

Kalibrierung großer Koordinatenmessgeräte

In der Automobil- und Luftfahrtindustrie werden zur Qualitätssicherung große Koordinatenmessgeräte eingesetzt. Um diese Geräte zu überwachen und zu kalibrieren, ist ein Verfahren entwickelt worden, das auf dem aus der Geodäsie bekannten Multilaterationsprinzip basiert. Es erfüllt die gestiegenen Genauigkeitsanforderungen und kommt vor allem ohne Prüfkörper wie zum Beispiel Kugelplatten aus.

Kleine und mittelgroße Koordinatenmessgeräte (KMG) mit Messvolumina unter 1 m^3 können gut mit Hilfe der Kugelplattenmethode überwacht und kalibriert werden. Dabei werden kalibrierte Kugelplatten in verschiedenen Stellungen im Messvolumen des KMG gemessen. Aus dem Vergleich der gemessenen mit den kalibrierten Positionen der Kugeln können sämtliche Fehlerparameter berechnet werden.

Für große KMG mit Achslängen von zwei und mehr Metern sind jedoch Platten in der erforderlichen Größe nicht mehr handhabbar. Das jetzt von der PTB entwickelte Verfahren kommt ohne körperlich vorhandene Normale aus. Die Prüfung erfolgt mit einer „virtuellen Platte“, die auf dem KMG aus einer Vielzahl von interferometrischen Abstandsmessungen erstellt wird.

Dabei wird eine spezielle optische Reflektoreinheit, die anstelle des Tastkopfes am KMG angebracht ist, an bestimmte vordefinierte Positionen innerhalb einer Ebene verfahren. Ein automatisch nachführendes Laserinterferometer (Lasertracker) misst den Abstand zur Reflektoreinheit nacheinander von vier verschiedenen Positionen aus (daher: Multilaterations-Verfahren). Aus den vier Bündeln von Längenmessungen errechnet eine spezielle Software ein zweidimensionales Referenzraster. Es ähnelt einer sehr großen Kugelplatte: Durch Vergleich mit den angezeigten Positionen können die Abweichungen des KMG ermittelt werden. Weil bei dem

Auswerteprinzip ausschließlich das interferometrische Abstandssignal des Lasertrackers genutzt wird, kann eine sehr hohe Genauigkeit erreicht werden. Unter guten Umgebungsbedingungen wurden bei KMG mit einem Messvolumen von $5 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ Positionsabweichungen mit einer Unsicherheit $\leq 10 \text{ }\mu\text{m}$ erreicht.

Das patentierte Verfahren wurde in Zusammenarbeit mit einem deutschen Automobilhersteller erfolgreich erprobt und von einer Braunschweiger Messtechnikfirma für den industriellen Einsatz weiterentwickelt.

Weitergehende Informationen von K. Wendt,

Fax: (05 31) 592-53 05, E-Mail: klaus.wendt@ptb.de



Eine Karosserie auf einem großen Koordinatenmessgerät
(Foto: VW)

Erste Telekalibrierung eines Hochdruck-Gaszählers

Das nationale Normal für Hochdruck-Erdgas mit Namen „pigsar“ steht bei der Ruhrgas AG in Dorsten. Seit kurzem können PTB-Wissenschaftler Kalibrierungen und Zulassungsprüfungen per Telekalibrierung von Braunschweig aus erledigen. Das Verfahren wurde während einer internationalen Tagung in Washington mit einer Live-Schaltung zu „pigsar“ demonstriert.

Die Kalibrierung von Großgaszählern wie Ultraschall- oder Turbinenradgaszähler mit Hochdruck-Erdgas erfordert einen großen technischen Aufwand. Daher gibt es weltweit nur wenige Prüfstände. Der größte dieser Prüf-

stände (nach Umfang und Messmöglichkeiten) heißt „pigsar“ und wird von der Ruhrgas AG in Dorsten betrieben. Diese staatlich anerkannte Prüfstelle führt Eichungen von Gaszählern durch und ist als DKD-Labor tätig. Seit 1999 nutzt die PTB den Prüfstand auf vertraglich geregelter Basis als nationales Normal zur Darstellung und Weitergabe der Einheiten Volumen und Durchfluss strömenden Gases unter Hochdruckbedingungen.

Da „pigsar“ etwa 300 km von Braunschweig entfernt ist, wurde nach einer Möglichkeit gesucht, die Prüfungen aus der Ferne zu überwachen und zu steuern und dennoch die strengen Vorgaben des gesetzlichen Mess-

Fortsetzung auf Seite 2

Erste Telekalibrierung eines Hochdruck-Gaszählers

(Fortsetzung von Seite 1)

wesens zu erfüllen. Über eine ISDN-Verbindung haben die Mitarbeiter der PTB Zugang zur Datenbank des Prüfstands, können sämtliche Prüflingsdaten, Messbedingungen und Parameter einsehen und den Prüfablauf online verfolgen. Bei Bedarf ist es auch möglich, in den Prüfungsablauf einzugreifen und diesen zu steuern. Die Parameter und Prüfergebnisse können grafisch und tabellarisch dargestellt werden. Der erforderliche Datenaustausch erfolgt auf hohem Sicherheitsniveau.

Auf dem 5th International Symposium for Fluid Flow Measurements in Washington im April 2002 wurde die Telekalibrierung eines Gaszählers bei „pigsar“ online demonstriert. Neben der Vorführung der Software gab es gleichzeitig eine TV-Liveschaltung zu „pigsar“, um den Konferenzteilnehmern einen Eindruck vom Ablauf der Kalibrierungen vor Ort zu verschaffen. Es war weltweit das erste Mal, dass im Flow-Bereich ein derartiges Experiment erfolgreich durchgeführt wurde.



Ein Teil des pigsar-Teams während der Telekalibrierung. Im Vordergrund der kalibrierte Gaszähler.

Weitergehende Informationen von R. Kramer
Fax: (05 31) 592-13 05,
E-Mail:
rainer.kramer@ptb.de

Charakterisierung von Grenzflächen mit Röntgenstreuung

Die an den Grenzflächen von Multilayern gestreute Röntgenstrahlung trägt charakteristische Informationen über das Schichtsystem: Der morphologische Aufbau der Grenzflächen, die sich zwischen den Schichten ausbilden, lässt sich aus der gestreuten Strahlung ermitteln. Die PTB hat hierzu im Rahmen eines Projekts zur Untersuchung von Grenzflächen einen entsprechenden Messplatz aufgebaut, mit dem Geometrien von wenigen Nanometern bis zu etwa 100 nm analysiert werden können. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind von prinzipiellem Interesse im Bereich der Oberflächenbeschichtung sowie der Fabrikation nanostrukturierter Systeme.

Zweierlei ist bei den zu untersuchenden Proben von Interesse: Zum einen die vordringlich technologisch orientierte Messung von Schichtdicken, zum anderen die morphologischen Parameter der Grenzflächen wie Rauigkeiten und Korrelationslängen.

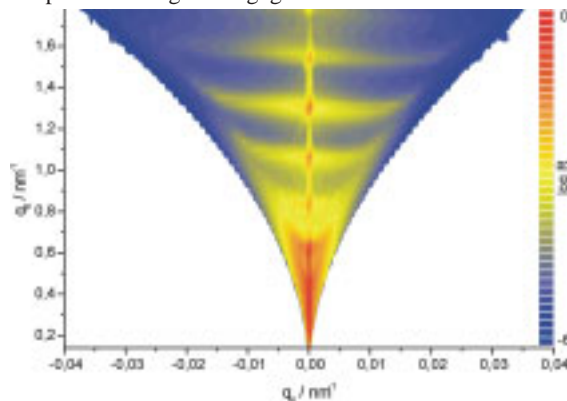
Die Schichtdicken lassen sich bestimmen, indem die Interferenzen der an den Grenzflächen spekulär reflektierten Teilstrahlen ausgewertet werden. Hierzu sind computergestützte Simulationsmodelle der Proben unerlässlich. Die erreichbaren Unsicherheiten bewegen sich, abhängig von der Schichtdicke und den Probenmaterialien, im Subnanometerbereich.

Den morphologischen Aufbau der Grenzflächen zwischen den Schichten verrät die Messung und Analyse der diffusen Streuung. Die charakteristischen Parameter (Rauigkeit, vertikale und laterale Korrelationslänge, Hurst-Exponent) werden durch ein komplexes Computermodell der Streuung extrahiert. Bei der Analyse der diffus gestreuten Anteile stehen grundlegende Fragestellungen zu Wachstumsmodellen und der Ausbildung von Festkörpergrenzflächen im Vordergrund.

Wichtigster Bestandteil im experimentellen Aufbau ist eine Drehanode hoher Leistung. Erst durch sie wird ein großer dynamischer Bereich der gestreuten Strahlung

und damit eine hohe Messgenauigkeit für die Dickenmessung erzielt. Um die diffus gestreuten Anteile mit hinreichender Auflösung zu messen, ist zugleich ein Röntgenstrahl hoher Strahlqualität, d. h. hoher Parallelität und Monochromasie, notwendig. Dieser wird durch einen an die Drehanode angeschlossene Optik aus dem zunächst divergenten Strahl erzeugt. Das eingesetzte Goniometer kontrolliert den Einfallswinkel und Ausfallswinkel unabhängig voneinander, mit einer Genauigkeit von einem Hundertstel Grad, in einem Bereich bis zu 5 Grad in Bezug auf die Probenoberfläche.

Im Rahmen des Projekts wird mit der Röntgenreflektometrie eine neue Methode der zertifizierten Schichtdickenmessung vorangetrieben. Darüber hinaus werden neue Impulse für die Methodik bei der Messung nanoskopischer Rauigkeiten gegeben.



Gestreuete Intensität eines GaAs/AlAs-Multilayers im reziproken Raum. Sie ist farbcodiert über den x- und z-Komponenten des Streuvektors q aufgetragen. Die bananenförmigen Intensitätsmaxima deuten auf eine starke Korrelation der Grenzflächenrauigkeit hin.

Weitergehende Informationen von J. Stümpel,
Fax: (05 31) 592-60 15,
E-Mail: juergen.stuempel@ptb.de

Konzepte für den Quanten-Computer

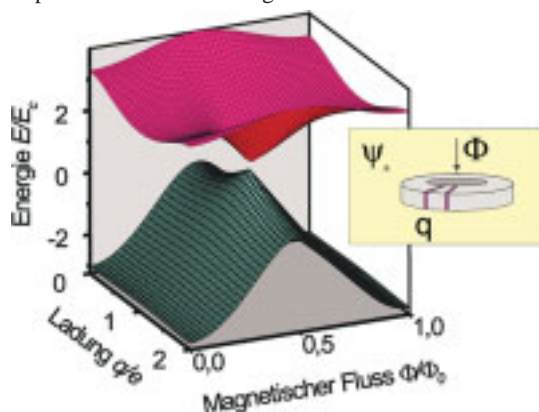
Mit Quantenzuständen rechnen – eine faszinierende Idee, die noch einen weiten Weg bis zur Praxis vor sich hat. Einen Schritt dorthin leistet ein jetzt in der PTB entwickeltes Konzept, welches auf einem neuartigen Bauelement basiert. Die logische Grundeinheit, das Quanten-Bit (Qubit), ist dabei auf einem supra-leitenden Ring lokalisiert. Das Besondere: Das Qubit ist störunanfällig und sein Zustand lässt sich leicht auslesen.

Quantencomputer wollen ausnutzen, dass in der Quantenwelt die klassische Logik ausgeschaltet ist: Während ein klassisches Bit entweder den Wert Null oder Eins besitzt, befindet sich ein Qubit in einer kohärenten Überlagerung beider Zustände. Rechenschritte, die im klassischen Fall sequentiell erfolgen müssen, könnte ein Quantencomputer, dank der Qubits, in einer einzigen Operation ausführen. Spezielle Aufgaben, wie das Faktorisieren großer Zahlen in Primzahlen, wären überhaupt erst auf diese Weise lösbar. Seit einigen Jahren sind auch supraleitende Schaltungen für derartige Qubits im Gespräch. In ihnen können quantenmechanische Effekte (durch die Bose-Einstein-Kondensation der Ladungsträger, d. h. der Cooper-Paare) auf einer makroskopischen Skala auftreten. Das Verhalten des makroskopischen Systems wird dabei von einer Schrödinger-Wellenfunktion bestimmt, die nur von wenigen kollektiven Variablen abhängt.

Das neu konzipierte Bauelement fußt auf Erfahrungen und Erkenntnissen, die in der PTB bei der Entwicklung von Quantennormalen für die elektrischen Einheiten gewonnen wurden. Es besteht aus einem supraleitenden Ring mit zwei eng benachbarten Josephson-Tunnelbarrieren von weniger als $0,01 \mu\text{m}^2$ Fläche. Der Ring ist der Träger des Qubits. Selbst bei einem Durchmesser des Rings von ca. 1 mm sind seine Zustände quantisiert und

hängen nur von der auf der Insel induzierten Ladung q und dem magnetischen Fluss Φ durch den Ring ab. Auf der Basis der zwei Zustände niedrigster Energie können die Zustände „Null“, „Eins“ und kohärente Mischzustände, die eigentlichen Qubits, daraus gebildet werden. Gesteuert wird das Qubit über die beiden elektrischen Parameter Ladung q und Fluss Φ .

Die besonderen Eigenschaften dieses Qubits sind seine geringe Anfälligkeit gegenüber elektrischen Störeinflüssen sowie die Möglichkeit, den Zustand fast ohne Verlust der Kohärenz auszulesen. Zum Auslesen kann zum Beispiel die Änderung der Resonanzfrequenz eines induktiv angekoppelten Schwingkreises bestimmt werden. Konzeptionell ist das Qubit damit eingefangen. Die experimentelle Umsetzung ist der nächste Schritt.



Berechnete Energieeigenwerte des supraleitenden Qubits (schematisch im kleinen Bild) in Abhängigkeit von der Inselladung q und dem magnetischen Fluss Φ durch den Ring. E_c ist die Ladungsenergie der Insel. Ein schneller Transfer des Systems vom „Eckzustand“ (Ladung und Fluss gleich 0) in die Mitte der Energieflächen hinein führt zu ausgeprägten Oszillationen in der Entwicklung der Zustände – in dieser dynamischen Situation wird das Qubit aktiv.

Weitergehende Informationen von A. Zorin
Fax: (05 31) 592-22 95,
E-Mail:
alexander.zorin@ptb.de

Anforderungen an Kältezähler

Verschiedene Versorgungsunternehmen bieten neben der Wärme zum Heizen auch „Kälte“ für die Klimatechnik an. Wegen der zunehmenden wirtschaftlichen Bedeutung der „Kälte Dienstleistung“ wird die europäische Norm für Wärmezähler um Anforderungen an Kältezähler ergänzt. Grundlage dafür waren messtechnische Untersuchungen in der PTB.

Eine Klimaanlage soll in erster Linie die Umgebungsluft abkühlen. Dazu entzieht sie thermische Energie und „liefert Kälte“. Kältezähler, die diese thermische Energie ermitteln, unterscheiden sich nicht grundsätzlich von Wärmezählern. Darum gilt in beiden Fällen die europäische Norm EN 1434 vom April 1997, die bisher nur Anforderungen an Wärmezähler enthielt. Kältezähler arbeiten jedoch in einem gegenüber Wärmezählern deutlich eingeschränkten Temperaturbereich von $3 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und bei kleineren Temperaturdifferenzen von höchstens 20 K. Die jetzt formulierten Anforderungen an Kältezähler (für den Wärmeträger Wasser) sollen die Norm entsprechend ergänzen, wobei nicht zwischen Geräten der Komfort- und der Industrie-Klimatechnik unterschieden wird.

Bei den Prüfungen zur Bauartzulassung muss jeder zum Kältezähler gehörige Durchflusssensor wenigstens bei einer Wassertemperatur von $(15 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ untersucht werden; bei mechanischen Geräten sind zusätzliche Un-



Haushalts-Kältezähler mit einem im Auslaufstutzen des Durchflusssensors integrierten Temperaturfühler.

Fortsetzung auf Seite 4

Anforderungen an Kältezähler

(Fortsetzung von Seite 3)

tersuchungen bei $(5 \pm 1)^\circ\text{C}$ vorgeschrieben.

Wenn Kältezähler ähnlich große Mengen an ausgetauschter thermischer Energie erfassen sollen wie Wärmehändler, benötigen sie wegen der kleineren Temperaturdifferenzen Durchflusssensoren, die für große Volumenströme ausgelegt sind. Für die Prüfungen hält die PTB deshalb Messeinrichtungen für Wasser-Durchflüsse bis zu $1000\text{ m}^3/\text{h}$ und für Temperaturen bis hinab zu 3°C bereit.

Oftmals arbeiten Klimaanlage lediglich in Teillastbereichen bei geringen Temperaturdifferenzen bis hinab zu 2 K . Um die Temperaturfühlerpaare der Kältezähler messtechnisch beurteilen zu können, sind Prüfeinrichtungen mit sehr kleinen Messunsicherheiten erforderlich. Auch diese Einrichtungen sind in der PTB verfügbar.

Weitergehende Informationen von D. Stuck

Fax: (030) 34 81-490, E-Mail: dieter.stuck@ptb.de

Neuer Tieftemperatur-Fixpunkt

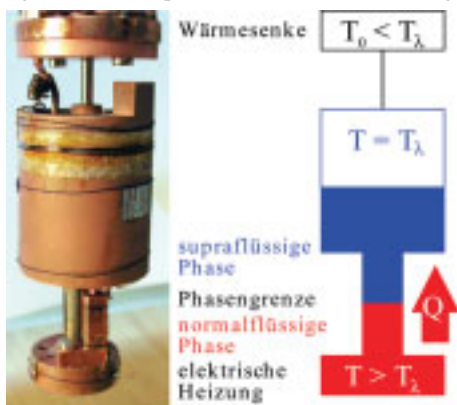
In dem auch technisch wichtigen Bereich der Flüssig-Helium-Temperaturen von $1,5\text{ K}$ bis 4 K war die erforderliche Stabilitätskontrolle von Thermometern bisher ein aufwändiges Unterfangen. Mit der Lambdapunktzelle hat die PTB jetzt einen einfach handhabbaren Temperaturfixpunkt entwickelt, der vielen Anwendern die Durchführung von Kontrollmessungen ermöglichen wird.

Der Flüssig-Helium-Bereich tiefer Temperaturen ist nicht mehr nur für festkörperphysikalische und Materialuntersuchungen von Interesse, sondern auch für technische Anwendungen wie die Kühlung der supraleitenden Magnete von Kernspintomographen oder Teilchenbeschleunigern. Damit steigt auch der Bedarf an zuverlässigen Tieftemperaturmessungen. Bei mittleren und hohen Genauigkeitsanforderungen ist allerdings die Langzeitstabilität der verfügbaren Thermometer i. a. nicht ausreichend, so dass eine regelmäßige Stabilitätskontrolle erfolgen muss. Hierfür werden Temperaturfixpunkte auf der Basis wohldefinierter Phasenübergangstemperaturen geeigneter Stoffe eingesetzt. Für die Flüssig-Helium-Temperaturen von $1,5\text{ K}$ bis 4 K gab es bis-

her jedoch nur Fixpunkte, die aufwändige Messungen anderer physikalischer Größen erforderten, etwa des Dampfdrucks.

Im Rahmen eines EU-Projekts wurde jetzt eine für den breiten Einsatz einfach handhabbare, kompakte Lambdapunktzelle entwickelt und untersucht. Am Lambdapunkt bei $T_\lambda = 2,1768\text{ K}$ geht die Quantenflüssigkeit ^4He vom supraflüssigen in den normalflüssigen Zustand über. Dies ist allerdings ein Phasenübergang zweiter Ordnung, bei dem keine latente Wärme wie bei Schmelzpunkten auftritt, die zur Temperaturstabilisierung genutzt werden könnte. Mit der neuen Zelle gelingt es dennoch, den Lambdapunkt als Fixpunkt zu nutzen. Dazu wird die Zelle durch Kühlung einer oberen Wärmesenke zunächst auf knapp unter T_λ abgekühlt und dann eine untere Kupferscheibe elektrisch auf knapp über T_λ aufgeheizt. Im Innern bildet sich dann eine Phasengrenze zwischen normalflüssigem (unten) und supraflüssigem (oben) ^4He . Der Wärmestrom Q kann so eingestellt werden, dass über lange Zeit stationäre Verhältnisse vorliegen, wenn die obere Wärmesenke ausreichende Standzeit aufweist. Durch die extrem hohe Wärmeleitfähigkeit der supraflüssigen Phase hat das Kupfervolumen der eigentlichen Zelle praktisch die Temperatur T_λ der Phasengrenze. In Tests konnte die Temperatur bereits bis zu 18 Stunden auf wenige μK stabil gehalten werden, wobei ein handelsüblicher Messeinsatz für Heliumtransportgefäße verwendet wurde.

Die neue Lambdapunktzelle gestattet es so, mit einfachen, vielen Anwendern zugänglichen Mitteln ideale Bedingungen zur Überprüfung der Stabilität von Thermometern zu realisieren. Dabei wird ein Unsicherheitsniveau erreicht, das auch den Einsatz der Zelle für die Darstellung der Internationalen Temperaturskala möglich erscheinen lässt.



PTBnews 02.2
Deutsche Ausgabe
August 2002

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

Weitergehende Informationen von J. Engert,
Fax: (030) 348-14 90,
E-Mail:
jost.engert@ptb.de

Helmholtz-Preis 2003

Im Sommer 2003 wird der mit einer Urkunde und 15 000 Euro dotierte Helmholtz-Preis auf den Fachgebieten Präzisionsmessung in Physik, Chemie und Medizin vergeben. Die Bewerbungsfrist läuft noch bis zum 15. Dezember 2002.

Erstmals richtet sich der Preis an Wissenschaftler aus dem gesamten europäischen Raum. Bei der nun bis zum 15. Dezember einzureichenden Arbeit muss es sich um ein aktuelles Forschungsergebnis aus Theorie oder Experiment handeln, das entweder einen Grundlagenbei-

trag leistet oder auf konkrete Anwendungen zielt. Die Arbeit muss dabei im europäischen Raum oder in Kooperation mit Wissenschaftlern, die in Deutschland arbeiten, entstanden sein. Um am Wettbewerb teilzunehmen, ist die Bewerbung an den Vorsitz der Helmholtz-Fonds e. V., Prof. Dr. E. O. Göbel, Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig zu richten.

Weitere Informationen: <http://www.helmholtz-fonds.de>