

## Neue Tieftemperaturskala der PTB

Im Tieftemperaturbereich zwischen 0,65 K und 1 K gibt es derzeit zwei überlappende, aber unterschiedliche Internationale Temperaturskalen. Die neue, 2006 fertiggestellte PTB-Skala für das Temperaturintervall von 0,65 K bis 3,2 K (kurz PTB-2006) zeigt jetzt, wie beide Skalen in einer künftigen verbesserten Internationalen Temperaturskala zusammengeführt werden können.

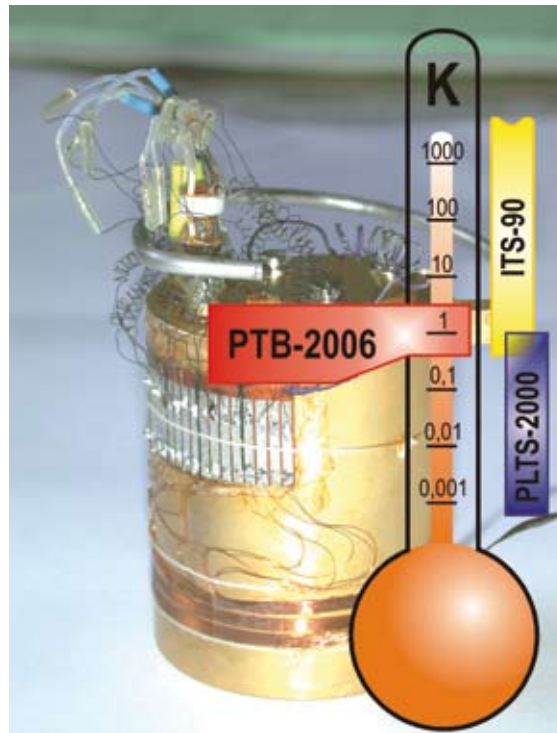
Der Temperaturbereich unterhalb von 1 K ist von Interesse für Grundlagenuntersuchungen und für messtechnische Anwendungen wie den Einsatz hochempfindlicher Detektoren und Bolometer. Produzenten und Anwender kryotechnischer Anlagen können für rückführbare Temperaturmessungen zurzeit auf zwei Temperaturskalen zurückgreifen: die Vorläufige Tieftemperaturskala PLTS-2000 und die Internationale Temperaturskala ITS-90, deren Überlappbereich von 0,65 K bis 1 K reicht. Mit abnehmender Temperatur weichen die Skalen jedoch nahe 0,65 K deutlich voneinander ab. Dabei ist bekannt, dass die ITS-90 im Gegensatz zur PLTS-2000 im Überlappbereich deutliche Abweichungen von der thermodynamischen Temperaturskala aufweist. Aufgabe der PTB-2006 ist es, diesen inakzeptablen Zustand zu überwinden.

Für das Temperaturintervall von 0,65 K bis 3,2 K gibt die ITS-90 ein spezielles Polynom vor, mit dem die Temperatur  $T_{90}$  aus dem gemessenen Dampfdruck von  $^3\text{He}$  zu ermitteln ist. Die PLTS-2000 nutzt analog den Schmelzdruck von  $^3\text{He}$  zur Temperaturbestimmung. Idealerweise müsste man bei derselben Temperatur sowohl den Dampf- als auch den Schmelzdruck des  $^3\text{He}$  messen, um die beiden Skalen zur Deckung zu bringen. Da ein solcher direkter Vergleich aus kryotechnischen Gründen bisher nicht möglich ist, wurde für die Aufstellung der PTB-2006 ein indirekter Vergleich über sehr stabile Rhodium-Eisen-Widerstandsthermometer gewählt. In mehreren Teilschritten wurde ein Datensatz für die Temperaturabhängigkeit des  $^3\text{He}$ -Dampfdrucks

bestimmt, der den Gesamtbereich von 0,65 K bis 3,2 K abdeckt. Dieser Datensatz sowie ein angepasstes neues  $^3\text{He}$ -Dampfdruckpolynom wurden kürzlich veröffentlicht.

Mit der PTB-2006 steht nun eine neue  $^3\text{He}$ -Dampfdruckskala zur Verfügung, die insgesamt konsistent mit der thermodynamischen Temperaturskala ist, oberhalb von 2 K in die ITS-90 und unterhalb von 1 K in die PLTS-2000 übergeht und zwischen 0,65 K und 1 K im Vergleich zur ITS-90 nur noch ein Drittel der Unsicherheit aufweist.

Weitergehende Informationen von J. Engert,  
Tel.: (030) 34 81-72 26,  
E-Mail:  
jost.engert@ptb.de



Vor einer  $^3\text{He}$ -Dampfdruckzelle mit eingesetzten Rhodium-Eisen-Widerstandsthermometern sind die Definitionsbereiche der Temperaturskalen ITS-90, PLTS-2000 und PTB-2006 auf der logarithmischen Temperaturachse markiert.

## Das Meter aus der Steckdose

Ein neues Konzept zum Vergleich optischer Uhren per Glasfaser ist in der PTB entwickelt und an einer Glasfaserstrecke erprobt worden. Eine optische Frequenz, die aus einem optischen Frequenzstandard abgeleitet wurde, konnte mit einer Unsicherheit von etwa  $1 \cdot 10^{-17}$  über eine Glasfaserstrecke von insgesamt 211 km Länge übertragen werden.

Die besten Atomuhren und optischen Frequenzstandards mit angestrebten relativen Messunsicherheiten kleiner als  $10^{-16}$  stehen in verschiedenen

Laboratorien, und häufig in unterschiedlichen Ländern. Eine Möglichkeit, um Frequenznormale mit der besten Genauigkeit untereinander zu vergleichen und höchstpräzise Frequenzen an Industrie und Forschungseinrichtungen weiterzugeben, ist die Übertragung hochstabiler optischer Frequenzen über Glasfasern, wie sie für die optische Telekommunikation verwendet werden. Sie sind unterirdisch verlegt gut geschützt und weisen eine geringe Dämpfung von etwa 0,25 dB pro Kilometer für Strahlung im nahen Infrarot auf.

Weitergehende Informationen von G. Grosche,  
Tel.: (05 31) 592-43 18  
E-Mail:  
gesine.grosche@ptb.de

Fortsetzung auf Seite 2

### Das Meter aus der Steckdose (Fortsetzung Von Seite 2)

Bei dem in der PTB entwickelten Verfahren kann die Frequenz eines optischen Normals mit einem Femtosekunden-Frequenzkammgenerator phasenkohärent in den nahen Infrarotbereich umgesetzt werden. Eine so synthetisierte optische Frequenz wurde nun im Rahmen einer internationalen Kooperation in eine Glasfaserstrecke von 86 km Länge eingespeist, die zwei Forschungsinstitute in Paris miteinander verbindet. Durch zusätzliche Faser-spulen wurde die Strecke bis auf 211 km verlängert.

Wegen mechanischer, akustischer und thermischer Einflüsse auf die optische Faser schwankt die optische Weglänge, was sich am Ende der Übertragungsstrecke durch Frequenzfluktuationen bemerkbar macht. Diese Schwankungen wurden aber interferometrisch erfasst und durch eine Regelung um etwa drei Größenordnungen unterdrückt. So konnte für die glasfasergestützte Frequenzübertragung eine Unsicherheit von etwa  $1 \cdot 10^{-17}$  erreicht werden.

Mit der Umsetzung und Übertragung einer optischen Trägerfrequenz steht der PTB ein weltweit einzigartiges Verfahren zum Vergleich von

Frequenznormalen auch über weite Strecken zur Verfügung. Es eröffnet gleichzeitig die Möglichkeit, Referenzfrequenzen an Forschungslaboratorien zu verteilen und für grundlegende Fragestellungen der Physik nutzbar zu machen.

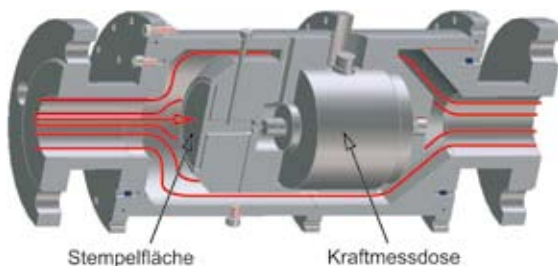


Ein Interferometer mit fasergekoppelten, akustooptischen Modulatoren detektiert Schwankungen der optischen Weglänge in der Übertragungsfaser.

## Mit Kraft Durchfluss messen

**Mit einem neuartigen, patentierten Durchflussmessgerät kann durch Messung der Kraft des Massenstroms der Durchfluss bestimmt werden. Dies geschieht unabhängig von den Stoffeigenschaften der Flüssigkeit.**

Die metrologische Rückführung wird in der Durchflussmesstechnik mit Hilfe von Durchflussmessgeräten als TransfERNormale sichergestellt. Mit diesen TransfERNormalen werden beispielsweise die Prüfstände der Mineralölindustrie, der Industrie für flüssige Lebensmittel und der Trinkwasserversorgungsunternehmen an das jeweilige nationale Primärnormal metrologisch angeschlossen. In Deutschland wurde dafür das Hydrodynamische Prüffeld der PTB als Primärnormal entwickelt. Als TransfERNormale sind bisher kommerziell erhältliche Durchflussmessgeräte im Einsatz, bei denen häufig die Stoffparameter des zu bestimmenden Flüssigkeitsstroms das Messergebnis beeinflussen. Insbesondere die Temperatur und die Flüssigkeitsviskosität können die Messwerte um mehrere Zehntel Prozent verfälschen, was in der Rückführbarkeitskette zu teilweise unzulässig großen Messunsicherheiten führt.



Querschnittszeichnung des neuentwickelten Durchflussmessgerätes. Die Vorrichtung zum Zu- und Abführen der Teilströme ist nicht mit abgebildet.

Abhilfe soll ein in der PTB entwickeltes und patentiertes Durchflussmessgerät schaffen. Dabei wird erstmalig der Durchfluss von Flüssigkeiten ermittelt, indem man die Kraft des Massestroms, die direkt auf eine Stempelfläche wirkt, mit Hilfe einer Kraftmessdose misst. Die Kraft des Massestroms ist proportional zur mittleren Geschwindigkeit der Strömung. Um unabhängig von den Stoffeigenschaften der Flüssigkeiten zu werden, wird dem stationären Massestrom ein definierter stationärer Teilstrom gleicher Flüssigkeit zu- und wieder abgeführt. Während dieses Vorgangs wird jeweils die Kraft des gesamten Massestroms gemessen. Mit Kenntnis dieser Teilströme ist es dann möglich, den Massestrom unabhängig von den Stoffeigenschaften der zu messenden Flüssigkeit zu ermitteln.

Aufgrund der empfindlichen und genauen Kraftmesstechnik wurde mit dem neu entwickelten Durchflussmessgerät ein Präzisions-Messgerät geschaffen, das die Genauigkeit bei der Rückführung des Massendurchflusses erheblich steigert. In ersten Messungen konnten relative Standardabweichungen unter Wiederholbedingungen in der Größenordnung von  $10^{-5}$  erreicht werden. Ein weiterer Vorteil des Geräts liegt in seiner äußerst kompakten Bauform und in einem großen Messbereich. Bedingt durch die Nutzung der Kraftmessung ergibt sich zukünftig Potenzial zur weiteren Vergrößerung des Messbereichs.

Weitergehende Informationen von J. Riedel,  
Tel.: (05 31) 592-13 28,  
E-Mail:  
joerg.riedel@ptb.de

# Magnetische Felder von Mikro- und Nanostrukturen

Die PTB hat gemeinsam mit der Universität Göttingen ein Verfahren entwickelt, um die Magnetisierung und das Magnetfeld kleinster Strukturen quantitativ und rückgeführt zu bestimmen. Dies wird – in Kombination mit einer magnetooptischen Methode – erstmals rückgeführte magnetische Messungen auch mit der räumlich extrem hoch auflösenden Magnetkraftmikroskopie ermöglichen.

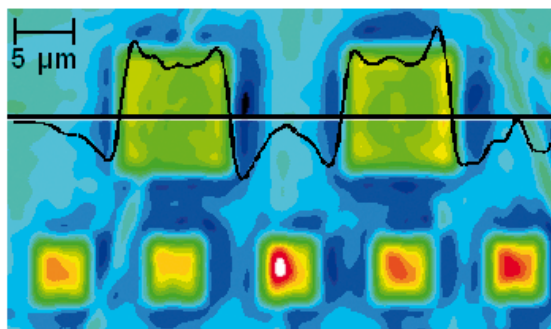
Die magnetischen Streufelder mikroskopischer Strukturen, die größer als etwa 300 nm sind, kann man mit der indikatorgestützten Magnetooptik (MOIF) bestimmen. Dabei wird die Rückführung gewährleistet, indem das Messsignal anhand bekannter makroskaliger Felder kalibriert wird. Um die Magnetisierungsverteilung der Proben daraus zu bestimmen, muss man das gemessene Streufeld mathematisch invertieren. Für dieses Problem, das im Allgemeinen keine eindeutige Lösung hat, war bisher nur für den Spezialfall einer Magnetisierung senkrecht zur Probenebene eine Lösung bekannt. Nun wurde erstmals auch für Magnetisierungen in der Probenebene ein eindeutiges Inversionsverfahren entwickelt.

Sind die Strukturen kleiner als 300 nm, kommt ein streufeldsensitives Magnetkraftmikroskop (MFM) mit einer Auflösung von einigen 10 nm zum Einsatz. Quantitative Streufeldwerte liefert es jedoch nur, wenn seine Übertragungsfunktion mit Referenzproben bekannten Streufeldes bestimmt wurde. Solche Proben auf Basis hartmagnetischer FePt-Filme

wurden in der PTB hergestellt. Mittels Elektronenstrahlolithographie wurden darauf Teststrukturen unterschiedlicher Form und Größe erzeugt. Aus ihrer Streufeldverteilung – mittels MOIF an entsprechend großen Strukturen gemessen – lässt sich mit der neuen Inversionsmethode die Magnetisierung bestimmen. Daraus kann man wiederum das Streufeld in der Messhöhe der MFM-Tastspitze berechnen und das MFM so kalibrieren.

Mit der nun bekannten, von der Strukturgröße unabhängigen Übertragungsfunktion lassen sich mit dem MFM auch die Streufelder kleinerer Strukturen quantitativ und rückgeführt messen. Eine erneute Anwendung der entwickelten Inversionsverfahren rekonstruiert daraus schließlich wieder die Magnetisierungsverteilungen, diesmal aber bei einer MFM-typischen Ortsauflösung im Nanometerbereich.

*Weitergehende Informationen von S. Sievers, Tel.: (05 31) 592-14 14, E-Mail: sibylle.sievers@ptb.de*



*Optisch ermittelte Magnetisierungsverteilung von FePt-Quadern in Falschfarbendarstellung und ein Magnetisierungsprofil einer ca. 10 µm großen Struktur.*

## Mausklick in die Welt der Schwere

**Auf den Webseiten der PTB ist eine neue Auskunftsplattform eingerichtet worden, auf der sich Interessenten aus Physik und Industrie über die lokale Intensität des Schwerfeldes der Erde, bezogen auf den jeweiligen Anwendungsort, informieren können.**

Moderne elektronische Waagen werden heute in überwiegender Zahl ohne Kompensationsgewichte eingesetzt und müssen für ihren jeweiligen Anwendungsort auf den lokalen Einfluss des Schwerfeldes der Erde eingestellt werden. Neben dem traditionellen Verfahren, den „richtigen“ Anzeigewert mit Hilfe von Justiergewichten am Einsatzort einzustellen, kann auch bereits beim Hersteller eine rechnerische Korrektur des Wägewertes unter Berücksichtigung der gültigen Fallbeschleunigung am Einsatzort vorgenommen werden.

Mit dem in der PTB entwickelten Schwere-Informationssystem (SIS) wird ein einfaches, graphisch unterstütztes Hilfsmittel für die Berechnung von Schwerewerten (Fallbeschleunigung) weltweit zur Verfügung gestellt, das sich in seiner Handhabung an den aus dem Internet bekannten Routenplannern orientiert. Ein interaktiver Kartenteil auf der Grundlage einer digitalen Atlasdatenbank ermöglicht mit Hilfe weniger Kartensteuerungselemente

die Darstellung beliebiger Kartenausschnitte der Erde und thematischer Kartenhintergründe des Schwerfeldes. Die Ausgabe eines ortsbezogenen Schwerewertes oder einer Schwereanomalie kann durch Eingabe eines Ortsnamens, der Ortskoordinaten (geographische Länge, Breite, Höhe) oder durch einen Mausclick in die Karte erzeugt werden.

Als Datengrundlage dient ein vierstufiges Schweredatenmodell, das sich hauptsächlich aus frei verfügbaren, sekundären, das heißt abgeleiteten Schwerfeldgrößen zusammensetzt. Ausgehend von einem globalen Geopotentialmodell, das eine weltweite Überdeckung sicherstellt, werden regional höher aufgelöste Datensätze zur Verdichtung eingesetzt. Für die Ableitung von punktuellen Schwerewerten wird unter Einbeziehung eines globalen Höhenmodells ein Reduktionsverfahren auf Meeresniveau eingesetzt, um auf einer mathematisch schwach gekrümmten Fläche mit Hilfe eines geostatistischen Interpolationsansatzes relative Unsicherheiten von bis zu  $< 10^{-6}$ , mindestens aber  $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ , ermitteln zu können. Damit werden die Anforderungen eines sehr großen Teils metrologischer Anwendungen im Einfluss des Schwe-

*Fortsetzung auf Seite 4*

*Weitergehende Informationen von A. Lindau, Tel.: (05 31) 592-11 86, E-Mail: andreas.lindau@ptb.de*

refeldes erfüllt, ohne dass lokale gravimetrische Messungen erforderlich sind.

In der Wägetechnik ist es darüber hinaus von Vorteil, wenn für den zur Kalibrierung verwendeten Schwerewert am Aufstellungsort ein räumlich ausgedehnter Gültigkeitsbereich definiert ist. Dieser Bereich, die so genannte Schwerezone, kann mithilfe des SIS in Abhängigkeit von dem einzusetzenden Waagentyp berechnet und in einem vorgewählten Kartenausschnitt dargestellt werden. Darüber hinaus können weitere thematische Darstellungen des Schwerefeldes als abgestufte Farbbilder in Kombination mit erläuternden Isolinien in der Kartensektion aufgerufen werden.



Das Schwere-Informationssystem ist auf den PTB-Webseiten zu finden unter: Abteilung 1 > Fachbereich 1.1 > Schwere-Informationssystem (SIS).

## Hochgenaue Längenmesstechnik

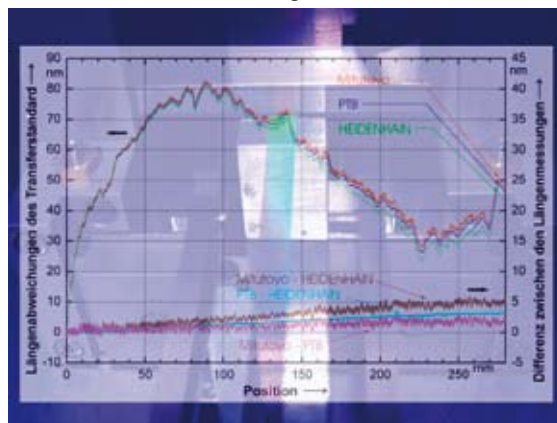
In der Präzisionsfertigung werden immer höhere Anforderungen an die Genauigkeit der verwendeten Längenmesssysteme gestellt. Der Nanometerkomparator, die Normal-Messeinrichtung der PTB für Längenteilungen sowie für hierauf basierende inkrementale Längenmesssysteme, hat jüngst maßgeblich zu einem wesentlichen Fortschritt in der Präzisions-Längenmesstechnik beigetragen.

In verschiedenen Bereichen industrieller Produktion müssen die eingesetzten Bearbeitungsmaschinen außerordentlich exakt positionieren – bis hin zu Genauigkeiten von wenigen Nanometern. Beispiele hierfür sind die zur lithographischen Herstellung integrierter Schaltkreise eingesetzten Belichtungsmaschinen (Wafer-Stepper) oder die zur ultrapräzisen Oberflächenbearbeitung verwendeten Diamant-Drehmaschinen.

Um die geforderten Positioniergenauigkeiten und -linearitäten erfüllen zu können, müssen die Messabweichungen der im Fertigungsprozess eingesetzten Längenmesssysteme mit sehr geringer Unsicherheit bestimmt werden. Für die Überprüfung derartiger Längenmesssysteme, sind die üblicherweise eingesetzten interferometrischen Messverfahren mit Lichtausbreitung in Luft nicht präzise genug. Bei dem in Kooperation mit der Dr. Johannes Heidenhain GmbH entwickelten Nanometerkomparator wird daher die interferometrische Längenmessung komplett unter Vakuumbedingungen realisiert. Ähnliche unter Vakuumbedingungen betriebene Längenkomparatoren für größere Messlängen sind zurzeit an keinem anderen Metrologieinstitut vorhanden. Allerdings verfügen zwei Unternehmen, die u. a. inkrementale Längenmesssysteme herstellen, die Firma Heidenhain selbst sowie die Mitutoyo Corporation in Japan, ebenfalls über Vakuum-Längenkomparatoren.

In einem kürzlich abgeschlossenen Vergleich der drei Vakuum-Längenkomparatoren an einem als Transfornormal verwendeten inkrementalen Längenmesssystem wurde über eine Strecke von insgesamt 280 mm eine Übereinstimmung der Längenmessergebnisse von 5,5 nm erreicht. Das entspricht einer relativen Übereinstimmung von besser als  $2 \cdot 10^{-8}$ . Diese ist um mindestens einen Faktor 5 besser als bei vorhergehenden Längenmaßvergleichen, bei denen die Interferometer in Luft betrieben wurden.

Das Ergebnis dokumentiert die aktuelle Leistungsfähigkeit der beteiligten Vakuum-Längenkomparatoren. Die künftig noch steigenden Anforderungen an die Präzision industrieller Längen- und Koordinatenmessungen, etwa bei der bevorstehenden Einführung von Doppelbelichtungsverfahren in der 193-nm-Lithographie, legen eine zielgerichtete Weiterentwicklung des Nanometerkomparators nahe. Mit den entsprechenden Arbeiten wurde bereits begonnen.



Messergebnisse der drei Vakuum-Interferenzkomparatoren an dem als Transfornormal eingesetzten inkrementalen Längenmesssystem LIP 382 (Hintergrund: Transfornormal auf Nanometerkomparator).

PTBnews 07.2  
Deutsche Ausgabe  
August 2007  
ISSN 1611-1621

Herausgegeben von der  
Physikalisch-Technischen  
Bundesanstalt (PTB)  
Braunschweig und Berlin

Chefredakteur Jens Simon  
PTB, Bundesallee 100  
38116 Braunschweig  
Telefon: (05 31) 592-30 06  
Fax: (05 31) 592-30 08  
E-Mail: [ptbnews@ptb.de](mailto:ptbnews@ptb.de)  
Webseite: <http://www.ptb.de>

Weitergehende Informationen von R. Köning,  
Tel.: (05 31) 592-52 51,  
E-Mail:  
[rainer.koenig@ptb.de](mailto:rainer.koenig@ptb.de)

## Auszeichnung für Fritz Riehle

Dr. Fritz Riehle, Leiter der Abteilung Optik in der PTB, hat am 29. Mai den diesjährigen „Time and Frequency Award of the Société Française des Microtechniques et de Chronométrie“ bekommen. Damit wird Riehles wissenschaftliche Tätigkeit auf dem Gebiet Frequenz und Zeit gewürdigt. Herzlichen Glückwunsch!