

Die PTB-News liefern dreimal im Jahr aktuelle Nachrichten aus dem vielfältigen Spektrum der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) – aus der Grundlagenforschung, dem gesetzlichen Messwesen und den diversen PTB-Aktivitäten für die Wirtschaft.

## FORSCHUNGSNACHRICHTEN

**Markierungsfreie Zelldifferenzierung**  
Neuartige Konzentrationsmessungen für das erweiterte Kleine Blutbild 2

**Gerätezentrum für die Messung kleinster Magnetfelder**  
Die PTB öffnet ihre weltweit einmaligen biomedizinischen Messeinrichtungen für externe Nutzer 3

**Supraleitende Einzelphotonendetektoren**  
Charakterisierung von Photonenquellen für die Quantenkommunikation 4

**Eigener Weltrekord verbessert**  
Stromstärkemessung an Einzelelektronenpumpen mit noch geringerer Messunsicherheit 4

**Schnelle Rauheitsmessungen**  
Hochgeschwindigkeitsmessungen mit piezoresistiven Silizium-Mikrotastern 5

**Genaueste und stabilste transportable Uhr**  
Betrieb ermöglicht flexiblen Einsatz in einem PKW-Anhänger 6

## TECHNOLOGIETRANSFER

Biege neutrale Druckverteilplatte 7  
Herstellung von Graphen 7  
Therapeutischer Ultraschall 7

## VERSCHIEDENES

Auszeichnungen, Informationswebseite für Gerichte und Sachverständige, „Designte Quantenzustände der Materie“, Die PTB als Teil der Berliner Sicherheitsforschung, euspun, Infomaterial zum neuen SI 8

# Boltzmann-Konstante bestimmt

Der Weg zur Neudefinition der Einheit Kelvin ist frei

**Besonders interessant für**  
• metrologische Grundlagenforschung  
• Neudefinition der Einheiten

Der PTB ist eine unabhängige Messung der Boltzmann-Konstante  $k_B$  gelungen. Damit ist eine wesentliche Bedingung des Konsultativ-Komitees für Thermometrie (CCT) erfüllt, sodass der Neudefinition des Kelvins über die Festlegung der Boltzmann-Konstante nichts mehr im Wege steht. Die abschließenden Messungen von  $k_B$  mit dem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer haben eine relative Unsicherheit von 1,9 ppm (parts per million). Dies ist im Vergleich zur Unsicherheit von 15 ppm zu Beginn des Projekts im Jahre 2007 eine Reduktion um einen Faktor 8.

Um eine Einheit auf die Basis einer Naturkonstanten zu stellen, sollte diese grundsätzlich mit zwei unabhängigen Methoden, beide mit vergleichbarer Unsicherheit, gemessen werden. Schon vor etwa 30 Jahren konnte die Boltzmann-Konstante  $k_B$  mithilfe des akustischen Gasthermometers mit einer relativen Unsicherheit von 1,8 ppm bestimmt werden. Diese Methode wurde im letzten Jahrzehnt an verschiedenen Metrologieinstituten noch verfeinert, wobei das genaueste Ergebnis eine um den

Faktor 2 reduzierte Unsicherheit hat. Mit diesen Ergebnissen wird die erste Bedingung des CCT für die Neudefinition erreicht, einen gemittelten Wert für die Boltzmann-Konstante mit einer Unsicherheit unter 1 ppm zu erhalten.

Eine hierzu unabhängige Methode ist die Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie, welche die PTB seit vielen Jahren einsetzt. Bei dieser Methode wird der Druck des Messgases Helium in einem gasgefüllten Kondensator bestimmt. Dabei wird ausgenutzt, dass Helium als Dielektrikum die Kapazität des Kondensators verändert. Bei Drücken bis 7 MPa musste die Unsicherheit der Druckmessung auf ein Viertel reduziert werden. Dies gelang mit einer weltweit einmaligen relativen Unsicherheit von 1 ppm. Um die Kapazitätsänderungen zu messen, durften sogar nur relative Unsicherheiten von einigen Milliardsteln nicht überschritten werden. Darüber hinaus mussten die Materialparameter für die Kondensatoren



PTB-Wissenschaftler Christof Gaiser mit dem Kern des Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometers. Silberfarben: die verschiedenen Druckbehälter mit den speziellen Kondensatoren, die für die Messung in ihrem Inneren mit Helium gefüllt werden.

bei den hohen Drücken an der Grenze des Messbaren bestimmt und eine Gasreinheit höher als 99,99999 % gewährleistet werden. Dies konnte jetzt mithilfe verschiedener Kooperationen innerhalb der PTB (mit den beiden Arbeitsgruppen Druck und Geometrische Normale) und durch breite internationale Zusammenarbeit erreicht werden.

Nachdem die Boltzmann-Konstante nun mit beiden Methoden hinreichend genau bestimmt werden konnte, wird

CODATA im September 2017 den endgültigen Wert für  $k_B$  berechnen. Damit ist der Weg für die Neudefinition des Kelvins auf der Grundlage einer Naturkon-

stanten frei. Voraussichtlich im Herbst 2018 wird dann das gesamte Internationale Einheitensystem (SI) auf eine neue Basis gestellt werden. ■

**Ansprechpartner**

Christof Gaiser  
 Fachbereich 7.4 Temperatur  
 Telefon: (030) 3481-7349  
 christof.gaiser@ptb.de

**Wissenschaftliche Veröffentlichung**

C. Gaiser, B. Fellmuth, N. Haft, A. Kuhn, B. Thiele-Krivoi, T. Zandt, J. Fischer, O. Jusko, W. Sabuga: Final determination of the Boltzmann constant by dielectric-constant gas thermometry. *Metrologia* 54, 280–289 (2017)

# Markierungsfreie Zelldifferenzierung

## Neuartige Konzentrationsmessungen für das erweiterte Kleine Blutbild

**Besonders interessant für**

- Hersteller von Durchflusszytometern
- Onkologie
- Hämatologie
- Laboratoriumsmedizin

Bei Blutproben mit krankhaft veränderten Blutzellen können die in der Routinediagnostik verwendeten Hämolyse- und Färbemethoden dazu führen, dass bestimmte Zellpopulationen fehlerhaft identifiziert werden oder ihre Konzentration ungenau bestimmt wird. Ein in der PTB entwickeltes AC-Impedanzverfahren erlaubt dagegen, Vollblutproben ohne verfälschende Einflüsse durch eine Probenvorbehandlung zu analysieren.

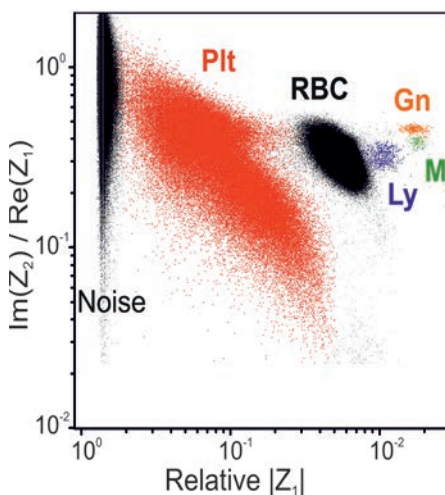
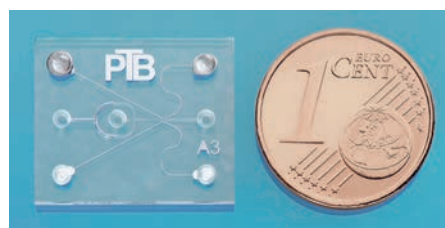
Im Blutbild werden Daten über die Menge und die Form von Zellbestandteilen zusammengefasst. Daraus kann der Arzt Schlussfolgerungen über den Gesundheitszustand eines Patienten ziehen. Die zugehörigen Messungen umfassen auch durchflusszytometrische Verfahren, bei denen optische oder Impedanz-Zellzählgeräte eingesetzt werden. In beiden Fällen werden zunächst die roten Blutzellen durch Hämolyse zerstört. Das erleichtert die Konzentrationsmessung weißer Blutkörperchen, deren Konzentration bei Gesunden etwa tausendmal geringer ist als die der roten Blutzellen. Bei bestimmten Erkrankungen, beispielsweise Leukämie, reagieren aber die weißen Blutzellen auf diese Hämolyseverfahren überempfindlich oder können ebenfalls zerstört werden. Bei anderen Blutproben, z. B.

von Säuglingen oder Anämiepatienten, finden sich unter Umständen hämolyse-resistente rote Blutzellen, die eine fehlerfreie Unterscheidung und Konzentrationsmessung der Leukozyten verhindern. Für eine sichere Differenzierung sind bei solchen Proben aufwendige mikroskopi-

sche Untersuchungen oder die Färbung von DNA oder Zellmembran erforderlich.

Mit dem in der PTB entwickelten Verfahren lassen sich Blutproben nach geeigneter Verdünnung durchflusszytometrisch analysieren, ohne sie durch eine Hämolyse oder Verwendung von Färbereagenzien zu beeinflussen. Die Methode beruht darauf, dass die Änderung des komplexen Widerstandes (der Impedanz) beim Durchtritt einer Blutzelle durch die Elektrodenanordnung einer mikrofluidischen Baugruppe gemessen wird. Zur eindeutigen Zellidentifikation werden zwei Wechselspannungen mit verschiedenen Frequenzen angelegt und die jeweiligen komplexen AC-Impedanzsignale, also die jeweilige Resistanz (Wirkwiderstand) und die Reaktanz (Blindwiderstand) sowie der Betrag der Impedanz bestimmt. Durch geeignete Wahl der Frequenzen und der Messgrößen können die dem erweiterten Kleinen Blutbild zugeordneten Zellen, also die roten Blutzellen, die Blutplättchen, die Granulozyten, die Monozyten und die Lymphozyten, im Mikro-Durchflusszytometer unterschieden werden.

Mit der neuen Methode können die Untersuchung von Blutproben bei bestimmten Patientengruppen vereinfacht und gleichzeitig systematische Messfehler vermieden werden. Die erforderliche Anzahl mikroskopischer Nachdifferenzierungen und/oder zellspezifischer Färbungen lässt sich damit reduzieren. Das auf einer mikrofluidischen Baugruppe basierende Verfahren bietet außerdem das Potenzial zur Entwicklung einer



Oben: mikrofluidischer Chip mit vier integrierten Elektroden zur durchflusszytometrischen Analyse von Blutzellen. Unten: markierungsfreie Zelldifferenzierung in einer (verdünnten) Vollblutprobe mittels AC-Impedanzmessungen bei zwei Frequenzen (Z1 bei 2,3 MHz und Z2 bei 10 MHz). Die Punktwolken entsprechen den roten Blutzellen (RBC), den Blutplättchen (Pit) und den Untergruppen der weißen Blutzellen, den Granulozyten, Monozyten (M) und Lymphozyten (Ly).

durchflusszytometrischen Einweg-Messzelle für Vor-Ort-Anwendungen. ■

**Patentanmeldung**

Verfahren und Messeinrichtung zur Bestimmung von Blutkörperchen, eingereicht am 5.11.2015

**Ansprechpartner**

Jörg Neukammer  
 Fachbereich 8.3  
 Biomedizinische Optik  
 Telefon: (030) 3481-7241  
 joerg.neukammer@ptb.de

**Wissenschaftliche Veröffentlichung**

P. Simon, M. Frankowski, N. Bock, J. Neukammer: Label-free whole blood cell differentiation based on multiple frequency AC impedance and light scattering analysis in a micro flow cytometer. Lab Chip 16, 2326–2388 (2016)

# Gerätezentrum für die Messung kleinster Magnetfelder

Die PTB öffnet ihre weltweit einmaligen biomedizinischen Messeinrichtungen für externe Nutzer

**Besonders interessant für**

- biomedizinische Forschung
- Nanopartikelforschung
- physikalische Grundlagenforschung
- Magnetresonanz in sehr kleinen Magnetfeldern

Seit dem 1. Mai existiert das neue Gerätezentrum „Metrologie für ultra-niedrige Magnetfelder“ auf dem Gelände der PTB in Berlin-Charlottenburg. Gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), bietet die PTB damit externen Wissenschaftlern aus Universitäten, internationalen Metrologieinstituten und Unternehmen Zugang zu ihrem Know-how und ihrer weltweit einzigartigen Ausstattung mit Instrumenten zur Messung extrem kleiner Magnetfelder.

Die PTB hat einen hervorragenden Ruf auf dem Gebiet der biomedizinischen Messtechnik. Neben mehreren magnetisch geschirmten Kabinen steht

auf ihrem Gelände im Institut Berlin bereits seit 2004 der magnetisch bestgeschirmte Raum (BMSR-2). Mit einem Schirmfaktor von über 10 000 000, einem Restfeld von weniger als 500 pT und einem Gradienten von 1,2 pT/mm bietet er weltweit einzigartige Bedingungen für höchstauflösende Magnetfeldmessungen. Realisieren ließ sich dieser Raum nur über speziell hergestellte unmagnetische Aufbauten sowie die Auswahl und gründliche Charakterisierung geeigneter Materialien. Als Sensoren dienen von der PTB selbst entwickelte SQUID-Magnetometer, die in der Lage sind, Magnetfelder von wenigen Femtotesla zu erfassen. Sie gehören mit einem Rauschen bis hinab zu 150 aT/√Hz zu den empfindlichsten SQUID-Systemen weltweit.

In der PTB werden mit der entwickelten Messtechnik Themen rund um Biosignalaufnahme und -verarbeitung, Kernspinpräzession von hyperpolarisierten Edelgasen, Charakterisierung von magnetischen Nanopartikeln und Ultra-Niedrigfeld-Kernmagnetresonanz

erforscht. Durch diese vielseitigen Aktivitäten konnten die PTB-Wissenschaftler umfangreiche Erfahrungen auf dem Gebiet der Metrologie für ultra-niedrige Magnetfelder erwerben.

Die weltweit einzigartigen Messeinrichtungen und Kompetenzen werden seit Jahren nicht nur für die metrologischen Aufgaben der PTB genutzt, sondern auch zunehmend von externen Wissenschaftlern aus Universitäten und Unternehmen nachgefragt. Das Gerätezentrum „Metrologie für ultra-niedrige Magnetfelder“ ist eine neue Plattform, um interne und externe Nutzer optimal bei ihren Forschungsprojekten im Bereich der magnetischen Messtechnik zu unterstützen. Weitere Informationen: <http://www.ptb.de/cms/ptb/institute-und-forschergruppen/geraetezentrum-8-2.html> ■

**Ansprechpartner**

Martin Burghoff  
 Fachbereich 8.2 Biosignale  
 Telefon: (030) 3481-7238  
 martin.burghoff@ptb.de



Außenansicht des magnetisch bestgeschirmten Raumes (BMSR-2) - des Herzens des Gerätezentrums



Messplatz für Ultra-Niedrigfeld-magnetresonanz



Logo des Gerätezentrums „Metrologie für ultra-niedrige Magnetfelder“

# Supraleitende Einzelphotonendetektoren

## Charakterisierung von Photonenquellen für die Quantenkommunikation

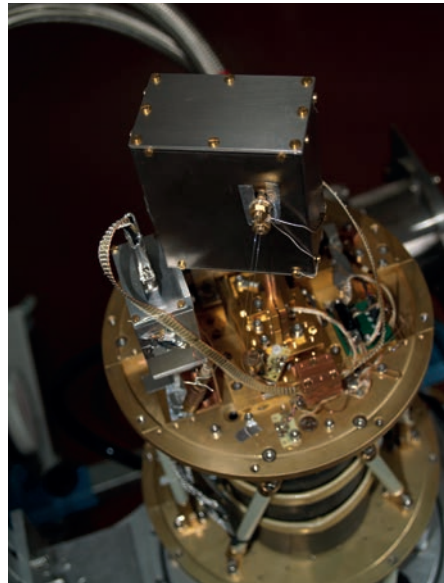
### Besonders interessant für

- Quantenoptik

Seit vielen Jahren ist die PTB führend bei der Entwicklung hochempfindlicher Stromsensoren auf der Basis von SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices). Jetzt wurden PTB-SQUID-Stromsensoren als wesentliche Bestandteile von supraleitenden Mikrokalorimetern erfolgreich eingesetzt, um neuartige Einzelphotonen-Emitter und Mikrolaser für die Quantenoptik zu charakterisieren.

Einzelphotonenquellen im optischen und nah-infraroten Wellenlängenbereich sind wesentliche Komponenten für Verfahren der optischen Quantenkommunikation. Eine vielversprechende Methode, um Quellen für einzelne oder wenige Photonen herzustellen, verwendet Quantenpunkt-Mikroresonatorstrukturen. Je besser man die Emissionsstatistik dieser Quellen kennt, desto genauer lässt sich ihr Verhalten verstehen.

Im Rahmen eines laufenden europäischen Forschungsprojekts arbeitet die PTB mit der Technischen Universität Berlin zusammen, wo Einzelphotonenemitter und Mikrolaser auf der Basis selbstorganisierter InAs/GaAs-Quantenpunkte entwickelt werden. In der PTB wurde ein



TES/SQUID-Detektormodul (Innenansicht des Kryostaten ohne Strahlungsschirme)

Messsystem zur Charakterisierung von Quellen einzelner oder weniger Photonen mit Wellenlängen im Bereich von 800 nm bis 1000 nm aufgebaut. Dabei kommen supraleitende Mikrokalorimeter zum Einsatz, Transition Edge Sensors (TES), die vom National Institute of Standards and Technology (NIST, USA) entwickelt wurden. Doch erst durch die Kombination mit den hochempfindlichen PTB-SQUID-Stromsensoren zur Auslesung lässt sich die Anzahl der absorbierten

Einzelphotonen genau bestimmen.

Das neue System ist eine Weiterentwicklung eines Aufbaus, der erfolgreich an der Österreichischen Akademie der Wissenschaften für ein schlupflochfreies Bell-Experiment mit verschränkten optischen Photonen eingesetzt wurde. Mit den verwendeten TES/SQUID-Detektoren lassen sich direkt die Photonenanzahlverteilungen der InAs/GaAs-Quantenpunkt-Quellen in einem Bereich bis ca. 20 Photonen bestimmen. Dies ermöglicht die Charakterisierung von Quantenpunkt-Mikrolasern unter variierenden Betriebsbedingungen. Mit dem Messsystem wurden kürzlich auch Ein- und Zwei-Photonen-Zustände eines Einzel-Quantenpunkt-Emitters direkt nachgewiesen. ■

### Ansprechpartner

Jörn Beyer

Fachbereich 7.2

Kryophysik und Spektrometrie

Telefon: (030) 3481-7379

joern.beyer@ptb.de

### Wissenschaftliche Veröffentlichung

T. Heindel, A. Thoma, M. von Helversen, M. Schmidt, A. Schlehahn, M. Gschrey, P. Schnauber, J.-H. Schulze, A. Strittmatter, J. Beyer, S. Rodt, A. Carmele, A. Knorr, S. Reitzenstein: A bright triggered twin-photon source in the solid state. *Nat. Commun.* 8, 14870 (2017)

# Eigener Weltrekord verbessert

## Stromstärkemessung an Einzelelektronenpumpen mit noch geringerer Messunsicherheit

### Besonders interessant für

- Metrologieinstitute
- Grundlagenforschung

Die PTB hat ihren im Vorjahr aufgestellten Weltrekord übertroffen, bei dem elektrische Ströme mit Einzelelektronenpumpen generiert und deren Quantisierung mit einem speziellen Messverstärker mit höchster Genauigkeit verifiziert wurden. Die neue Bestmarke, ermöglicht durch Verbesserungen des experimentellen Aufbaus, liegt bei ei-

ner relativen Messunsicherheit von nur 0,16  $\mu\text{A}/\text{A}$ . Zudem wurde das Ergebnis in einer deutlich verkürzten Messzeit erzielt.

Nanostrukturierte elektrische Schaltungen, die den kontrollierten Transport einzelner Elektronen ermöglichen – sogenannte Einzelelektronenpumpen – können zur Realisierung eines zukünftigen Quanten-Stromnormals eingesetzt werden und sind daher Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten in der PTB.

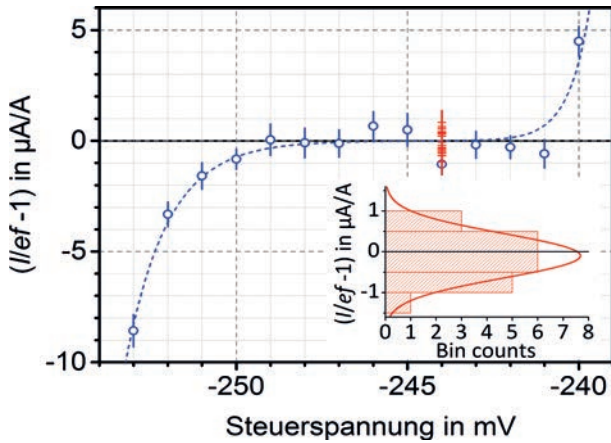
Diese Schaltungen erzeugen elektrische Stromstärken in der Größenord-

nung von 100 pA, die mithilfe eines eigens zu diesem Zweck in der PTB entwickelten Strom-Spannungswandlers, des Ultrastable Low-noise Current Amplifiers (abgekürzt „ULCA“, siehe PTB-News 1/2015) mit höchster Genauigkeit gemessen werden. Die Transresistenz des ULCA wird mit einem quantisierten Hall-Widerstand kalibriert, wobei eine relative Unsicherheit von weniger als 0,1  $\mu\Omega/\Omega$  erreicht wird.

Die Messunsicherheit konnte in einem neuen Experiment nochmals verbessert und damit der Weltrekord aus dem

Vorjahr (siehe PTB-News 1/2016) übertröffen werden. Dies gelang durch einen weiterentwickelten Messaufbau, in dem Eingangs- und Ausgangsstrom der Einzelelektronen-Pumpe durch zwei ULCA-

Kanäle in Spannungen konvertiert und deren Differenz unter Verwendung eines Quantennormals (eines „Josephson-Spannungsnormals“) gemessen wurde. Dadurch wurde der Einfluss der systematischen Unsicherheit bei der Spannungsmessung deutlich reduziert. Zudem konnte durch Optimierung der rechnergesteuerten Datenakquisition die Messzeit effektiver ausgenutzt werden.



Relative Abweichung der von der Einzelelektronenpumpe erzeugten Stromes vom quantisierten Wert  $I = e \cdot f$ . Die Messung unter Variation der Steuerspannung (blaue Symbole) dient zur Ermittlung des optimalen Arbeitspunktes, an dem anschließend 21 Messungen durchgeführt wurden (rote Symbole). Die statistische Unsicherheit jedes Messwertes, ermittelt in je einer Stunde Messzeit, entspricht  $0,6 \mu A/A$ . Der Einsatz zeigt das Histogramm der Messpunkte zusammen mit der entsprechenden Normalverteilung. Durch Mittelung errechnet sich daraus zusammen mit systematischen Unsicherheitsbeiträgen das Gesamtmessergebnis am Arbeitspunkt zu  $(I/ef - 1) = (-0,10 \pm 0,16) \mu A/A$ .

Die neue Rekordmarke von  $0,16 \mu A/A$  Messunsicherheit bei der Stromstärke von  $96 \text{ pA}$  wurde in 21 Stunden Messzeit erreicht. Zum Vergleich: Für den zuvor aufgestellten Rekord von  $0,2 \mu A/A$  wurde eine Gesamtmesszeit von 95 Stunden benötigt. In beiden Fällen stimmte die von der Einzelelektronenpumpe erzeugte Stromstärke mit dem erwarteten quantisierten Wert  $I = e \cdot f$  im Rahmen der Messunsi-

cherheiten überein.

Der PTB ist damit der Nachweis gelungen, dass das „Quanten-Ampere“ mit einer geringeren Messunsicherheit dargestellt werden kann als das „klassische“ Ampere, was einen Meilenstein auf dem Weg zur geplanten Revision des Internationalen Einheitensystems darstellt.

Zudem ermöglichen es die experimentellen Verbesserungen, Einzelelektronenpumpen in deutlich kürzerer Zeit zu charakterisieren – ein bedeutender praktischer Vorteil für den metrologischen Einsatz. ■

**Ansprechpartner**

Frank Hohls  
 Fachbereich 2.5  
 Halbleiterphysik und Magnetismus  
 Telefon: (0531) 592-2530  
 frank.hohls@ptb.de

**Wissenschaftliche Veröffentlichung**

F. Stein, H. Scherer, T. Gerster, R. Behr, M. Götz, E. Pesel, C. Leicht, N. Ubelohde, T. Weimann, K. Pierz, H. W. Schumacher, F. Hohls: Robustness of single-electron pumps at sub-ppm current accuracy level. *Metrologia* 54, 1–8 (2017)

# Schnelle Rauheitsmessungen

## Hochgeschwindigkeitsmessungen mit piezoresistiven Silizium-Mikrotastern

**Besonders interessant für**

- Mikrodüsenhersteller
- Messtechnikhersteller

Im Rahmen eines BMBF-Projektes wurden Hochgeschwindigkeitsmessungen mit piezoresistiven Mikrotastern erforscht. Dabei wurden Scangeschwindigkeiten von bis  $15 \text{ mm/s}$  erfolgreich erprobt. Ein wichtiger Aspekt war dabei die Abnutzung der Spitze.

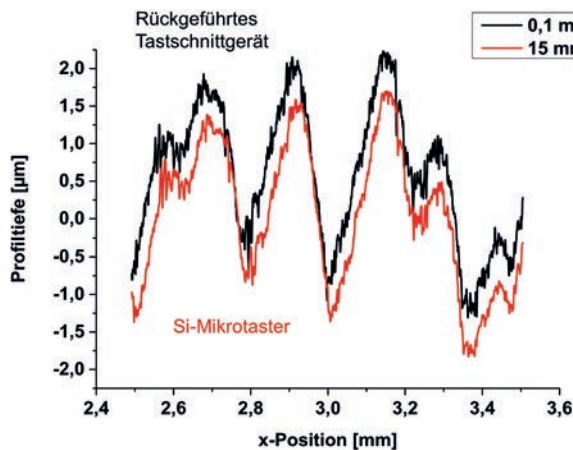
Piezoresistive Silizium-Mikrotaster mit integrierter Tastspitze überbrücken die Lücke zwischen der Rasterkraftmikroskopie und der taktilen Profilometrie mit Tastschnittgeräten. Mit diesen Mikrotastern sind Rauheitsmessungen in Strukturen mit hohem Aspektverhältnis sowie Tiefen bis zu  $5 \text{ mm}$  und Breiten bis zu  $50 \mu\text{m}$  möglich (siehe PTB-News 3.2014). Zudem erlauben solche Mikrotaster aufgrund der sehr geringen trägen

Masse von nur  $0,1 \text{ mg}$  prinzipiell auch hohe Verfah- und Messgeschwindigkeiten. Im Vergleich zur empfohlenen Antastkraft von  $750 \mu\text{N}$  für Tastschnittgeräte beträgt die erforderliche Antastkraft, die ein Abheben des Tasters von der Oberfläche durch dynamische Kräfte während der Messung verhindert, bei den  $5 \text{ mm}$  langen Mikrotastern nur  $28 \mu\text{N}$ . Im Rahmen eines BMBF-Projektes wurde diese Thematik genauer untersucht. Beispielsweise wurden Silizium-Mikrotastermessungen eines Raunormals mit herkömmlichen Tastschnittmessungen verglichen. Hierzu wurden Rauheitsmessungen bei hohen Verfahrgeschwindigkeiten von bis zu  $15 \text{ mm/s}$  mit bewusst hohen Antastkräften von  $100 \mu\text{N}$  durchgeführt. Die erhaltenen Profile zeigen auch in den Details eine gute Übereinstimmung beider Verfahren.

Zusätzlich wurde die Abnutzung, also der Verschleiß der Spitze untersucht. Mit zunehmender Abnutzung kann die Spit-

ze die Täler nicht mehr exakt ausmessen. Dies führt im gemessenen Profil zu Verfälschungen und zu falschen Rauheitskennwerten. Untersuchungen bei moderaten Verfahrgeschwindigkeiten bis  $100 \mu\text{m/s}$  und sehr kleinen Antastkräften von  $6 \mu\text{N}$  auf einem Raunormal zeigten, dass die Siliziumspitze kontinuierlich verschleißt und dadurch abflacht. Selbst nach  $54 \text{ m}$  Messstrecke lag aber der Radius dieser abgeflachten Spitzen unter einem  $\mu\text{m}$  und war damit immer noch kleiner als der Radius konventioneller Diamanttastspitzen ( $2 \mu\text{m}$ ). Bei kleinen Antastkräften und moderaten Verfahrgeschwindigkeiten von weniger als  $100 \mu\text{m/s}$  ist damit eine zuverlässige Abtastung und Vergleichbarkeit von Profilen und Kennwerten zu konventionellen Verfahren sichergestellt. Für die maximal mögliche Verfahrgeschwindigkeit dieser Mikrotaster von  $15 \text{ mm/s}$  nimmt der Verschleiß allerdings zu, sodass bereits nach  $3 \text{ m}$  Messstrecke ein Spitzenra-

dus über 2 µm erreicht wird. Nach 300 m Verschleißstrecke erhöhte sich dieser Ra-



Silizium-Mikrotastermessung eines Raunormals mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 15 mm/s im Vergleich zu einer herkömmlichen Tastschnittmessung mit den üblichen 0,1 mm/s.

dius auf einen Wert von 3 µm. Für sehr hohe Abtastgeschwindigkeiten werden daher verschleißbeständigere Tastspitzen benötigt.

In einem weiteren BMBF-geförderten Projekt soll nun ein sogenanntes Spitzenprüfnormal zur genauen Bestimmung der Spitzenform untersucht werden. Dies ist erforderlich, um den Einfluss der Spitzenform aus dem gemessenen Profil durch morphologische Filterung entfernen zu können. Damit wären erstmals rückgeführte Mikroformmessungen mit piezoresistiven

Mikrotastern möglich. Der Profils Scanner der PTB mit seinen drei interferometrischen Messachsen bietet für solche Messungen ideale Voraussetzungen. ■

**Ansprechpartner**

Uwe Brand  
 Fachbereich 5.1  
 Oberflächenmesstechnik  
 Telefon: (0531) 592-5111  
 uwe.brand@ptb.de

**Wissenschaftliche Veröffentlichung**

L. Doering, U. Brand, S. Bütefisch, T. Ahbe, T. Weimann, E. Peiner, T. Frank: *High-speed microprobe for roughness measurements in high-aspect-ratio microstructures. Meas. Sci. Technol.* 28, 034009 (2017)

# Genaueste und stabilste transportable Uhr

Betrieb ermöglicht flexiblen Einsatz in einem PKW-Anhänger

**Besonders interessant für**

- Geodäsie
- neues Einheitensystem
- Grundlagenforschung der Physik

In der PTB wurde weltweit erstmals eine transportable optische Strontium-Gitteruhr entwickelt und getestet. Die Uhr ist für internationale Vergleiche, geodätische Anwendungen und Grundlagenuntersuchungen in der Physik geeignet.

Optische Uhren könnten zukünftig die SI-Basiseinheit Sekunde realisieren. Dass es bei der anstehenden SI-Neudefinition im Herbst 2018 vorerst noch bei den Cäsium-Atomuhren bleibt, liegt an den vielen konkurrierenden optischen Uhren, von denen sich weder bei der Genauigkeit noch bei der Stabilität bisher eine dauerhaft als überlegen hervortun konnte.

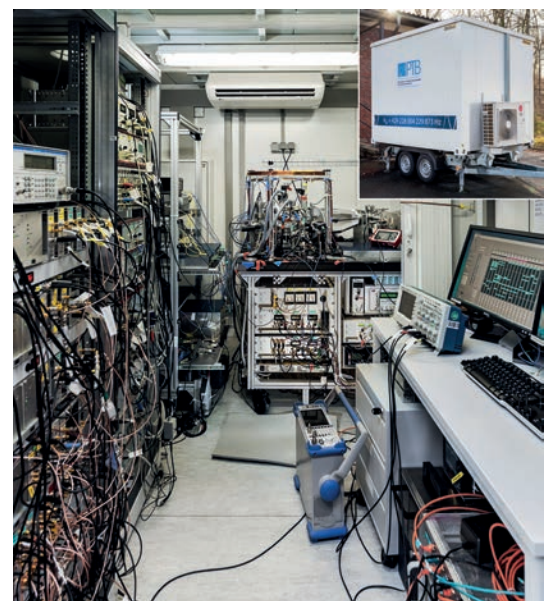
Die transportable optische Strontium-Gitteruhr der PTB ist genauer und stabiler als alle transportablen Uhren zuvor. Mit einer relativen Unsicherheit von  $7,4 \cdot 10^{-17}$  ist sie so nah an die besten stationären optischen Uhren herangekommen, dass diese ernsthaft miteinander verglichen werden können. Bisher war dies nur bei Uhren möglich, die in demselben Labor stehen oder über eine Glasfaserverbindung wie die zwischen Braunschweig und Paris (siehe PTB-

News 3/2016) verbunden sind. Jetzt rückt ein globaler Zusammenschluss optischer Uhren näher – eine Voraussetzung für eine mögliche Neudefinition der Einheit Sekunde.

Die hohe Stabilität der neuen Uhr ist interessant für die Geodäsie: Bereits nach einer Stunde können Höhenunterschiede von ungefähr 10 Zentimetern aufgelöst werden – und dies auch zwischen sehr weit entfernten Punkten. Deshalb arbeitet die PTB schon seit einigen Jahren eng mit Geodäten der Leibniz Universität Hannover im DFG-Sonderforschungsbereich 1128 geo-Q zusammen.

Bei zwei Messkampagnen außerhalb des PTB-Geländes zeigte sich, dass die Uhr bereits jetzt zehnmal genauer und hundertmal stabiler als die besten transportablen Cäsium-Fontänenuhren ist. Damit ist die transportable optische Uhr der PTB bereit für geodätische Höhen-

messungen, internationale Uhrenvergleiche sowie Präzisionsmessungen von Fundamentalkonstanten – und macht einen Schritt in Richtung zukünftiger Anwendungen im Weltraum. ■



Ein klimatisierter PKW-Anhänger voll Hightech-Physik: die transportable optische Uhr der PTB

**Ansprechpartner**

Christian Lisdat  
 Fachbereich 4.3  
 Quantenoptik und Längeneinheit  
 Telefon (0531) 592-4320,  
 christian.lisdat@ptb.de

**Wissenschaftliche Veröffentlichung**

S. B. Koller, J. Grotti, S. Vogt, A. Al-Masoudi, S. Dörscher, S. Häfner, U. Sterr, C. Lisdat: *A transportable optical lattice clock with  $7 \cdot 10^{-17}$  uncertainty. Phys. Rev. Lett.* 118, 073601 (2017)

# Biegeneutrale Druckverteilterplatte

## Besonders interessant für

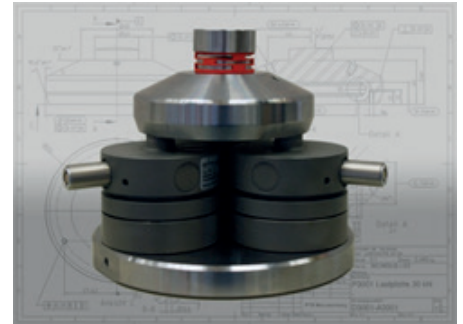
- Hersteller von Kraftaufnehmern

Zur Messung mittlerer Kräfte (etwa 10 kN) bis hin zu sehr großen Kräften (größer als 10 MN) lassen sich mehrere kalibrierte Kraftaufnehmer zu einem Build-up-Messsystem zusammenschalten. Durch steigende Anforderungen, insbesondere im Bereich sehr großer Kraftaufnehmer bis zu 50 MN, gewinnt die Reduzierung der Messunsicherheit dieser Systeme immer mehr an Bedeutung.

Die Neuentwicklung aus der PTB kommt aufgrund der speziellen Geometrie einer biegeneutralen Druckverteilerplatte ohne aufwendige Kompensationsmechanismen aus. Trotz Verformung an den relevanten Kontaktstellen zum Kraftmessgerät tritt kein Biegewinkel zu den einzelnen Kraftaufnehmern auf. (Technologieangebot 0418) ■

## Vorteile

- keine parasitären Lasten
- Materialersparnis
- keine zusätzlichen Druckstücke



Biegeneutrale Druckverteilterplatte für Build-up-Systeme

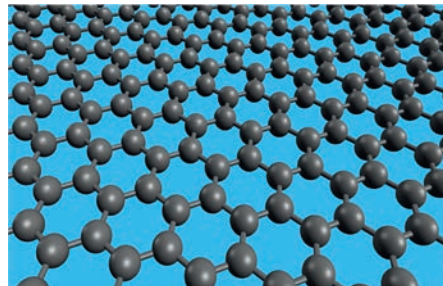
# Herstellung von Graphen

## Besonders interessant für

- Widerstandsmetrologie
- Sensoren
- Halbleiterbauelemente

In der PTB wurde ein Herstellungsverfahren für einlagiges Graphen entwickelt, um daraus ein Quantennormal für die elektrische Einheit des Widerstandes zu erstellen. Die Zuverlässigkeit und Einfachheit dieser verbesserten mehrstufigen Sublimations-Methode ermöglicht die Herstellung großflächiger

Graphenstrukturen. Auch die Massenproduktion qualitativ hochwertiger



Die schematische Darstellung einer Monolage Graphen zeigt die hexagonale Struktur des Kristallgitters aus Kohlenstoffatomen.

einlagiger Graphenschichten rückt damit näher. Die hergestellten Proben von 10 mm × 5 mm sind frei von Störungen im Material, etwa aufgrund der Bildung von Graphen-Mehrfachlagen oder durch hohe Substratstufen. ■

## Vorteile

- monolagige Graphenherstellung
- größenskalierbar
- Potenzial zur Massenherstellung

# Therapeutischer Ultraschall

## Besonders interessant für

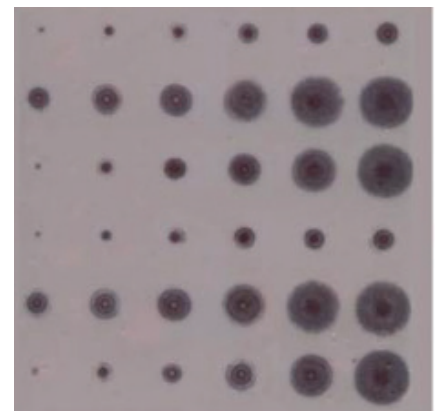
- medizinische Therapie
- Routinecheck von Ultraschallgeräten

Ultraschall wird als therapeutische Maßnahme in der Medizin für vielfältige Anwendungen verwendet, beispielsweise zur Zerstörung von Nierensteinen oder Tumoren. Mit einem neuen Verfahren der PTB kann eine rückführbare räumliche Kalibrierung z. B. von hochintensiven therapeutischen Ultraschallgeräten durchgeführt werden. Auf Basis von thermochromen Folien, die ihre Farbe

bei Wärmeeintrag durch Ultraschall ändern, können gerätespezifische Kalibrierfaktoren in einem mehrstufigen Prozess, aber mit geringem Aufwand ermittelt werden. (Technologienangebot 0426) ■

## Vorteile

- Zeitersparnis bei Kalibrierung/Konstanzprüfung
- präzise Ortsauflösung des Wärmeeintrages
- bessere Qualitätssicherung möglich



Thermochrome Aufnahme eines therapeutischen Ultraschallfeldes

## Ansprechpartner für diese Technologieangebote

Andreas Barthel, Telefon: (0531) 592-8307, E-Mail: andreas.barthel@ptb.de, www.technologietransfer.ptb.de

## Auszeichnungen

### Jan Wernecke

wurde für seine Promotionsarbeit „When size does matter: Dimensional metrology of nanostructured layers and surfaces using X-rays“ an der Technischen Universität Berlin



mit dem Ernst-Eckhard-Koch-Preis 2016 des Freundeskreises Helmholtz-Zentrum Berlin ausgezeichnet. Die Arbeit entstand in der Arbeitsgruppe Röntgenradiometrie am Berliner Elektronenspeicherring BESSY II.

## Informationswebseite für Gerichte und Sachverständige

Seit Jahrzehnten prüft die PTB die Bauart von neuen „Blitzern“, Rotlichtüberwachungsanlagen und anderen Verkehrsmessgeräten, bevor sie eingesetzt werden dürfen. So ist sichergestellt, dass z. B. niemand wegen einer falschen Messung zu Unrecht des Rasens beschuldigt wird. Wegen ihrer Kompetenz und ihrer Neutralität wird die PTB insbesondere von Gerichten gerne um Stellungnahmen gebeten, wenn z. B. ein Raser die gefahrene Geschwindigkeit mit Hinweis auf angebliche technische Unzulänglichkeiten des Messgerätes bestreitet. Um der Flut der mehreren hundert Anfragen im Jahr besser gerecht zu werden, hat die PTB eine spezielle Webseite eingerichtet, auf der sie Stellungnahmen zu häufiger auftretenden Fragen dauerhaft sammelt: [http://www.ptb.de/geschwindigkeit\\_stellungnahmen](http://www.ptb.de/geschwindigkeit_stellungnahmen). Den Erfolg dieser Maßnahme belegen dreistellige Zugriffszahlen pro Monat sowie die kürzlich erfolgte Anerkennung der dort abgelegten Dokumente als „Gutachten einer Behörde“, die in Gerichtsverfahren zu Verkehrsordnungswidrigkeiten verlesen werden dürfen, statt PTB-Mitarbeiter zur Hauptverhandlung zu laden (Urteil des OLG Frankfurt vom 26.08.2016, Nr. 2 Ss-OWi 589/16). (Robert Wynands, 0531 592-1300, [robert.wynands@ptb.de](mailto:robert.wynands@ptb.de))

## „Designte Quantenzustände der Materie“

Im von der DFG mit knapp 10 Millionen Euro geförderten Sonderforschungsbereich „Designte Quantenzustände der Materie“

(DQ-mat) arbeiten Forscher der Leibniz Universität Hannover, des Zentrums für angewandte Raumfahrt und Mikrogravitation in Bremen und der PTB in Braunschweig zusammen, um besondere quantenmechanische Eigenschaften von Vielteilchensystemen für die Metrologie auszunutzen. Unter anderem soll die Auflösung und Genauigkeit von Atominterferometern und Uhren verbessert und für grundlegende Tests der Physik eingesetzt werden. (P. O. Schmidt, QUEST, 0531 592-4700, [piet.schmidt@quantummetrology.de](mailto:piet.schmidt@quantummetrology.de))

## Die PTB als Teil der Berliner Sicherheitsforschung

Der PTB-Fachbereich 8.5 „Metrologische Informationstechnik“ wurde als Mitglied in die Fakultät der Helmholtz Research School on Security Technologies (HRSST) aufgenommen. Dies ist ein gemeinsames Programm der Technischen Universität Berlin und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), das 2010 ins Leben gerufen wurde und u. a. exzellente Doktoranden fördert, die sich mit der Forschung im Bereich der sicheren und vertrauenswürdigen Systemarchitektur für das gesetzliche Messwesen befassen. Damit gliedert sich die PTB noch weiter in die Wissenschaftslandschaft Berlin ein. (F. Thiel, 030 3481-7529, [florian.thiel@ptb.de](mailto:florian.thiel@ptb.de))

## euspen

Die European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen) veranstaltet einmal im Jahr an wechselnden Orten in Europa eine internationale Fachkonferenz mit Industrieausstellung, die als Forum für den Austausch über Innovationen, Forschung und Entwicklungen im Bereich der Präzisionsmess- und Fertigungstechnik dient. In diesem Jahr findet die Konferenz vom 29.5 bis 2.6 in Deutschland, im Hannover Congress Centrum statt. Lokale Organisatoren sind einige Institute der Leibniz Universität Hannover, der Technischen Universität Braunschweig und der PTB. Die Teilnahme an der Konferenz ist kostenpflichtig, der Besuch der Industrieausstellung in der Eilenriedehalle kostenfrei. <http://www.euspen.eu/events/17th-international-conference-exhibition/>



## Infomaterial zum neuen SI

Das Internationale Einheitensystem SI wird gründlich reformiert. Im Herbst 2018 soll eine große internationale Konferenz die historischen Weichen stellen. Statt auf sieben Basiseinheiten wird das



SI dann auf dem Fundament von Naturkonstanten ruhen. Die PTB hat diesen Prozess mit diversen großen Forschungsprojekten begleitet, unter anderem dem Avogadro-Projekt zur Neudefinition des Kilogramm und des Mol und dem Boltzmann-Projekt zur Neudefinition des Kelvin. Und die PTB spielt auch eine führende Rolle bei der Information über die Neuerungen. Frisch erschienen: das PTB-Infoblatt zum neuen SI (eine deutsche und eine englische Ausgabe), das Sie als gedruckte Ausgabe kostenlos bei der Pressestelle bestellen oder als pdf von der Webseite herunterladen können. ([www.ptb.de](http://www.ptb.de) > Presse & Aktuelles > Broschüren > zum SI). Ebenfalls auf der Webseite: ein Extrakapitel zum neuen SI ([www.ptb.de](http://www.ptb.de) > Forschung & Entwicklung > Forschung zum neuen SI) mit vielen Informationen zu den SI-Experimenten in der PTB, Fachaufsätzen, Magazinartikeln, Nachrichten, Videos sowie Fotos zum Herunterladen. Bestellung des gedruckten Infoblattes bei Cornelia Land (0531 592-9313, [cornelia.land@ptb.de](mailto:cornelia.land@ptb.de))



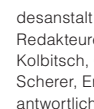
### Impressum

PTB-News 2/2017, deutsche Ausgabe, Mai 2017, ISSN 1611-1621

Die PTB-News erscheinen dreimal jährlich in einer deutschen und einer englischen Ausgabe und können kostenlos abonniert werden.

Abonnement-Formular: [www.ptb.de](http://www.ptb.de) > Publikationen > PTB-News > PTB-News abonnieren

Herausgeber: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig und Berlin



Redakteure: Andreas Barthel, Ludger Koenders, Christoph Kolbitsch, Christian Lisdat, Mathias Richter, Hansjörg Scherer, Erika Schow, Florian Schubert, Jens Simon (verantwortlich)

Layout: Volker Großmann, Alberto Parra del Riego (Konzept)

Redaktionsanschrift: Presse- und Öffentlichkeitsarbeit,

PTB, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig,

Telefon: (0531) 592-3006, Telefax: (0531) 592-3008,

E-Mail: [ptbnews@ptb.de](mailto:ptbnews@ptb.de)



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.