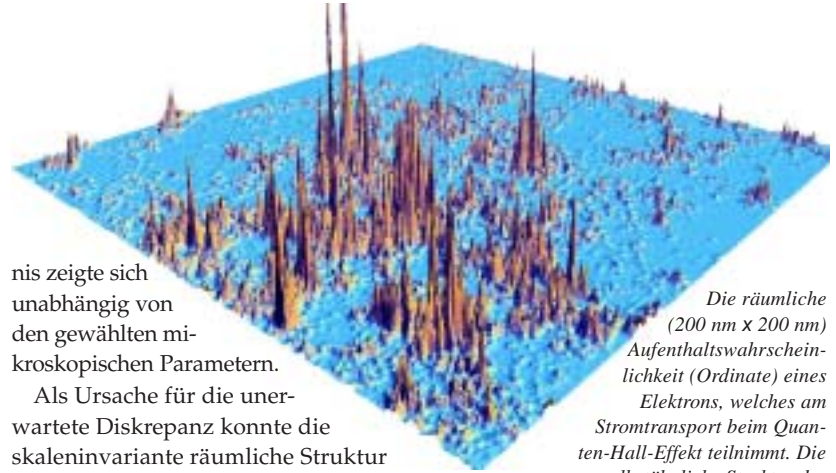


Universeller Leitwert an quantenkritischen Punkten

Für den dissipativen elektrischen Transport in Quanten-Hall-Systemen konnte ein quantitativer Zusammenhang mit den multifraktalen elektronischen Eigenzuständen hergestellt werden. Quantenmechanische Modellrechnungen ergaben einen universellen Leitwert.

Die Darstellung der elektrischen Widerstandseinheit Ohm wird in der PTB mit hoher Präzision durch den Quanten-Hall-Effekt realisiert. Dabei treibt man einen elektrischen Strom durch die Grenzfläche einer aus Halbleiterschichten gefertigten Probe, die sich bei tiefen Temperaturen in einem starken Magnetfeld befindet. Der Quotient aus dem durch die Probe fließenden Strom und der quer zur Stromrichtung gemessenen Hall-Spannung definiert den quantisierten Hall-Widerstand. Dieser ist allein durch das Verhältnis von Planck-Konstante h und der Elementarladung e sowie einer ganzen Zahl bestimmt. Der parallel zum Stromfluss abgegriffene Leitwert spielt derzeit für die metrologische Anwendung keine Rolle, ist aber für das Verständnis des Quanten-Hall-Effekts als auch für die allgemeine Theorie der Quanten-Phasenübergänge von großer Bedeutung.

Bislang war $\frac{1}{2} e^2/h$ für die nur an den Stufen der quantisierten Hall-Plateaus auftretenden Maxima des Längsleitwertes vorhergesagt worden, was auch durch frühere Experimente gestützt wurde. Allerdings ergaben neuere quantenmechanische Modellrechnungen sowohl für den Zweipunkt-Leitwert als auch für die longitudinale Leitfähigkeit einen universellen Wert von $0,6 e^2/h$. Dieses Ergeb-



Die räumliche (200 nm x 200 nm) Aufenthaltswahrscheinlichkeit (Ordinate) eines Elektrons, welches am Stromtransport beim Quanten-Hall-Effekt teilnimmt. Die selbstähnliche Struktur der fraktalen Landschaft bestimmt den universellen Leitwert.

nis zeigte sich unabhängig von den gewählten mikroskopischen Parametern.

Als Ursache für die unerwartete Diskrepanz konnte die skaleninvariante räumliche Struktur der elektronischen Wellenfunktion bei speziellen Energien, den so genannten quantenkritischen Punkten, dingfest gemacht werden. Obwohl deren multifraktale Eigenschaften schon seit einiger Zeit bekannt waren, konnte erst jetzt ein Zusammenhang zwischen dem experimentell zugänglichen Leitwert und den theoretisch berechneten fraktalen Dimensionen quantitativ hergestellt werden. Dieser neue Befund wurde ebenfalls für den kritischen Leitwert am Metall-Isolator Übergang von zweidimensionalen ungeordneten Systemen mit Spin-Orbit-Wechselwirkung bestätigt. Letztere werden derzeit verstärkt im Zusammenhang mit Spintronic-Anwendungen untersucht. Die Verknüpfung zwischen kritischem Leitwert und den fraktalen Dimensionen scheint eine universelle Eigenschaft von Quanten-Phasenübergängen zu sein.

Weitergehende Informationen von
L. Schweitzer
Tel.: (05 31) 592-81 24
E-Mail:
ludwig.schweitzer@ptb.de

Wärmemengen dynamisch wägen

Industrielle Durchflussmessungen zum Beispiel bei der Fernwärme- und Kälteversorgung werden in der Regel auf Wägungen und Zeitbestimmungen zurückgeführt. Im für industrielle Anwendungen besonders wichtigen Volumenstrombereich unterhalb von $200 \text{ m}^3/\text{h}$ ist hierfür an der neuen Volumenstrom-Normalmessanlage für Wärme- und Kältezähler der PTB ein dynamisches Wägeverfahren entwickelt worden, das im Vergleich zum bisher üblichen statischen Wägeverfahren erheblich weniger technischen Aufwand und Messzeit erfordert. Bei der Wärmemengenbestimmung muss zusätzlich die Temperatur präzise stabilisiert und gemessen werden.

Beim statischen Wägen wird der auf konstanten Durchfluss und konstante Temperatur geregelte Volumenstrom mit Hilfe einer komplizierten Umschalteinrichtung für eine bestimmte Zeitdauer in

den Wägebehälter geleitet und die Füllmenge gewogen. Da große Volumenströme mit einer Unsicherheit von Millisekunden umgelenkt werden müssen, dominiert der Unsicherheitsbeitrag der Zeitmessung die Gesamtmessunsicherheit der Anlage. Darüber hinaus sind derartige Umschalteinrichtungen technisch sehr aufwändig, reparaturanfällig und – abhängig von der Bauart – nicht rückwirkungsfrei.

Beim dynamischen Wägeverfahren durchströmt das Wasser ohne Umschalteinrichtung den Wägebehälter. Dabei ist die Waage mit Normalgewichten vorbelastet. Bei Erreichen eines vorgewählten Anfangsfüllstands beginnt die Messung. Im weiteren Verlauf werden die Normalgewichte mit zunehmender Füllung von der Waage abgenommen. Die Messung ist beendet und die Fülldauer wird ermittelt, wenn die Anfangstriggerschwelle erneut er-

Fortsetzung auf Seite 2

reicht wird. Dann ist die Masse der abgenommenen Normalgewichte genau durch die Masse des eingelaufenen Fluids substituiert. Vorteile des Messverfahrens sind die technische Einfachheit, die Rückwirkungsfreiheit auf den Volumenstrom und die erhebliche Zeitersparnis, die in Abhängigkeit vom Durchfluss bis zu einem Faktor 2 betragen kann. Da die Waage nur in einem Arbeitspunkt benutzt wird, ist die Kenntnis der Waagekennlinie insgesamt nicht erforderlich. Die während des Füllvorgangs auftretenden Erschütterungen der Waage konnten unter Kontrolle gebracht werden.

Die Gleichwertigkeit beider Messverfahren konnte bisher in einem Volumenstrombereich bis $180 \text{ m}^3/\text{h}$ nachgewiesen werden. Beispielsweise ergab sich bei einer Wassertemperatur von 50°C eine Überstimmung von $0,04\%$, die innerhalb der erweiterten relativen Gesamtmessunsicherheit der Messanlage liegt. Damit steht eine neue und wirtschaftlichere Methode der Bestimmung des Volumenstroms für Wärme- und Kältezähler für die industrielle Anwendung zur Verfügung.



Waage für die gravimetrische Durchflussbestimmung; max. Last: 20 t, Messunsicherheit: 100 g.

Weitergehende Informationen von
Th. Lederer,
Tel.: (030) 34 81-72 30,
E-Mail:
thomas.lederer@ptb.de

Roboter zur Mikromontage

Eine neue Herausforderung des wissenschaftlichen Gerätebaus der PTB ist die Mikromontage miniaturisierter Sensoren und Normale, die in messtechnischen Einrichtungen vorgesehen sind. Hierzu wurde ein zum Patent angemeldeter hochpräziser und universell einsetzbarer Roboter entwickelt, der mit sechs Freiheitsgraden der Bewegung und großen Dreh/Schwenkbereichen Mikroobjekte mit einer Reproduzierbarkeit von unter $1 \mu\text{m}$ positionieren kann.

Marktgängige Mikromontagestationen sind meist hochspezialisiert. Die Kinematik besitzt eine geringe Zahl von Freiheitsgraden der Bewegung oder sie kann nur eingeschränkt Drehungen von Werkzeug zu Objekt im Arbeitsraum ausführen. Die Beobachtung und Steuerung mit einer Kamera gestalten sich zudem schwierig, weil die Kamera mitgeführt werden muss oder kaum in den mechanischen Aufbau zu integrieren ist.



Weitergehende Informationen von R. Meeß,
Fax: (05 31) 592-55 05,
E-Mail:
rudolf.meess@ptb.de

Der neu entwickelte Roboter erlaubt durch die spezielle Anordnung der Achsen Bewegungen von Werkzeug zu Objekt mit 6 Freiheitsgraden in einem zylindrischen Arbeitsraum von 60 mm Durchmesser und 25 mm Höhe. Die möglichen Drehwinkel betragen hierbei je nach Drehachse etwa $\pm 90^\circ$ bzw. $\pm 180^\circ$. Die minimalen Schrittweiten für die Linearbewegungen sind $0,1 \mu\text{m}$ und für die Drehbewegungen kleiner als $1'$. Ein hochpräzises Positionieren von Mikroobjekten, die dabei zusätzlich in großen Bereichen auch orientiert werden können, ist jetzt möglich.

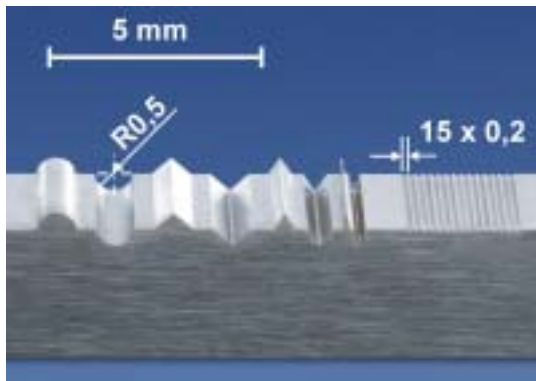
Die kleinen Objekte werden mit ebenfalls selbst entwickelten mechanischen und Unterdruckgreifern manipuliert. Nahezu uneingeschränkt kann dabei ohne Kollisionsgefahr aus zwei senkrechten Projektionen das Geschehen hoch vergrößert und hoch aufgelöst (Pixelgröße ca. $1 \mu\text{m}^2$) verfolgt werden. Die Steuerung der gesamten Anlage erfolgt mit einem PC-basierten System in einer durchgängigen Programmiersprache. Wesentliche Bewegungs- und Greif-Funktionen lassen sich komfortabel mit einem Joystick durchführen. Somit steht eine universell nutzbare Robotik für die unterschiedlichen Aufgaben der Mikromontage mit direkter Ergebniskontrolle und Inspektion zur Verfügung.

Eine interessante Anwendung des neuen Roboters war z. B. die Montage von Tastspitzen für die Rastersondenmikroskopie. Seine Anwendung im Hochvakuum zur REM-Beobachtung von Fügevorgängen steht bevor.

Kleine Welt: Mikro-Prüfkörper

Die Messung von Mikrobautteilen ist eine neue metrologische Herausforderung in der modernen Produktionstechnik. Zur Beurteilung der verwendeten Messsysteme hat die PTB Mikro-Prüfkörper entwickelt, für die je nach Messprinzip eine Kalibrierunsicherheit für Abstände und Radien von bisher 0,5 µm erreicht wurde.

Die Miniaturisierung in der Technik führt zu immer kleineren Bauteilen, wie z. B. Mikro-Zahnradern und mikrooptischen Komponenten mit Merkmalen von unter 0,5 mm bis zu 1 µm. Für die Messung von Mikrobautteilen werden heute optische, taktile und röntgentomographische Mikro-Messsysteme eingesetzt. Deren Prüfung sollte in Anlehnung an akzeptierte Verfahren der Koordinatenmesstechnik (ISO 10360, VDI/VDE 2617) erfolgen, bei denen Prüfkörper verwendet werden. Mikro-Prüfkörper mit geeigneten Abmessungen fehlten bisher.



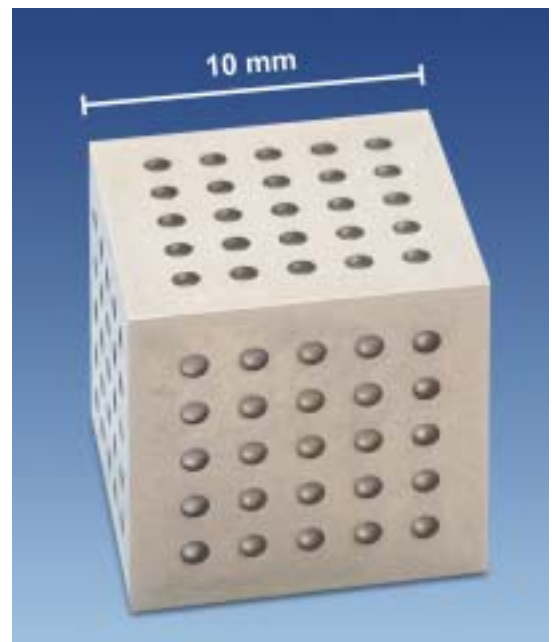
Mikro-Konturnormal aus Edelstahl (Detail). Das Normal ist mit Drahterosion hergestellt und weist verschiedene Radien, Winkel und Abstände auf. Es ist kommerziell erhältlich.

Die PTB hat deshalb verschiedene Mikro-Prüfkörper entwickelt, die für die Antastung mit taktilem und optischen Sensoren „kooperative“ Oberflächen aufweisen bzw. durch ihre Volumeneigenschaften (z. B. Röntgenabsorption) röntgentomographisch messbar sind. Bei der Herstellung der Mikro-Prüfkörper wurden unterschiedliche Fertigungsverfahren wie Draht- und Senkerosion oder

Diamantdrehen eingesetzt. Teilweise mussten die Oberflächen nachträglich z. B. durch Laserbearbeitung strukturiert werden, um messtechnisch geeignete Oberflächen zu erzielen.

Vergleichsmessungen mit verschiedenen taktilen und optischen Mikrosensoren an einem Mikro-Konturnormal ergaben Übereinstimmungen von teilweise besser als 1 µm für Abstände und Radien. Mit der Entwicklung der Mikro-Prüfkörper und der zugehörigen Kalibrierverfahren ist jetzt ein entscheidender Schritt für den qualifizierten Vergleich unterschiedlicher Sensoren und deren Rückführung im Mikrobereich gelungen. Teilweise konnten die Prüfkörper im Rahmen von Firmenkooperationen in die Industrie transferiert werden.

Aufgabe kommender Arbeiten ist eine weitere Miniaturisierung der Prüfkörper und Strukturen sowie die Reduzierung der Kalibrierunsicherheit, um den weiter steigenden Anforderungen an die Prüfung von immer genaueren Messgeräten für immer kleinere Messobjekte gerecht werden zu können. Dabei werden Kalibrierunsicherheiten für taktile und optische Messungen von 0,1 µm und besser angestrebt.



Mikro-Kugelkalottenwürfel aus Titan. Der Würfel ist mit Draht- bzw. Senkerosion hergestellt und hat auf drei Flächen je 5 x 5 Kugelkalotten mit 0,4 mm Radius.

Hochgenaue Chemische Analytik: Ein Optisches Referenzverfahren

Eine neuartige Kombination von oberflächenverstärkter Ramanstreuung und isotoopenmarkierten Standards ermöglicht eine genaue und empfindliche Messung von Stoffmengenkonzentrationen mit optischer Spektroskopie. Die Methode gestattet beispielsweise eine molekülspezifische Konzentrationsbestimmung diagnostischer Marker in komplexen biologischen Substanzen wie z. B. Blutserum.

Methoden der optischen Spektroskopie sind im Bereich der organischen und biochemischen Analy-

tik weit verbreitet. Molekülspezifische Verfahren (IR, Raman) liefern sogar einen „Fingerabdruck“ der untersuchten Probe, sind aber oft nicht empfindlich genug. Eine überragende Signalverstärkung lässt sich jedoch mit Hilfe der oberflächenverstärkten Ramanstreuung (Surface-Enhanced Raman Scattering, SERS) erreichen. Diese wird durch Zusatz von metallischen Nanopartikeln zum Analyten erzielt. Bisher konnte man diesen Vorteil aber metrologisch nicht nutzen, da die Messungen nur unzureichend reproduzierbar waren. Dieses

Weitergehende Informationen von R. Stosch, Tel. (05 31) 592-31 22, E-Mail: rainer.stosch@ptb.de

Weitergehende Informationen von M. Neugebauer, Tel.: (05 31) 592-52 11, E-Mail: michael.neugebauer@ptb.de

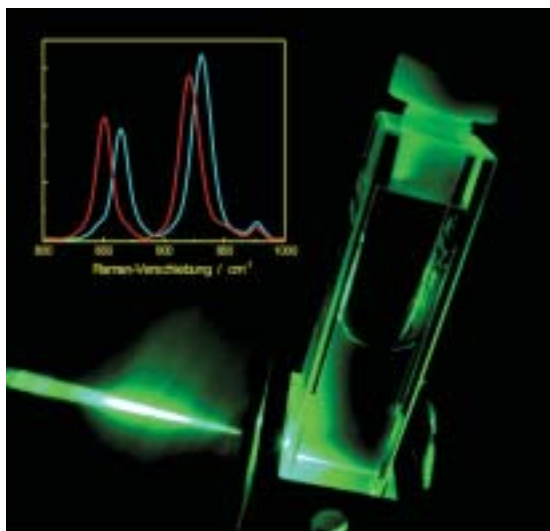
Fortsetzung auf Seite 4

Problem konnte jetzt durch eine Methode gelöst werden, die auf dem Prinzip der sog. Isotopenverdünnung basiert.

Zur genauen Bestimmung der Analytkonzentration wird der Probe eine bekannte Menge einer dem Analyten chemisch identischen, aber isotonenmarkierten Verbindung (Isotopomer) zugefügt. Die optische Selektivität des Raman-Effektes liefert aufgrund des Massenunterschiedes getrennte Signale beider Substanzen, so daß die Menge des Unbekannten aus der des Bekannten bestimmt werden kann. Die Auswertung der Spektren beschränkt sich dadurch auf die Bestimmung von Intensitätsverhältnissen, was für metrologische Zwecke von besonderem Interesse ist. Mögliche Störeffekte wie z. B. Materialverluste oder Matrixeffekte, die beide Isotopomere des Analyten gleichermaßen betreffen, beeinflussen das Resultat nicht.

Dieser aus der Massenspektrometrie bekannte Ansatz eines primären Verhältnisverfahrens wurde an einem praktisch relevanten Beispiel entwickelt und validiert: Der Bestimmung der Kreatininkonzentration im Blutserum, einem Wert, der über die Funktionsfähigkeit der Nieren Auskunft gibt. Da-

bei konnten im Vergleich zu bisherigen Messungen mit optischen Methoden Ergebnisse erzielt werden, die eine um drei Zehnerpotenzen verbesserte Nachweisempfindlichkeit zeigen. Da dies auch noch mit zehnfach höherer Genauigkeit möglich ist, wird man selbst höchsten metrologischen Ansprüchen gerecht.



PTBnews 06.2
Deutsche Ausgabe
August 2006
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
Webseite: <http://www.ptb.de/>

Weitergehende Informationen von
K. Anhalt,
Tel.: (030) 34 81-74 27,
E-Mail: klaus.anhalt@ptb.de

Höchste Temperaturen genau fixiert

Mit Strahlungsthermometrie auf der Basis des Planckschen Strahlungsgesetzes konnte die PTB die Schmelztemperaturen neuartiger eutektischer Metall-Kohlenstoff-Legierungen (M-C-Legierungen) bis fast 3000 °C erstmals mit geringen Messunsicherheiten bestimmen. Zur Verbesserung der industriellen Hochtemperaturmessung sollen mit diesen M-C-Legierungen künftig Hochtemperaturfixpunkte festgelegt werden.

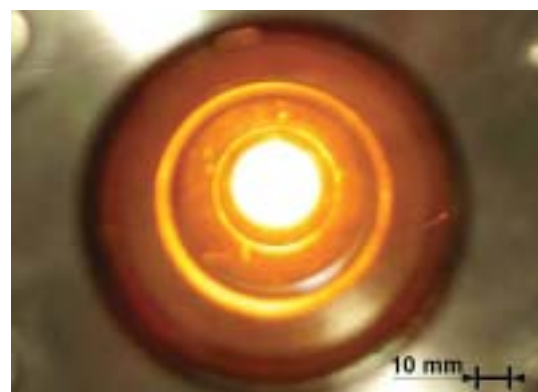
Die Messung hoher und höchster Temperaturen ist entscheidend für die effiziente Nutzung von Ressourcen z. B. in der Energie- oder der Luft- und Raumfahrttechnik. So halbiert eine um 20 °C falsche Betriebstemperatur die Lebensdauer einer bei 1500 °C betriebenen Turbine, und auch die Sicherheit kann von genauen Hochtemperaturmessungen abhängen, beispielsweise beim Wiedereintritt von Raumfähren in die Erdatmosphäre.

Die derzeit gültige Internationale Temperaturskala von 1990 (ITS-90) ist mithilfe einer Reihe von Fixpunkten mit festgelegten Temperaturen definiert. Dabei ist die höchste Fixpunkttemperatur von 1085 °C die Erstarrungstemperatur von Kupfer; jenseits dieser Temperatur ist die ITS-90 auf Extrapolation mit zunehmender Messunsicherheit angewiesen. Bisher begrenzt deshalb das Fehlen noch höherer, reproduzierbarer Schmelz- bzw. Erstarrungstemperaturen die Genauigkeit der Hochtemperaturmessung.

Aussicht auf eine Verbesserung bot 1999 der Vorschlag des japanischen Staatsinstituts, eutektische M-C-Legierungen für solche Hochtempe-

raturfixpunkte zu nutzen, denn die Kohlenstofflegierungen verschiedener Metalle haben Schmelzpunkte von 1150 °C bis über 3000 °C. Um den Transfer dieser Materialien in die industrielle Anwendung vorzubereiten, wurden sie von der PTB im Rahmen eines EU-Projekts und in Zusammenarbeit mit dem japanischen und dem russischen Staatsinstitut eingehend untersucht. Dabei gelang der PTB erstmals die genaue Bestimmung der Schmelztemperaturen von M-C-Legierungen bis zu Temperaturen von 2880 °C. Für Re-C (Schmelztemperatur 2475 °C) konnte beispielsweise eine erweiterte Messunsicherheit unter 1 °C bei einer Reproduzierbarkeit zwischen verschiedenen Fixpunktzellen von weniger als 0,2 °C erreicht werden.

Aktuell beteiligt sich die PTB an einem globalen Projekt zur Verbesserung der Internationalen Temperaturskala durch Implementierung der neuen Hochtemperaturfixpunkte.



Blick in eine Re-C-Zelle während der Schmelze bei 2475 °C. Die Zelle wurde im Rahmen des EU-Projekts HIMERT entwickelt.