

# Im Club der 17

**Erfahren Sie, was die Reinheit von Metallen mit der Temperaturmessung zu tun hat und warum Wasser seit 1990 nicht beim gleichen Temperaturwert siedet wie zuvor. Vielleicht möchten Sie aber auch wissen, warum für einen Experten die Temperaturskala einer Gitarre unter lauter Cellos gleicht?**



Alltag für Ute Noatsch im Labor für Angewandte Thermometrie in der PTB: In einem Ofen heizt sie eine Fixpunktzelle auf, lässt alles langsam abkühlen und nimmt die Temperaturkennlinie eines Widerstandsthermometers auf.


14 Uhr, einen Flug nach Berlin hinter sich, ein anspruchsvolles Gespräch vor sich: genau der richtige Zeitpunkt für eine Tasse Kaffee. Und eine gute Gelegenheit für Joachim Fischer, sofort zur Sache zu kommen: „Würden wir unseren Kaffee zusammenschütten, wäre er nicht doppelt so heiß wie zuvor. Legt man dagegen zu einem Ein-Kilo-Metallstück ein zweites, verdoppelt sich das Gewicht, das die Waage anzeigt“, sagt er. Dass sich die Temperatur nicht wie die anderen Größen des Einheitensystems additiv verhält, bestimmt das Arbeitsleben des Physikers Fischer und das seiner Mitarbeiter vom PTB-Fachbereich Temperatur. Denn dadurch ist der Weg von der Einheit Grad Celsius zur Temperaturskala nicht

so direkt wie etwa der von der Einheit Meter zu einem Maßstab. Den Unterschied versucht Fischer mit einem Vergleich zu verdeutlichen: „Bei einer gestimmten Gitarre muss man die Saiten nur auf den Stegen herunterdrücken, dann hat man den gewollten Ton – G, D und so weiter – hervorgerufen. Wenn man Cello spielt, muss man die Töne dagegen ohne feste Anhaltspunkte suchen.“ Offensichtlich sind die PTB-Physiker also Cellisten – schließlich können sie Temperaturen finden und bestimmen, ohne auf eine fertige Temperaturskala zurückzugreifen.

Wie man bestimmte Werte auf der Temperaturskala finden kann, zeigt der Besuch eines Raumes, der einem Sammler von Lautsprecherboxen und Tresoren gehören könnte. Tatsächlich handelt es sich um das Hauptlabor der Arbeitsgruppe Angewandte Thermometrie. Was auf den ersten Blick wie Boxen und Tresore aussieht, sind spezielle Kühlschränke und Öfen. Gekühlt oder geheizt werden darin Stoffe wie Quecksilber, Wasser, Gallium, Zink, Aluminium oder Silber – verpackt jeweils in säulenartigen Gefäßen. Schwer zu glauben, dass dieses unspektakuläre Labor am Anfang einer hierarchischen Kette von Vergleichsmessungen steht, an der letztlich alle deutschen Temperaturmessgeräte hängen. Am ehesten noch deuten auf einer Anzeige die großen, rot leuchtenden Ziffern, die gerade zwischen 0,99999897 und 0,99999530 schwanken, darauf hin, dass man sich in einem Hort der Präzision befindet.

Das Prinzip, nach dem hier beispielsweise 29,7646 Grad Celsius aufbewahrt werden: Man erwärmt langsam das feste Metall Gallium in seinem Gefäß, bis es beginnt, flüssig zu werden. Erwärmt man weiter, so wird immer mehr Gallium flüssig: Solange festes und flüssiges Metall – Fachleute sprechen von fester und flüssiger Phase – nebeneinander vorliegen, bleibt die Temperatur bei einem festen Wert stehen, denn das Gallium verwendet alle zugeführte Energie für die Phasenumwandlung. „Die Natur gibt vor, dass diese Phasenumwandlung immer bei der gleichen Temperatur stattfindet – das machen wir uns zunutze“, erläutert Fischer. Eine Einschränkung gibt es: Auch der herrschende Druck beeinflusst, wenngleich nur geringfügig, bei welcher Temperatur Gallium flüssig wird. Daher wurde vereinbart, die Messungen immer bei normalem Atmosphärendruck von 101,325 Kilopascal durchzuführen.

Ganz ähnlich werden unter anderem auch 419,527 °C sowie 660,323 °C und 961,78 °C gefunden: Bei diesen Temperaturen wandeln sich flüssiges Zink, Aluminium und Silber in ihre feste Phase um. Diese Werte heißen



Fixpunkte sind so etwas wie Markierungen auf der Temperaturskala. Experten nennen daher die säulenartigen Gefäße, in denen die Metalle erwärmt oder abgekühlt werden, Fixpunktzellen. Durch eine Öffnung in der Mitte der Säule lassen sich Thermometer einführen und letztlich auf die entsprechenden Werte kalibrieren.

Dieses Prinzip scheint so einfach zu sein, dass man sich fragt, warum sich nicht alle Thermometerhersteller oder entsprechende Dienstleister-Labore solche Fixpunktzellen verwenden. Eine der Antworten: Die Metalle müssen extrem rein sein, damit die Fixpunktzelle nicht einen geringfügig falschen Temperaturwert vorspiegelt. „Sie kennen den Effekt vom Salzstreuen im Winter: Verunreinigungen – in diesem Falle das Salz – können die Erstarrungstemperatur – in diesem Fall das Gefrieren des Wassers – deutlich heruntersetzen“, sagt Fischer. Daneben gibt es auch Verunreinigungen, die den Schmelzpunkt von Metallen erhöhen. Daher darf auf eine Million Metallatome in den PTB-Fixpunktzellen höchstens ein Atom eines anderen Stoffes kommen.

Erworben von entsprechenden Industrieunternehmen, werden die Metalle vor ihrem Einsatz genauestens auf Verunreinigungen untersucht. Fischer: „Einer unserer aktuellen Forschungsschwerpunkte ist es, die Verfahren zur Analyse von Fixpunktmetallen unter die Lupe zu nehmen. Gemeinsam mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung führen wir diese Verfahren auf die Basiseinheit der Stoffmenge zurück und ermitteln, wie fehlerhaft die gelieferten Angaben zum Gehalt an Fremdstoffen sind.“ Viel Know-how fließt auch in die Herstellung der säulenartigen Zellen, die das Verhalten des Metalls möglichst nicht beeinflussen dürfen.

Bei Temperaturen unterhalb von 25 Grad Celsius stößt das System der metallischen Fixpunkte an seine Grenzen: Außer Quecksilber werden elementare Metalle dann nicht mehr flüssig. Deshalb müssen andere Stoffe zum Einsatz kommen, darunter das Wasser. Allerdings ist der Wert der Schmelztemperatur oder der Erstarrungstemperatur bei Wasser und Quecksilber schon vergleichsweise stark vom herrschenden Druck abhängig. Eine ungenaue Einstellung des Drucks könnte daher bei der Temperaturmessung zu kleinen Abweichungen von einigen hundertstel Grad führen.

Abhilfe bietet wieder einmal die Natur. Wasser beispielsweise kann nicht nur wie am Schmelzpunkt als Eis und als Flüssigkeit vorliegen, sondern sogar auch als Eis, Flüssigkeit und Dampf zugleich. Wer sagt, er hat trotz der Allgegenwart von Wasser dieses Phänomen noch nie beobachtet, hat recht: Denn es existiert nur – und wirklich nur – bei einem Druck, der mit rund 612 Pascal weit unter dem üblichen Luftdruck unserer Atmosphäre liegt, und bei einer Temperatur von 0,01 Grad Celsius oder 273,16 Kelvin. Experimentell lässt sich dieser so genannte Tripelpunkt (Dreiphasenpunkt) des Wassers erreichen, indem man eine Fixpunktzelle zu mehr als zwei Dritteln mit Wasser befüllt, die Luft darin mit Hilfe einer Vakuumpumpe vollständig entfernt und anschließend die Zelle verschließt. Bei Raumtemperatur befinden sich dann flüssiges Wasser und Dampf in der Zelle. Beim Abkühlen bildet sich als dritte Phase zusätzlich Eis.

Die Tripelpunkte verschiedener Materialien sind für die Temperaturlabore der PTB ideal geeignet, um auf der Skala beispielsweise minus 259,3467 °C (Wasserstoff) und minus 218,7916 °C (Sauerstoff) aufzuspüren. Denn sobald alle drei Phasen des jeweiligen Stoffes gleichzeitig vorliegen, räumt die Natur Druck und Temperatur keine

Gut, dass es auf der langen Temperaturskala festgelegte Etappenziele gibt, die für Orientierung sorgen. Ob der Tripelpunkt des Sauerstoffs, der Schmelzpunkt des Galliums oder der Erstarrungspunkt des Goldes – solche thermodynamischen Gleichgewichtszustände von reinen Substanzen dienen als eindeutige Markierungen auf der Skala. Insgesamt arbeiten die Temperaturexperten mit 17 solcher „Fixpunkte“, die ihnen die Messung von Temperaturen im Labor erleichtern.

Fotos (2): original-okerland

Freiheiten mehr ein. Unter den siebzehn Fixpunkten, die die Markierungen auf der Temperaturskala bilden, sind sechs Tripelpunkte.

Naturegeben und ewig gültig ist die resultierende Skala trotz allem keineswegs. „Das Internationale Komitee für Maß und Gewicht – und damit der Mensch – hat den Fixpunkten 1989 die derzeit gültigen Temperaturwerte zugewiesen und die ITS-90 (Internationale Temperaturskala von 1990) verabschiedet. Im Mai habe ich in Paris an einer Sitzung des beratenden Komitees für Thermometrie teilgenommen, um über eine eventuelle neue Temperaturskala zu sprechen“, berichtet Fischer. Tatsächlich überprüfen die Metrologie-Experten gerade wieder einmal, ob sie den Fixpunkten die exakt „richtigen“ Zahlenwerte zugeordnet haben. Dazu setzen sie so genannte Primärthermometer ein, mit denen sie die Temperatur messen können, ohne dass sie sich dabei auf einen anderen Temperaturwert beziehen müssen. Ausgenutzt wird jeweils ein physikalisches Gesetz, über das eine elektrische oder mechanische Messgröße mit der Temperatur verknüpft ist, wobei alle anderen Größen im Gesetz entweder Naturkonstanten sind oder unabhängig messbar. Solche Primärthermometer sind jedoch aufwendig und teuer zu bauen und zu betreiben, so dass ihr Einsatz selbst für nationale Metrologieinstitute im Alltag unsinnig ist. Ein ganzes Labor nimmt etwa allein die komplizierte Anlage ein, mit der die PTB seinerzeit zur Vorbereitung der ITS-90 die Wärmestrahlung erstarrenden Goldes und damit den Temperaturwert für den Gold-Fixpunkt bestimmt hat.

Der technologische Fortschritt ermöglicht es, immer bessere Primärthermometer zu konstruieren. „Wir wissen heute, dass man bei der ITS-90 in manchen Temperaturbereichen um bis zu 50 tausendstel Grad daneben liegt. Trotzdem ist es noch zu früh, eine neue Temperaturskala aufzustellen“, ist Fischer nach seinen Gesprächen in Paris überzeugt. Vorsicht ist angebracht, hat man doch 1989

beispielsweise die 100 °C-Markierung der Vorgängerskala – den Siedepunkt des Wassers – um 0,026 Grad und damit zu weit verschoben: Der Wert wurde „überkorrigiert“, wie Fischer sagt.

Eine Skala besteht nicht alleine aus Fixpunkten. Wie die Temperaturwerte dazwischen mit Hilfe so genannter Interpolationsinstrumente bestimmt werden, haben die Macher der ITS-90 ebenfalls festgelegt. Zwischen minus 259 und plus 962 Grad Celsius kommen zum Beispiel an den Fixpunktzellen abgeglichene Platinthermometer zum Einsatz, bei denen sich der elektrische Widerstand mit der Temperatur ändert.

Die Hersteller von Tiefsttemperaturkühlgeräten und Wissenschaftler, die mit grundlegenden Experimenten etwa die Supraleitung von Stoffen erforschen, haben mit der ITS-90 ein Problem: Sie reicht nur bis zu 0,65 Grad über dem absoluten Nullpunkt (0,65 Kelvin) hinunter, also bis minus 272,5 Grad Celsius. Doch seit dem Jahr 2000 gibt es noch eine Skala, die PLTS-2000, für Temperaturen von 0,9 tausendstel Kelvin bis zu einem Kelvin. Als „Übergangslösung“ – PLTS steht für „Provisional Low Temperature Scale“ – eingestuft ist sie, weil die zugrunde liegenden Messergebnisse dreier Institutionen – darunter die PTB – am unteren Ende voneinander abwichen. Die PLTS-2000 beruht auf dem Phasengleichgewicht zwischen der flüssigen und festen Phase einer bestimmten Form des Edelgases Helium – so genanntes Helium-3. „Wir sind gegenwärtig das einzige Metrologieinstitut weltweit, das diese Tieftemperaturskala komplett realisiert und über Kalibrierungen an Kunden weitergibt“, sagt Fischer.

Während des Rückflugs von Berlin nach Köln-Bonn zeigt ein Monitor in 8000 Metern Höhe die Lufttemperatur von minus 46 Grad Celsius an. Und dann sagt der Pilot die Temperatur am Ankunftsflughafen durch: 23 °C. Ob er ahnt, was alles hinter diesen simplen Angaben steckt? ■

FRANK FRICK

## Weg vom Wasser

Man kann über Österreichs Hauptstadt sicher vieles sagen, aber nicht, dass sie am Meer liegt. Trotzdem gibt es ein „Wiener Normal für mittleres Ozeanwasser“, das für die exakte Temperaturmessung eine wichtige Rolle spielt. Die Erklärung: Aufbewahrt wird dieses Wasser von der Internationalen Atomenergieorganisation IAEA, die ihren Sitz in Wien hat, und es entspricht einer Mischung weltweit gesammelter und destillierter Meerwasserproben. Entscheidend ist, dass es eine festgelegte Isotopenzusammensetzung besitzt. Diese Zusammensetzung wirkt sich auf die genaue Lage des Tripelpunktes des Wassers aus, also auf denjenigen Wert von Druck und Temperatur, bei dem Eis, flüssiges Wasser und Dampf nebeneinander vorliegen. Die Definition der Einheit der Temperatur „Das Kelvin ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers“ lässt somit einen gewissen Spielraum, der erst durch die zu-

sätzliche Einigung auf das „Wiener Ozeanwasser“ als Normal eingeschränkt wurde. Hinzu kommt, dass sich die Definition des Kelvin aus einer eher willkürlich gewählten Materialeigenschaft – eben dem Wasser-Tripelpunkt – und nicht aus einer fundamentalen Naturkonstante ableitet. So etwas lässt die Messexperten nicht ruhen. PTB-Experte Joachim Fischer, Leiter eines umfangreichen Forschungsprojekts, an dem alle namhaften europäischen Metrologieinstitute beteiligt sind: „Wir arbeiten daran, dass man 2011 zusammen mit einer Reihe von anderen Basiseinheiten – Kilogramm, Ampere, Mol – auch das Kelvin neu definieren kann.“ Dabei soll das Kelvin an die Boltzmann-Naturkonstante angeknüpft werden. Die Wissenschaftler versprechen sich davon auch eine höhere Genauigkeit von Temperaturmessungen oberhalb des Kupfer-Fixpunktes, der bei rund 1085 °C liegt.

ff