

Thermometrie zurück am METAS

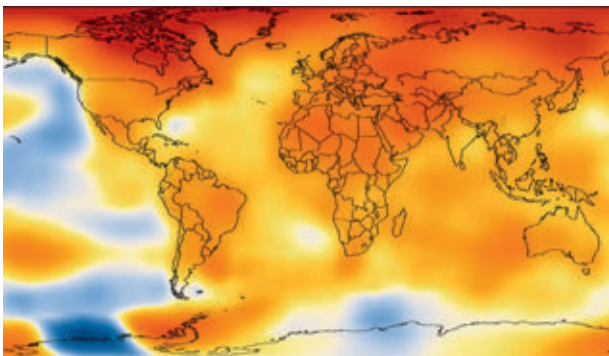
Die Temperatur gehört allgemein zu den wichtigsten und am häufigsten gemessenen physikalischen Grössen. Sie ist ein wichtiger Parameter in vielen Forschungsbereichen und muss dementsprechend genau und verlässlich messbar sein. Seit April 2020 realisiert das METAS wieder die aktuelle Internationale Temperaturskala (ITS-90). Sie ist die Grundlage verschiedenster nachgefragter Dienstleistungen im In- und Ausland.

REMO SENN

Praktisch alle mechanischen, elektrischen, magnetischen oder optischen Eigenschaften von Materie sind mehr oder weniger stark temperaturabhängig. Somit besteht die Notwendigkeit einer zusätzlichen Bestimmung der Temperatur bei den meisten Messungen anderer Grössen und gleichzeitig stellt genau diese Temperaturabhängigkeit die Grundlage vieler Methoden zur Temperaturmessung dar. Zudem steht die praktische Nutzung der Thermometrie in engem Zusammenhang mit allen wesentlichen Bereichen der Industrie, des Energiesektors, der Biologie und Medizin und der Meteorologie. Gleichzeitig ist die Temperatur sehr häufig ein wichtiger Kontroll- und Steuerungsparameter vieler Experimente in allen Forschungsbereichen.

Vom DI zurück ans METAS

In den letzten rund 10 Jahren realisierte ein vom METAS bezeichnetes designiertes Institut (DI) die Einheit Kelvin über die bis heute aktuelle Internationale Temperaturskala von 1990 (ITS-90). Dafür wurde dem DI die am METAS bereits vorhandene ITS-90 Realisierung zu Verfügung gestellt, um die



1: Die Temperatur muss nicht nur in der Medizin und Meteorologie genau und verlässlich messbar sein, sie gehört allgemein zu den wichtigsten und am häufigsten gemessenen physikalischen Grössen.



2: Fixpunktzellen bilden mit hochgenauen Normal-Platin-Widerstandsthermometer die ITS-90.

Dienstleistungen in diesem Bereich erbringen zu können. Das komplette Equipment verblieb aber im Besitz des METAS und somit auch die Verantwortung und Sicherstellung dieser Infrastruktur. Das DI betrieb die operative Infrastruktur und bot Kalibrier-Dienstleistungen an. Zudem garantierte es mit seinen internationalen Tätigkeiten, auf das Internationale Einheitensystem (SI) rückführbare Messergebnisse auf dem aktuellen Stand von Forschung und Technik.

Aus gemeinsamen strategischen Überlegungen wurde diese Zusammenarbeit Ende März 2020 offiziell beendet und das METAS hat seine Aktivitäten im Bereich der Thermometrie wieder aufgenommen. Als Konsequenz wurde das bestehende «ITS-90 Labor» des METAS wieder zurück transferiert und in neue geeignete Räumlichkeiten integriert. Um die erforderlichen Anerkennungen in den internationalen Fachgremien (Technisches Komitee für Thermometrie EURAMET, Konsultativkomitee des BIPM) zu erhalten, mussten internationale Peer-Reviews auf technischer Ebene und im Bereich des Qualitätsmanagements durchgeführt werden (in diesem Falle mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Deutschland). Alle notwendigen Schritte und die offizielle Anerkennung konnten bis im März 2020 erfolgreich implementiert und eine lückenlose Realisierung der ITS-90 in der Schweiz sichergestellt werden. Das METAS verfügt somit wieder über ein international anerkanntes Thermometrie-Labor und baut auf Basis der ITS-90 verschiedene nachgefragte Dienstleistungen auf.



3: Tripelpunktzelle mit Wasser-Eis-Dampf: Sie diente zusammen mit dem absoluten Nullpunkt zur Definition der thermodynamische Temperatur.

Alte Skala – neue Definition

Durch die Revision des SI gelten seit Mai 2019 für alle sieben Basiseinheiten neue Definitionen auf der Basis von Naturkonstanten. Im Falle der Basiseinheit Kelvin wird dies über die Boltzmann-Konstante k erreicht. Aus der neuen Definition folgt, dass ein Kelvin gleich der Änderung der thermodynamischen Temperatur ist, die sich aus einer Änderung der Wärmeenergie kT von $1.380\,649 \times 10^{-23}$ Joule ergibt. Prinzipiell kann jeder physikalische Zusammenhang, welcher über die statistische Mechanik verstanden wird, zur direkten Realisierung der thermodynamischen Temperatur genutzt werden. Zurzeit werden durch das Konsultativkomitee folgende Verfahren empfohlen: akustische Gasthermometrie, radiometrische Thermometrie, polarisierende Gasthermometrie und Rauschthermometrie.

Die thermodynamische Temperatur wurde historisch sehr lange über den Tripelpunkt von Wasser (273.16 K oder 0.01 °C) und den absoluten Nullpunkt (0 K oder -273.15 °C) definiert. Ein Tripelpunkt (auch Dreiphasenpunkt) ist ein Zustand eines aus einer einzigen Stoffkomponente bestehenden Systems, in dem Temperatur und Druck dreier Phasen – fest, flüssig und gasförmig – im thermodynamischen Gleichgewicht stehen. Mit der Festlegung eines Fixpunktes und eines Thermometers, welches auf den fundamentalen Prinzipien der statistischen Mechanik basiert, konnte in der Theorie jede beliebige Temperatur erreicht werden.

4: Die Temperaturskala ITS-90 wird am METAS mit den hervorgehobenen Fixpunkten von -189 °C bis 660 °C realisiert und ist abgestützt durch die internationalen Messvergleiche EURAMET.T-K9 und EURAMET.T-K3.5.

Durch die Fixierung des Tripelpunktes von Wasser als Referenzpunkt ohne Unsicherheiten, waren die Bestimmungen der Boltzmann-Konstante mit einer dazugehörigen Unsicherheit behaftet. Durch die Neudefinition wurde diese Situation umgedreht. Die Boltzmann-Konstante wird ohne Unsicherheit fixiert bzw. die Unsicherheit dem Tripelpunkt von Wasser «vererbt». Reine thermodynamische Systeme, nur auf der Boltzmann-Konstante basierend, sind nach wie vor nur mit enormen Aufwand realisierbar. Zudem liefern sie nicht in jeden Fall ein praktisch einsetzbares System. Diese heutige Situation bestand bereits in ähnlicher Weise vor rund 100 Jahren. Deshalb wurde 1927 eine zweite parallele Temperaturskala eingeführt.

Internationale Temperaturskala ITS-90



Diese praktische Temperaturskala wurde über die Jahre auch immer wieder angepasst. Die momentan gültige Version dieser praktischen Umsetzung – die Internationale Temperaturskala 1990 (ITS-90) – basiert auf Fixpunkten, welche sich über die Phasenübergangsphänomene (Schmelz-, Erstarrungs- und Tripelpunkten) von weiteren Materialien definieren. Zusätzlich benötigt diese Skala, je nach Bereich, ein geeignetes und definiertes Interpolationsinstrument, um die Werte zwischen den Fixpunkten abzubilden. Zur Überprüfung und Anpassung müssen die Unterschiede zwischen der thermodynamischen Temperatur und der ITS-90 ständig verbessert und überprüft werden.

Durch den grossen praktischen Vorteil und die sehr hohe Reproduzierbarkeit ist die ITS-90 als Skala nach wie vor von hoher Aktualität und wird weltweit hauptsächlich von nationalen Metrologieinstituten realisiert. Die thermometrische Basis der Schweiz besteht aus einer Reihe von Fixpunktzellen, die den Bereich von -189.3342 °C bis 660.323 °C redundant abdecken. Diese Zellen werden gemeinsam mit Normal-Platin-Widerstandsthermometer, als Interpolationsinstrument, zur Abbildung der ITS-90 verwendet.

Aussergewöhnliche Synergie

Das Thermometrie-Labor des METAS ist als ein Teil des Labors Gleichstrom und Niederfrequenz bzw. des Bereichs Elektrizität organisiert. Die allgemein sehr häufig genutzte Verbindung von temperaturabhängigen elektrischen Effekten zur Messung der Temperatur und konkret die Widerstandsthermometrie als ein definiertes Interpolationsinstrument der ITS-90, erfordert eine hochstehende Infrastruktur der elektrischen Metrologie. Diese wird vom METAS seit vielen Dekaden erfolgreich betrieben und weiterentwickelt. Durch die enge Verzahnung der beiden Fachbereiche hat die Thermometrie direkten und schnellen Zugang zur elektrischen Messtechnik, wovon Realisierung und Kalibrierungen mit tiefen Messunsicherheiten profitieren. Darüber hinaus könnte diese aussergewöhnliche Synergie mit der Entwicklung der Rauschthermometrie, basierend auf dem elektrischen Widerstandsrauschen zur Bestimmung der thermodynamische Temperatur, dereinst zu einem «elektronisches Kelvin» führen und die ITS-90 ablösen.

Kontakt:
Remo Senn
Technischer Experte Thermometrie
Labor Gleichstrom und Niederfrequenz
dclf@metas.ch
+41 58 387 03 30

Aktuelle Kalibrierdienstleistungen der Thermometrie am METAS

Fixpunktzellen der ITS-90	Ar, Hg, H ₂ O, Ga, In, Sn, Zn, Al
Normal-Platin-Widerstandsthermometer an ITS-90 Fixpunkten	-189 °C bis 660 °C
Widerstandsthermometer an ITS-90 Fixpunkten	
Widerstandsthermometer, Thermoelemente, Anzeigen mit Temperaturfühler	Vergleichskalibration mit Widerstandsnormalthermometer in verschiedenen Kalibriermedien (Flüssigkeiten, Luft etc.) -196 °C , -90 °C bis 660 °C
Trockenblockkalibratoren	-100 °C bis 660 °C

Referenzen

- [1] Preston-Thomas, H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). Metrologia 27, 1990.
- [2] Consultative Committee for Thermometry (CCT), Mise en pratique for the definition of the kelvin in the SI. BIPM SI Brochure – 9th edition (2019) – Appendix 2.
- [3] Peruzzi, A., Bruin-Barendregt C., Bosma R., und Senn R.. Final report on EURAMET.T-K3.5: Bilateral comparison of SPRT calibration at the ITS-90 Fixed Points of Ar, Hg, H₂O, Ga, In, Sn, Zn and Al. Metrologia 51, Tech. Suppl., 2014.
- [4] Final report on EURAMET.T-K9: Realizations of the ITS-90 from 83.8 K to 692.7 K, not yet published



La thermométrie a fait son retour à METAS

La température est l'une des grandeurs physiques les plus importantes et les plus fréquemment mesurées. Elle influence presque toutes les propriétés mécaniques, électriques, magnétiques ou optiques de la matière. La température est donc non seulement un mesurande essentiel dans les domaines de la météorologie et de la médecine, mais également un paramètre de contrôle central des processus techniques.

Depuis la révision du Système international d'unités (SI), entrée en vigueur en mai 2019, les sept unités de base sont définies à l'aide de constantes naturelles. En ce qui concerne le kelvin, il a été redéfini à partir de la constante de Boltzmann k . Étant donné que la réalisation primaire exige un énorme effort, l'Échelle internationale de température de 1990 (ITS-90) est souvent utilisée dans la pratique. Cette échelle se base sur des points fixes, qui résultent de phénomènes de transition de phase (points de fusion, points de congélation et points triples) de certains matériaux. En outre, elle nécessite un instrument d'interpolation adapté et défini (thermomètre à résistance de platine étalon) pour obtenir les valeurs entre les points fixes.

Le laboratoire Thermométrie de METAS, rattaché au domaine Électricité, utilise des effets électriques dépendant de la température afin de mesurer la température. Depuis le mois d'avril 2020, METAS réalise de nouveau l'actuelle Échelle internationale de température de 1990 (ITS-90). Grâce à l'étroite imbrication de ces deux domaines spécialisés, la thermométrie a un accès direct et rapide à la technologie de mesure électrique. Cela donne lieu à des indications de température d'une très grande exactitude avec des petites incertitudes de mesure. Cette synergie et la thermométrie du bruit pourraient conduire au développement d'un «kelvin électronique» et ainsi rendre l'ITS-90 obsolète dans un avenir lointain.

La termometria torna al METAS

La temperatura è una delle grandezze fisiche più importanti e più frequentemente misurate. Influisce praticamente su tutte le proprietà meccaniche, elettriche, magnetiche o ottiche della materia. La temperatura non è quindi solo un misurando importante della meteorologia o della medicina, ma anche un parametro di controllo centrale dei processi tecnici.

A seguito della revisione del Sistema Internazionale di unità di misura (SI), dal maggio 2019 per tutte e sette le unità di base sono in vigore nuove definizioni basate su costanti naturali. Nel caso del Kelvin, ciò si ottiene utilizzando la costante di Boltzmann k . Dato che le procedure primarie possono essere implementate solo con enormi sforzi, nella pratica spesso si utilizza la scala di temperatura del 1990 (ITS-90). Quest'ultima si basa su punti fissi, che derivano da fenomeni di transizione di fase (punti di fusione, di solidificazione e punti tripli) di materiali. Inoltre, per mappare i valori tra i punti fissi, questa scala richiede uno strumento di interpolazione adatto e definito (termometro a resistenza standard al platino).

Il laboratorio di termometria del METAS, situato nel settore Elettricità, per misurare la temperatura utilizza la combinazione di effetti elettrici dipendenti dalla temperatura. Dall'aprile 2020 il METAS ha di nuovo implementato l'attuale scala internazionale di temperatura del 1990 (ITS-90). Grazie alla stretta interconnessione delle due aree specialistiche, la termometria ha un accesso diretto e rapido alla tecnologia di misurazione elettrica e ciò porta a indicazioni di temperatura ad alta precisione con piccole incertezze di misura. In futuro, con la termometria del rumore questa sinergia potrebbe portare anche ad un «Kelvin elettronico» e quindi in un futuro lontano rendere obsoleta la scala di temperatura ITS-90.

Thermometry returns to METAS

Temperature is one of the most important and most frequently measured physical quantities. It influences practically all of the mechanical, electrical, magnetic and optical properties of matter. Temperature is thus an important measurand in meteorology and medicine as well as a key control parameter in technical processes.

Due to the revision of the International System of Units (SI), new definitions based on natural constants have applied to all seven base units since May 2019. The Boltzmann constant k is used to define the kelvin base unit. Because realisation of the primary methods requires an enormous effort, the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) is often used in practice. ITS-90 is based on fixed points in connection with phase transition phenomena (melting, freezing and triple points) of materials. In addition, this scale requires a suitably defined interpolation instrument (standard platinum resistance thermometer) in order to obtain values between the fixed points.

The Thermometry laboratory at METAS, forming part of the Electricity field, performs temperature measurements on the basis of temperature-dependent electrical effects. Since April 2020, METAS is again responsible for realising the current International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). Thanks to close cooperation between the two technical fields, thermometry has fast and direct access to the relevant electrical measuring equipment, leading to high-accuracy temperature measurements with low measurement uncertainties. In future, this synergy might even lead to an «electronic kelvin» on the basis of noise thermometry, making ITS-90 obsolete in the distant future.