Filters außerordentlich genau bekannt sein. Es ist deshalb nicht zu erwarten, dass die relative Standardunsicherheit auch bei größter experimenteller Sorgfalt weiter als auf einige 10^{-5} gedrückt werden kann.

Die Rauschthermometrie

Auch durch die Beobachtung von statistischen oder Quanteneffekten ist es möglich, die Temperatur eines Objekts zu bestimmen. Hier gibt es eine Reihe von Konzepten, die derzeit untersucht werden, wie z. B. Einzelelektronentunneln, Phononenspektroskopie oder quantisierte Wärmeleitfähigkeit. Dabei stellen die Elektronen oder die Phononen oder beide das untersuchte System dar. Angewandt in der Thermometrie wird schon seit vielen Jahren die Rauschthermometrie (JNT), die mit Hilfe der Nyquist-Formel (Tabelle) die Temperatur aus dem mittleren Quadrat der Rauschspannung bestimmt, die an einem elektrischen Widerstand abfällt. Als Parameter müssen der elektrische Widerstandswert der Probe am TPW und die Bandbreite der Messelektronik genau ermittelt werden. Da es sich um eine Messmethode handelt, deren Statistik sich mit der Messzeit verbessert, ergeben sich hohe Ansprüche an die Langzeitstabilität der Apparatur und an die Unempfindlichkeit gegenüber Störsignalen aus der Umgebung.

Die Rauschthermometrie ist bisher gut etabliert bei sehr tiefen und sehr hohen Temperaturen. Bei hohen

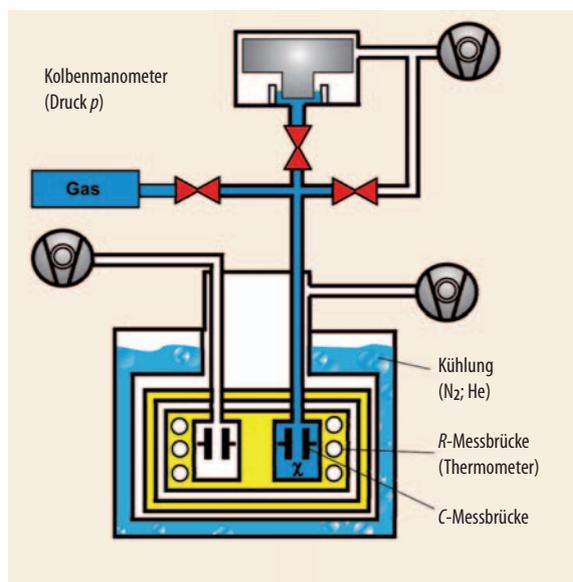


Abb. 3 Zentrales Element des an der PTB eingesetzten Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometers ist der Thermometerblock (links), der Mess- und Referenzkondensator enthält. Im Prinzipbild (rechts) sind diese beiden identischen Kondensatoren zu erkennen, die auf derselben Temperatur (hier bei tiefen Temperaturen, später am TPW) gehalten werden müssen. Dies ist nötig, weil sich der Absolutwert der Kapazität mit der heute verfügbaren Technik nicht mit der erforderlichen Genauigkeit messen lässt.

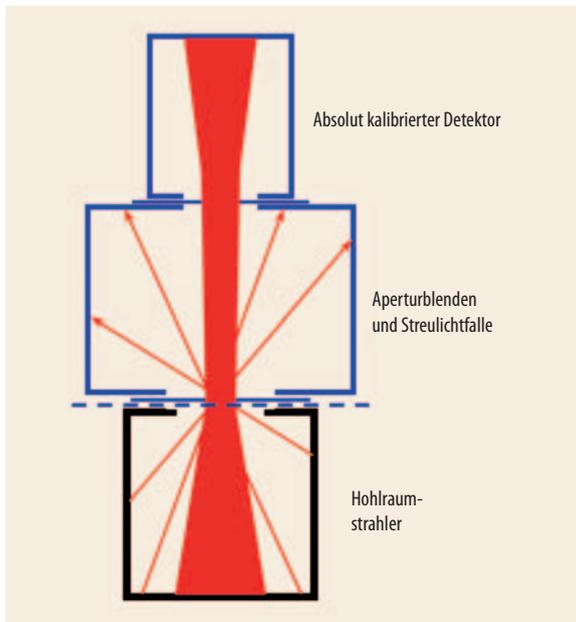


Abb. 4 Das Gesamtstrahlungsthermometer basiert auf dem Zusammenhang zwischen der emittierten Strahlungsleistung eines Schwarzen Körpers und seiner Temperatur, die nicht von Material und Form, sondern nur von Naturkonstanten abhängt. Um es als primäres Thermometer nutzen zu können, gilt es die Flächen der Aperturbleden und deren Abstand sowie den Emissionsgrad des Schwarzen Körpers unabhängig zu ermitteln.

Temperaturen nutzt sie die dort größeren Messsignale und ist somit unanfälliger gegen Störungen. Bei tiefen Temperaturen kann man hochempfindliche supraleitende Detektoren (SQUIDs) einsetzen und die kleinen Signale mit ausreichender Dynamik nachweisen. Im Bereich um den TPW muss man zu besonderen elektronischen Schaltungen wie alternierend schaltenden digitalen Korrelatoren und zum Vergleich mit bekannten Referenzrauschquellen greifen, um Verstärkung und Bandbreite stabil zu halten und den Einfluss von Driften und Empfänger- und Leitungsrauschen zu eliminieren. Ein entsprechendes Projekt wird derzeit vom NIST und dem Measurement Standards Laboratory of New Zealand verfolgt. Wie angedeutet, ist die lange Messzeit, die für geringe Unsicherheiten benötigt wird, das Hauptproblem. Eine realistische Abschätzung ergab eine Messzeit von acht Wochen, um bei einer Bandbreite von 20 kHz eine Unsicherheit in der Größenordnung von 10^{-5} zu erreichen. Damit sind diesem Verfahren bei der Präzisionsbestimmung der Boltzmann-Konstanten klare Grenzen gesetzt.

Die Doppler-Verbreiterungsthermometrie

Die Boltzmann-Konstante lässt sich auch mithilfe der Laserspektroskopie bestimmen, indem man die Doppler-Verbreiterung einer Absorptionslinie durch die Bewegung von Atomen oder Molekülen in einer Absorptionszelle bei homogener Temperatur misst. Diese vor nicht allzu langer Zeit vorgeschlagene Methode wird derzeit an der Universität Paris Nord untersucht. Aus der Halbwertsbreite des Absorptionsprofils, das

mit durchstimmbarer Laserstrahlung abgetastet wird, ergibt sich die Temperatur (DBT in Tabelle). Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass man keine absolute Radiometrie benötigt, da die Strahlungsleistung die Halbwertsbreite außer durch Aufheizeffekte nicht beeinflusst.

Bisher wurden Experimente an einer Ammoniaklinie bei 30 THz mit einem CO_2 -Laser durchgeführt, die eine Übereinstimmung mit dem CODATA-Wert für die Boltzmann-Konstante von $3,6 \cdot 10^{-5}$ bei einer statistischen Unsicherheit von $8 \cdot 10^{-4}$ ergaben. Mittelfristig ist mit einer geringeren Unsicherheit von etwa 10^{-5} zu rechnen, indem man das Rauschen mit längeren Messzeiten reduziert.

Das neue „universale“ Kelvin

Zusammengefasst gibt es gute Gründe für die Erwartung, dass sich die Boltzmann-Konstante k in ungefähr fünf Jahren mit einer Unsicherheit von $1 \cdot 10^{-6}$ ermitteln lassen sollte, gestützt auf verschiedene Experimente mit mindestens zwei unterschiedlichen Methoden (AGT und DCGT). Die Strahlungsthermometrie und vielleicht auch die Doppler-Verbreiterungsthermometrie werden dagegen wohl Ergebnisse mit größeren Unsicherheiten liefern, die aber die anderen Resultate stützen. Dies sollte für eine neue Definition des Kelvin ausreichen, die, wie 2004 von uns vorgeschlagen [8], folgendermaßen lauten könnte: „Ein Kelvin ist diejenige Änderung der thermodynamischen Temperatur T , die einer Änderung der thermischen Energie kT um exakt $1,38065 \cdot 10^{-23}$ Joule entspricht.“

Diese Formulierung entspräche derjenigen, die 1983 für die Definition des Meters gewählt wurde, und kann als explizite Definition der Einheit selbst angesehen werden. Als Alternative ist eine explizit auf die Naturkonstante bezogene Formulierung denkbar, die lautet: Das Kelvin, die Einheit der thermodynamischen Temperatur, ist so festgelegt, dass die Boltzmann-Konstante exakt den Wert $1,38065 \cdot 10^{-23}$ J/K besitzt. Beide Formulierungen sind faktisch äquivalent.

Welche Konsequenzen hat eine solche Neudefinition? Zunächst werden, wie bereits erwähnt, die praktischen Auswirkungen überhaupt nicht spektakulär ausfallen, ja, sie dürfen gar nicht zu spüren sein, damit das bisherige internationale Messwesen und die weltweit arbeitsteilige Entwicklung und Produktion der Industrie ungestört weiter funktionieren. Alles andere würde enorme Kosten verursachen. Damit dies erreicht wird, arbeitet das *Comité Consultatif de Temperature* bereits an einer „mise en pratique“, einer Umsetzungsempfehlung, die sowohl Empfehlungen zur direkten Messung der thermodynamischen Temperatur T als auch die definierenden Texte der gültigen Temperaturskalen ITS-90 und PLTS-2000 und eine Diskussion der Unterschiede $T - T_{90}$ und $T - T_{2000}$ mit deren Unsicherheiten enthält. Dabei sind T_{90} und T_{2000} Temperaturen, die entsprechend den jeweiligen Skalenvorgaben bestimmt werden.³⁾

Der Wassertripelpunkt, der derzeit per Definition mit einer exakten Temperatur versehen ist, wird bei einer Neudefinition des Kelvin seine herausgehobene Position verlieren und dann ein Temperatur-Fixpunkt wie jeder andere sein – mit genau der Unsicherheit, mit der die Boltzmann-Konstante zum Zeitpunkt der Neudefinition bekannt ist. Die oben genannte relative Unsicherheit von $1 \cdot 10^{-6}$ bedeutet 0,25 mK. Dann ist auch kein primäres Thermometer vor den anderen ausgezeichnet. Die Unterschiede bestehen nur in den durch die jeweiligen Thermometer erreichbaren Unsicherheiten.

Die wesentlichen Konsequenzen sind allerdings langfristiger Natur, da eine aus heutiger Sicht unveränderliche Naturkonstante zum Maßstab erhoben wird. Das Maßsystem wäre „auf ewig“ stabil und überall im Universum dasselbe, da Naturkonstanten die konstantesten Maßstäbe sind, die man sich heute denken kann. Für den Konversionsfaktor k zwischen mechanischer und thermischer Energie gilt das in jedem Fall. Das Kelvin und die anderen in gleicher Weise festgelegten Einheiten sind dann in diesem umfassenden Sinne universal. Dieses langfristige Ziel lohnt die weltweite Anstrengung. Sind wir damit am Ende der seit dem Altertum so eindrucksvollen Entwicklung von „Maß und Gewicht“? Es sieht so aus, aber bleiben wir vorsichtig: Unsere Vorfahren sahen sich damals wohl am selben Ziel, als sie so etwas Universelles wie den Erdumfang für die Längeneinheit requirierten.

Danksagung

Meinen Kollegen Bernd Fellmuth, Joachim Fischer, Christof Gaiser und Joachim Seidel möchte ich für ihre Unterstützung herzlich danken sowie den vielen Kollegen aus den Partnerinstituten weltweit, die gemeinsam mit uns die Grundlagen für das neue Kelvin erarbeiten.

Literatur

- [1] T. J. Quinn, Temperature, Academic Press, London (1990)
- [2] Bureau International des Poids et Mesures, Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990, Pavillon de Breteuil, Sèvres (1997)
- [3] J. Seidel et al., PTB-Mitteilungen **113**, März 2003, S. 18
- [4] E. O. Göbel, Physikalische Blätter, Januar 2001, S. 35
- [5] Recommendation 1 (CI-2005) of the CIPM (www.bipm.org)
- [6] I. M. Mills et al., Metrologia **43**, 227 (2006)
- [7] P. J. Mohr und B. N. Taylor, Rev. Mod. Phys. **77**, 1 (2005)
- [8] J. Fischer, B. Fellmuth, J. Seidel und W. Buck, in D. Zvizdic (Hrsg.), Proc. of the 9. International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science 2004, Zagreb, (2005), S. 12
- [9] W. Buck et al., New definition of the kelvin, Proceedings of XVI-II IMEKO World Congress, Rio de Janeiro (2006), im Druck
- [10] B. Fellmuth, Ch. Gaiser und J. Fischer, Measurement Science and Technology **17**, R145 (2006)

3) Dadurch werden direkte thermodynamische Temperaturmessungen weit vom TPW entfernt zugelassen, z. B. bei hohen Temperaturen, wo das Strahlungsthermometer, wenn es absolut kalibriert ist, sowohl als Interpolationsinstrument der ITS-90 als auch als primäres Thermometer verwendet werden kann. Damit können die Unsicherheiten, die z. B. bei den höchsten Fixpunkten der ITS-90 bei 1300 K fast tausendmal größer sind als die Reproduzierbarkeit des Wassertripelpunkts, künftig erheblich reduziert werden.

DER AUTOR

Wolfgang Buck hat an der Universität Tübingen Kernphysik studiert und dort 1976 promoviert. Nach einer Assistententätigkeit ging er 1979 zur PTB nach Berlin und war dort über viele Jahre Teil des Teams, das die wesentlichen Messungen für die Erweiterung der Temperaturskala von 1 K bis 1 mK durchführte (PLTS-2000). Nach der deutschen Einheit engagierte er sich zusätzlich bei der Eingliederung der metrologischen Mitarbeiter des Ostberliner Amtes für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung in die PTB. 2002 übernahm er die Leitung des Instituts Berlin der PTB und der Abteilung „Temperatur und Synchrotronstrahlung“. In dieser Funktion treibt er neben der Neudefinition des Kelvins die Errichtung der „Metrology Light Source“ in Berlin-Adlershof gemeinsam mit der BESSY GmbH voran.

