

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

# Ein Quantencomputer aus Niedersachsen

Forschungsbündnis wird mit 25 Mio. Euro gefördert

## FORSCHUNGSNACHRICHTEN

### Elektronen auf geradem Weg

Neuartiges Ionisationsvakuummeter als Referenzmessgerät

2

### Auf der Suche nach dem perfekten Match

Photonische Kristallfasern überlagern spektral weit auseinander liegende Lichtstrahlen

3

### Maßgeschneiderte Nanopartikel

Charakterisierung magnetischer Nanopartikel bereits während der Herstellung

3

### Messdaten im Internet der Dinge

Neue Dienstleistung der PTB zur metrologischen Validierung digitaler Daten

4

### Multilagen-Sandwich

Gestapelte Josephson-Kontakte für das pulsgetriebene Quanten-Spannungsnormale

5

### Konstanz von Naturkonstanten in Raum und Zeit untermauert

Vergleiche von Atomuhren verbessern bisherige Tests um das 20-fache

6

## TECHNOLOGIETRANSFER

Hybrides Mikroskop, 3-D-Druck magnetischer Objekte, Positionsgenaue Markerstrukturen

7

## VERSCHIEDENES

Auszeichnungen, Messverfahren für Wasserstoff, Stromspeicher für Mehrfamilienhäuser, Corona-Unterstützung, Studie zur NS-Vergangenheit, PTB und DAKS, Risiken neuer Materialien

8

### Besonders interessant für

- IT (Kryptografie, Künstliche Intelligenz)
- Molekularbiologie
- Materialwissenschaften
- Finanzwissenschaften

Das neue Forschungsbündnis „Quantum Valley Lower Saxony“ hat sich zum Ziel gesetzt, innerhalb von fünf Jahren einen Quantencomputer zu entwickeln. Das Bündnis, das die exzellenten Forschungsprojekte und Forschungskompetenzen an den niedersächsischen Standorten bündelt, wird mit insgesamt 25 Mio. Euro vom Land Niedersachsen und der Volkswagen-Stiftung unterstützt. Ziel der Initiative ist es, die Potenziale der Partner für einen Entwicklungssprung hin zu einem Quantencomputer auf Basis der Ionenfallentechnologie zu nutzen.

Die große Attraktivität eines Computers, der mit den Gesetzen und Prinzipien der Quantenmechanik arbeitet, erkennen nicht nur Physiker, sondern zahlreiche Anwender aus den unterschiedlichsten Technologiefeldern – von der Kryptografie, der Molekularbiologie und den Materialwissenschaften bis

hin etwa zu den Finanzmärkten oder den zahlreichen Einsatzfeldern Künstlicher Intelligenz. Von Quantencomputern wird erwartet, dass sie klassischen, digitalen Computern bei speziellen Problemstellungen weit überlegen sind, weil sie nicht mehr mit klassischen Bits, also strengen Null-Eins-Werten arbeiten, sondern vielmehr mit Quantenbits (Qubits), die sich in einem Überlagerungszustand von Null und Eins befinden können. Wird schon eine relativ kleine Zahl solcher Qubits miteinander verschaltet, dann wächst die Rechenleistung exponentiell.

Die grundsätzliche Herausforderung liegt darin, diese Qubits zu realisieren. Im „Quantum Valley Lower Saxony“ werden hierzu einzelne, gespeicherte Ionen die technologische Basis bilden. Sie werden mithilfe elektrischer Felder eingefangen und durch Radiowellen sowie Laserstrahlen kontrolliert. Die PTB beherrscht diese Ionenfallen-Technologie [1] und setzt eine Variante davon auch erfolgreich in optischen Atomuhren ein. Ionenfallen gelten dabei zugleich als einer der vielversprechendsten Ansätze zur Realisierung eines Quantencomputers mit signifikanter Rechenleistung [2].

An diesem Projekt des Quantencom-



Das Herzstück eines Quantencomputers ist das Qubit, das sich in einem Überlagerungszustand von Null und Eins befinden kann – symbolisiert durch die in der Physik berühmte Schrödinger-Katze. (Bild: Adobe Stock / Mopic)

puters arbeitet die PTB gemeinsam mit der Technischen Universität Braunschweig und der Leibniz Universität Hannover. Die Technologie der Ionenfallen ist dabei das Spezialgebiet der PTB. Von der TU Braunschweig werden die Arbeiten zur chipintegrierten Elektronik beigesteuert. Die Leibniz Universität Hannover trägt vor allem mit Expertise beim Betrieb des Quantencomputers und mit ihren Theoriengruppen zu den eingesetzten Algorithmen und zur Softwareoptimierung bei. ■

**Ansprechpartner**

Piet Schmidt  
 Institute for Experimental Quantum Metrology (QUEST)  
 Sprecher des „Quantum Valley Lower Saxony“  
 Telefon: (0531) 592-4700  
 piet.schmidt@quantummetrology.de

**Wissenschaftliche Veröffentlichungen**

[1] H. Hahn, G. Zarantonello, A. Bautista-Salvador, M. Wahnschaffe, M. Kohnen, J.

Schoebel, P. O. Schmidt, C. Ospelkaus: Multilayer ion trap with three-dimensional microwave circuitry for scalable quantum logic applications. *Appl. Phys. B* **125**, 154 (2019).

[2] G. Zarantonello, H. Hahn, J. Morgner, M. Schulte, A. Bautista-Salvador, R. F. Werner, K. Hammerer, C. Ospelkaus: Robust and resource-efficient microwave near-field entangling  $^9\text{Be}^+$  gate. *Phys. Rev. Lett.* **123**, 260503 (2019).

# Elektronen auf geradem Weg

## Neuartiges Ionisationsvakuummeter als Referenzmessgerät

**Besonders interessant für**

- Vakuumtechnik
- Prozesstechnik

Ein neuartiges Ionisationsvakuummeter bietet eine Lösung für die bisher unzureichende Stabilität kommerziell erhältlicher Geräte und ermöglicht vorher-sagbare Empfindlichkeiten. Dies wird durch eine geradlinige Führung der ionisierenden Elektronen auf ihrem Weg durch den Ionisationsraum ermöglicht.

In vielen Bereichen der Industrie, vor allem in der Halbleiterindustrie, werden zur Prozesskontrolle Vakuum- und Partialdruckmessgeräte eingesetzt. Für die In-situ-Kalibrierung und zur Überwachung im Hoch- und Ultrahochvakuumbereich kommen Ionisationsvakuummeter zum Einsatz. Bei ihnen werden mithilfe schneller Elektronen Gasmoleküle ionisiert und der resultierende Ionenstrom gemessen. Zur Rückführung müssen herkömmliche Ionisationsvakuummeter individuell nicht nur für Stickstoff, sondern für das jeweils benutzte Gas kalibriert sein, weil die Empfindlichkeit für eine Gasart sich jeweils vom Einzelgerät abhängig zeigt.

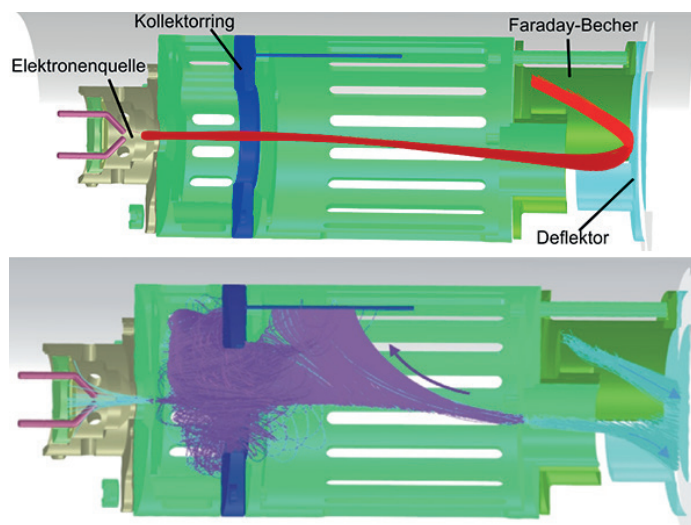
Zur Vereinfachung der Kalibrierprozesse wurde im Rahmen des EMPIR-Projekts „Ion Gauge“ ein neuartiges Ionisationsvakuummeter entwickelt. Anders als bei herkömmlichen Vakuummetern mit undefinierten Elektronenbahnen werden hier die Elektronen auf geradem Weg von der Kathode durch den Ionisationsraum in einen Faraday-Detektor ge-

führt. Der Ionenkollektor wird zusätzlich als elektrostatische Linse benutzt, um die Elektronen auf die Austrittsblende der Anode zu fokussieren. Durch einen Deflektor werden die Elektronen so auf den Faraday-Detektor gelenkt, dass die beim Auftreffen der Elektronen entstehenden Röntgenstrahlen nicht zum Ionenkollektor gelangen können, wo sie das Messergebnis verfälschen würden.

Durch das Konstruktionsprinzip ist sowohl die Länge der Elektronenbahn als auch der Bereich, aus dem Ionen auf den Kollektor gelangen können, gut definiert und vom Einzelgerät unabhängig. Dadurch kann die Empfindlichkeit für eine Gasart entweder durch eine bekannte Ionisationswahrscheinlichkeit oder durch eine lediglich typenspezifische, aber nicht geräteindividuelle Kalibrierung für alle Vakuummeter dieses Typs ermittelt werden, was erheblichen Aufwand und Kosten spart.

Zusätzlich haben die bisherigen experimentellen Ergebnisse gezeigt, dass der neue Gerätetyp eine bei Ionisationsvakuummetern bisher nicht gekannte Reproduzierbarkeit und Transportinstabilität

von besser als einem Prozent besitzen. So kann er sowohl als Referenzmessgerät für Kalibrierlaboratorien als auch als Transfernormal für Vergleiche eingesetzt werden. Für die breite Anwendung soll der neuartige Typ Ionisationsvakuummeter als ISO-Standard aufgenommen werden. ■



Schema des neuartigen Ionisationsvakuummeters mit simulierten Elektronen- (rot, oberes Bild) und Ionenbahnen (violett und türkis, unteres Bild). Ionen, die nicht im Ionisationsraum entstehen (türkis), werden nicht auf den Kollektor (dunkelblau) geleitet.

**Ansprechpartner**

Karl Jousten  
 Fachbereich 7.5  
 Wärme und Vakuum  
 Telefon: (030) 3481-7262  
 karl.jousten@ptb.de

**Wissenschaftliche Veröffentlichung**

B. Jenninger et al: Development of a design for an ionisation vacuum gauge suitable as a reference standard. *Vacuum* **183**, 109884 (2021)

# Auf der Suche nach dem perfekten Match

Photonische Kristallfasern überlagern spektral weit auseinander liegende Lichtstrahlen

## Besonders interessant für

- Anwendungen in der Photonik
- Entwickler optischer Messtechnik

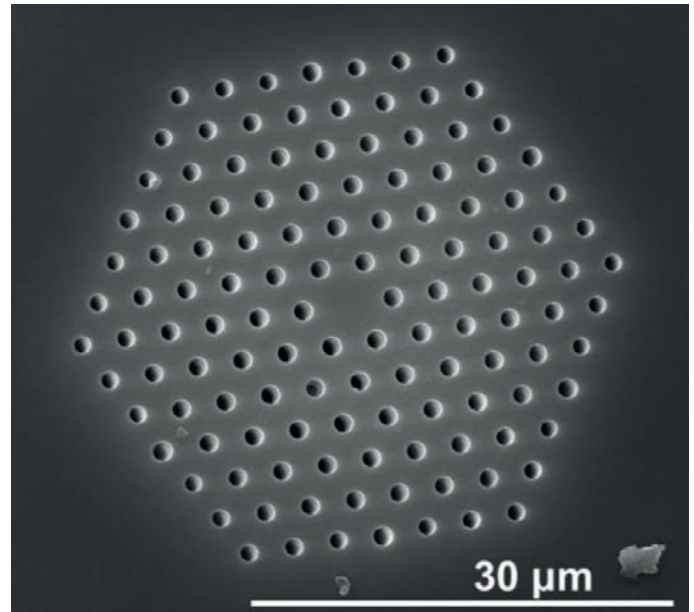
Wie legt man Lichtstrahlen so übereinander, dass sie sich räumlich möglichst perfekt entlang derselben Richtung ausbreiten und dabei wichtige Eigenschaften wie Polarisation und räumliche Kohärenz behalten? In einer systematischen Untersuchung verschiedener kommerziell verfügbarer Lichtwellenleiter wurde mit photonischen Kristallfasern ein Hilfsmittel gefunden, das diese schwierige Herausforderung deutlich erleichtert und damit unter anderem Mehrwellenlängeninterferometrie über mehrere Kilometer ermöglicht.

Verfahren, mit denen große Distanzen sehr genau bestimmt werden können, sind aus unserer modernen Welt nicht mehr wegzudenken. Egal ob GPS für die Navigation, Very Long Baseline Interferometry in der Astronomie oder Satellite-Laser-Ranging für die Vermessung der Erdoberfläche – alle diese Verfahren benötigen Referenzdistanzen bis hin zu einigen tausend Metern, damit ihre Eigenschaften studiert und optimiert werden können. Für die Referenzmessung entwickelt die PTB im Rahmen des europäischen EMPIR-Projekts „GeoMetre“ ein Interferometer, bei dem Strahlen mit Wellenlängen von 532 nm und 1064 nm möglichst perfekt übereinander liegen müssen. Dafür wurden diese bisher mit halbtransparenten Spiegeln im Freistrahl überlagert. Die Stabilität dieser aufwendigen Justage ist aber durch die verwendeten mechanischen Bauteile begrenzt.

Für den anvisierten Einsatz im Feld wurde eine robustere Lösung gesucht. Dabei bieten sich Lichtwellenleiter für die Überlagerung an. Für Interferometrie müssen aber auch Strahlhomogenität, Polarisation und räumliche Kohärenz aller Strahlen erhalten bleiben. In einer systematischen Studie wurden verschiedene Wellenleiterarchitekturen diesbezüglich gegeneinander verglichen. Dabei ergab sich, dass mikrostrukturierte, photonische Kristallfasern eine nahezu perfekte Lösung bieten. Sie können in einem breiten spektralen Bereich (z. B. von 400 nm bis 1200 nm) eine monomodale, polarisationserhaltende Transmission unter Beibehaltung der räumlichen Kohärenz sicherstellen. Auch die für die Anwendung typischen mechanischen Belastungen stellen dabei kein Problem dar.

Der „perfekte Match“ wird allein durch das stark wellenlängenabhängige Öffnungsverhältnis, die numerische Apertur, verhindert: Verschiedene Wellenlängen werden mit unterschiedlichen Strahldurchmessern emittiert. Dies kann jedoch bei der Auslegung der Optik berücksichtigt werden, und so bieten sich photonische Kristallfasern für die

fluchtende Strahlüberlagerung mit hoher Qualität sowohl für den oben genannten Einsatzzweck als auch für andere Anwendungen, etwa in der Spektroskopie, an. ■



Ansicht einer mikrostrukturierten Faser im Elektronenmikroskop. (Abbildung: C. Markos, <https://doi.org/10.1038/srep31711>)

## Ansprechpartner

Florian Pollinger  
 Fachbereich 5.4  
 Interferometrie an Maßverkörperungen  
 Telefon: 0531 592-5420  
 florian.pollinger@ptb.de

## Wissenschaftliche Veröffentlichung

Y. Liu, A. Röse, G. Prellinger, P. Köchert, J. Zhu, F. Pollinger: Combining harmonic laser beams by fiber components for refractivity-compensating two-color interferometry. *J. Lightwave Technology* 38, 1945–1952 (2020)

# Maßgeschneiderte Nanopartikel

Charakterisierung magnetischer Nanopartikel bereits während der Herstellung

## Besonders interessant für

- Hersteller von Nanopartikeln
- physikalisch-chemische Prüflaboratorien

Die PTB hat ein Messgerät entwickelt, das bereits während der Synthese magnetischer Nanopartikel deren magnetische Eigenschaften zuverlässig charakterisieren kann. Der im PTB-Technologie-

transferprogramm „TransMeT“ entwickelte Demonstrator wurde ersten Funktionstests unterzogen. Zukünftig soll mit diesem Gerät die Herstellung neuer Referenzmaterialien für magne-

**tische Nanopartikel unterstützt werden.**

Magnetische Nanopartikel (MNP) sind industriell hergestellte Teilchen, die meist aus einem Eisenoxidkern und einer organischen Hülle bestehen. Sie werden in einem breiten Spektrum an Anwendungen eingesetzt, etwa für die biomedizinische Diagnostik oder in Handylautsprechern. Wichtig für ihre Funktion im jeweiligen Anwendungsbereich ist die Kontrolle und die dafür benötigte Messung ihrer magnetischen Eigenschaften.

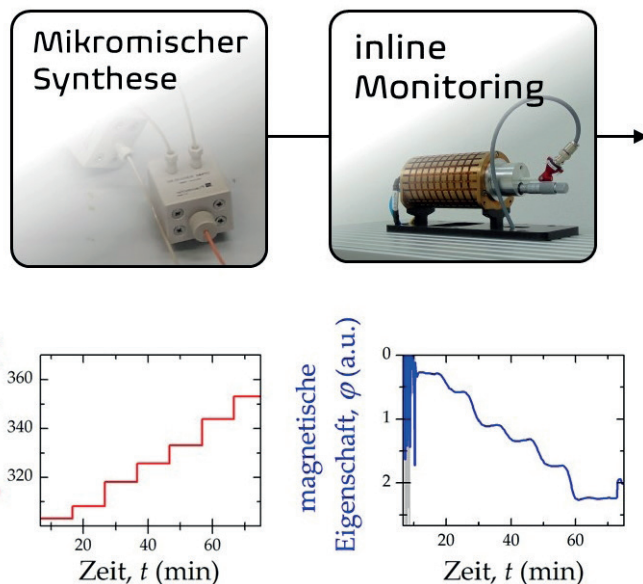
Um verlässliche und vertrauenswürdige Messergebnisse zu erhalten, werden spezielle Referenzmaterialien und zuverlässige Messverfahren benötigt, die bisher kommerziell nicht verfügbar sind. Der Grund ist, dass in den etablierten chemischen Syntheseverfahren die genaue Größe der Eisenoxidkerne und ihre magnetischen Eigenschaften schwer einstellbar sind. Ein Hauptproblem ist das Fehlen geeigneter Messgeräte, mit denen die magnetischen Eigenschaften der MNP direkt während der Synthese oder zeitnah danach bestimmt werden können.

Das Fraunhofer-Institut für Mikrotechnik und Mikrosysteme (IMM) hat ein Mikroreaktionssystem entwickelt, das eine Produktion von Nanopartikeln kontrollierter Partikelkerngröße im Labormaßstab erlaubt und somit eine der Grundvoraussetzungen zur Herstellung von Nano-Referenzmaterialien erfüllt. Die PTB unterstützt die Entwicklung dieses Produktionsverfahrens mit ihrer magnetischen Messtechnik. Um den umfangreichen Parameterraum der Synthesebedingungen (etwa Flussrate und

Temperatur) systematisch und effektiv zu untersuchen, sollen anstelle sequenzieller Messungen an Einzelproben leistungsfähige Inline-Messverfahren zum Einsatz kommen. Dadurch soll die Herstellung von MNP mit wohldefinierten Größen und magnetischen Eigenschaften möglich werden.

Um diesem Ziel näher zu kommen, hat die PTB zusammen mit der Postnova Analytics GmbH im Rahmen des TransMeT-Programms einen Detektor zur magnetischen Inline-Prozesskontrolle entwickelt, der direkt während der Mikroreaktions-synthese eingesetzt werden kann. Dieses neue Messgerät soll zukünftig auch einem breiteren Anwenderkreis (z. B. für die Partikelsynthese,

in der medizinischen Diagnostik oder Laboranalytik) für die schnelle und präzise Messung von MNP zur Verfügung stehen. Insbesondere soll auf diesem Weg die Herstellung zertifizierter Nano-Referenzmaterialien für MNP weiter vorangetrieben werden. ■



Der neue Inline-Detektor zur magnetischen Prozesskontrolle kann direkt während der Mikroreaktions-synthese eingesetzt werden. Damit kann beispielsweise während der Synthese in Echtzeit die Änderung des magnetischen Signals aufgrund von Änderungen der Temperatur gemessen werden.

**Ansprechpartner**

Norbert Löwa  
 Fachbereich 8.2  
 Biosignale  
 Telefon: (030) 3481-7736  
 norbert.loewa@ptb.de

**Wissenschaftliche Veröffentlichung**

N. Löwa, D. Gutkelch, E. A. Welge, R. Welz, F. Meier, A. Baki, R. Bleul, T. Klein, F. Wiekhorst: Novel benchtop magnetic particle spectrometer for process monitoring of magnetic nanoparticle synthesis. *Nanomaterials* 10, 2277 (2020)

# Messdaten im Internet der Dinge

## Neue Dienstleistung der PTB zur metrologischen Validierung digitaler Daten

**Besonders interessant für**

- industrielle Anwendungen im Internet der Dinge
- Metrologieinstitute

Ein neuer Service der PTB bietet Anwendern aus der Industrie eine Validierung von Messdaten, die im Internet der Dinge weitergegeben werden, hinsichtlich der Einhaltung grundlegender metrologischer Anforderungen. Zu diesem

Zwecke wurde der seit Jahren etablierte TraCIM-Service der PTB erweitert.

Messdaten, die in Industrie 4.0 und im Internet der Dinge zum Einsatz kommen, müssen fehlerfrei und für Maschinen und Menschen eindeutig sein. Digitalanwendungen etwa im Gesundheitsbereich oder bei Verbrauchszählern wären schlicht undenkbar, wenn die Zuverlässigkeit der Datenformate nicht gesichert ist. Zu diesem Zweck entwickelt die PTB

gemeinsam mit Partnern aus Messtechnik, Industrie und Forschung die digitalen Messdatenansätze. Dafür wurden in dem EMPIR-Projekt SmartCom („Communication and validation of smart data in IoT-networks“) die Grundlagen für den Austausch messtechnischer Daten geschaffen. Dazu gehört das Digitale Einheitensystem (D-SI), ein Datenmodell für die SI-basierte, maschineninterpretierbare Kommunikation von Mess- und Messgerätedaten. Es wurde entwickelt, um

das SI als Bindeglied zwischen verschiedenen Systemen zu etablieren, indem für die Maschine die verwendeten Einheiten stets automatisch in den SI-Einheiten vorliegen. Ein digitaler Kalibrierschein, der diesen Anforderungen genügt, heißt SmartCom DCC.

Entsprechende Messdaten können nun mithilfe des neuen Validierungsservers der PTB daraufhin überprüft werden, ob sie auch während und nach der Datenübertragung im Internet der Dinge den grundlegenden metrologischen Anforderungen aus dem Internationalen Einheitensystem (SI), dem Internationalen Vokabular in der Metrologie (VIM) und dem „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) genügen.

Der Validierungsserver existiert schon seit einigen Jahren unter dem Namen TraCIM (Traceability for computational-intensive metrology) und diente anfangs der Analyse von Auswertalgorithmen

der Koordinatenmesstechnik. Er wurde Schritt für Schritt erweitert und hat jetzt ein neues Modul für die Validierung der neuen SI-basierten Formate bekommen.

Für die Anwendung der Validierung ist es notwendig, alle Daten in XML in Übereinstimmung mit dem D-SI-Format bereitzustellen, beispielsweise in einem SmartCom DCC. Nach dem Hochladen der Daten oder DCCs wertet der Server die verwendeten SI-Einheiten aus und prüft die Vollständigkeit aller messtech-

nischen Informationen. Ein automatisch erzeugtes Testzertifikat zeigt die erreichte Qualitätsklasse an: PLATIN (alle Einheiten sind SI-Basiseinheiten), GOLD (SI-Einheiten mit Präfix und SI-abgeleitete Einheiten mit eigenem Symbol), SILBER (erlaubte Nicht-SI-Einheiten), BRONZE (Einheiten, die in der Revision des SI 2019 entfernt wurden) und IMPROVABLE (z. B. Daten ohne Einheiten). Der neue PTB-Service richtet sich insbesondere an Kunden aus dem industriellen Umfeld. ■

#### Ansprechpartner

Daniel Hutzschenreuter  
Abteilung 1  
Mechanik und Akustik  
Telefon: (0531) 592-1149  
smartcom@ptb.de

#### Website des PTB-TraCIM-Servers II

<https://smartcom-tracim.ptb.de/tracim-server-2.0/>

#### User Manual des neuen Dienstes

Traceability for computationally-intensive metrology - Test for communication interfaces used for the exchange of metrological data.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.3953555>

# Multilagen-Sandwich

## Gestapelte Josephson-Kontakte für das pulsgetriebene Quanten-Spannungsnormale

### Besonders interessant für

- Metrologieinstitute
- Kalibrierlaboratorien
- Hersteller elektrischer Präzisionsmessgeräte

**Pulsgetriebene Josephson-Wechselspannungsnormale** (Josephson Arbitrary Waveform Synthesizers, JAWS) ermöglichen es, quantisierte Wechselspannungen mit beliebigen und spektral reinen Wellenformen zu synthetisieren. In der PTB wurde ein pulsgetriebenes Josephson-Normal zur Erzeugung von Wechselspannungen mit Serienschaltungen realisiert, die auf Stapeln von bis zu fünf Josephson-Kontakten beruhen. Durch die neue Technologie wurde die Integrationsdichte der Schaltungen und damit deren Ausgangsspannung deutlich erhöht: Mit bis zu 30 000 Kontakten pro Chip kann nun eine Effektivspannung von 0,5 V RMS (0,7 V Peak) erzeugt werden. Die Ausbeute im Herstellungsprozess wurde durch diverse Anpassungen deutlich erhöht.

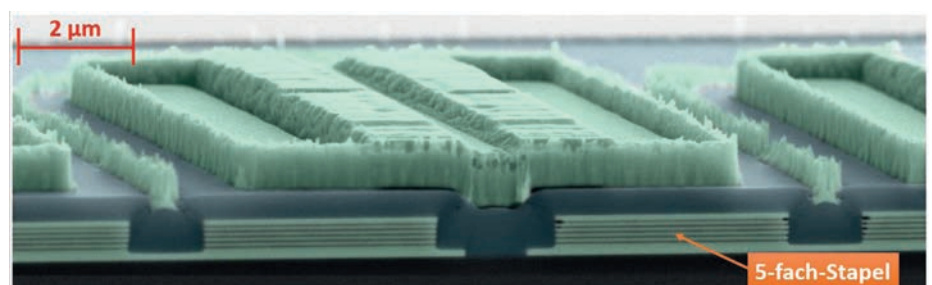
Pulsgetriebene Josephson-Wechsel-

spannungsnormale ermöglichen eine Vielzahl metrologischer Anwendungen und basieren auf Reihenschaltungen supraleitender Josephson-Kontakte, wie sie im Reinraumzentrum der PTB hergestellt werden. Perspektivisch soll die Ausgangsspannung auf Werte zwischen 7 V bis 10 V erhöht werden, um das Spektrum möglicher Anwendungen weiter zu erhöhen.

Um dies zu erreichen, soll u. a. die Integrationsdichte der Josephson-Kontakte auf den Chips erhöht werden. Da die Kontakte in eine Hochfrequenz-Struktur (einen koplanaren Wellenleiter) integriert sind, gibt es Einschränkungen bei

der Erhöhung der Länge der Serienschaltung. Zur Erhöhung der Kontaktzahl pro Chip wurde daher eine vertikale Stapelung der Kontakte vorgenommen, was durch die Materialschicht-Kombination der Josephson-Kontakte (bestehend aus Nb und Si) technologisch möglich war.

Nach diversen Modifikationen und Erweiterungen des in der PTB genutzten Standardprozesses basierend auf Elektronenstrahl-Lithografie ist es nun gelungen, bis zu 5-fach gestapelte Josephson-Kontakte mit einer hohen Prozessausbeute herzustellen. Zwei wesentliche Prozess-Erweiterungen sind hier besonders erwähnenswert: Zum einen



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Serienschaltung mit 5-fach gestapelten Josephson-Kontakten (vertikaler Schnitt). Die Höhe der Kontaktstapel beträgt etwa 800 nm, die Gesamthöhe aller Schichten knapp 3 µm.

wurde zur Planarisierung der Schaltungsoberflächen ein chemisch-mechanisches Polierverfahren eingeführt. Dadurch können die nachfolgenden supraleitenden Schichten mit hoher Qualität (hoher supraleitender Stromtragfähigkeit) aufgebracht und anschließend strukturiert werden. Zum anderen wurde in Zusammenarbeit mit dem IPHT Jena mittels Atomlagenabscheidung (Atomic Layer Deposition, ALD) eine isolierende Siliziumoxidschicht zwischen den elektrisch leitenden Strukturen aufgebracht. Im Gegensatz zu den Siliziumoxid-Isolationsschichten, die bislang in der PTB

mittels plasmaunterstützter chemischer Gasphasenabscheidung hergestellt wurden, bieten ALD-Schichten den Vorteil der perfekten Kantenbedeckung zur Kantenisolation auch bei extremen Aspektverhältnissen, wie sie bei 5-fach gestapelten Kontaktschaltungen vorliegen.

Zukünftig wird die PTB auch im eigenen Reinraumzentrum über ALD-Technologie verfügen. Insgesamt umfasst der komplexe Herstellungsprozess, bei dem 30 000 Josephson-Kontakte auf einem Chip mit einer Fläche von  $(10 \times 10)$  mm<sup>2</sup> integriert werden, die Abscheidung von 16 Schichten in etwa 40 einzelnen Prozessschritten. ■

#### Ansprechpartner

Oliver Kieler  
Fachbereich 2.4  
Quantenelektronik  
Telefon: (0531) 592-2410  
oliver.kieler@ptb.de

#### Wissenschaftliche Veröffentlichung:

O. Kieler, R. Wendisch, R. Gerdau, T. Weimann, J. Kohlmann, R. Behr: *Stacked Josephson junction arrays for the pulse-driven AC Josephson voltage standard. Eingereicht bei IEEE Trans. Appl. Supercond. (2020)*

# Konstanz von Naturkonstanten in Raum und Zeit untermauert

## Vergleiche von Atomuhren verbessern bisherige Tests um das 20-fache

**Besonders interessant für**  
• physikalische Grundlagenforschung

Eine Naturkonstante sollte immer den gleichen Wert besitzen, unabhängig davon, zu welcher Zeit oder an welchem Ort sie bestimmt wird. Auch Einsteins berühmte allgemeine Relativitätstheorie nutzt diese grundlegende Annahme, die als lokale Positionsinvarianz (LPI) bekannt ist. Deren Gültigkeit wurde jetzt mit einem Vergleich optischer Ytterbiumuhren in der PTB mit einer um den Faktor 20 höheren Genauigkeit bestätigt.

Der Ausgang eines Experiments, das nicht von der Gravitation abhängt, sollte unabhängig davon sein, zu welcher Zeit und an welchem Ort es ausgeführt wird. Diese Annahme ist als lokale Positionsinvarianz (LPI) bekannt und ein zentraler Bestandteil von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. LPI impliziert auch, dass Naturkonstanten sich zeitlich und räumlich nicht ändern. Allerdings stößt das bisherige Verständnis der Physik an seine Grenzen, zum Beispiel bei der Beschreibung von Dunkler Materie oder dem Ungleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie. Stringtheorien, die sich um eine Beschreibung dieser Phänomene bemühen, sagen Verletzungen der LPI vor,

die sich beispielsweise in Veränderungen von Naturkonstanten manifestieren könnten.

Bekanntete Naturkonstanten sind die Feinstrukturkonstante  $\alpha$ , die die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung beschreibt, und das Massenverhältnis  $\mu$  von Proton und Elektron. Diese Größen gehen in den Aufbau aller Atome und Moleküle ein. Sie beeinflussen die atomaren Energieskalen und damit auch Energieunterschiede zwischen atomaren Zuständen, die in Atomuhren als Referenzfrequenz genutzt werden. Die Empfindlichkeit der Energieunterschiede gegenüber den Naturkonstanten hängt stark vom jeweiligen atomaren System ab. So verändert sich die Frequenz der Cäsium-Uhr, mit der die Basiseinheit der Zeit Sekunde realisiert wird, bei einer Variation von  $\mu$  und von  $\alpha$ . Frequenzen optischer Atomuhren zeigen keine Abhängigkeit von  $\mu$ , können aber zur Detektion von  $\alpha$ -Variationen genutzt werden. Besonders geeignet hierfür erscheint das Ytterbium-Ion, das zwei optische Referenzübergänge mit stark unterschiedlicher Abhängigkeit von  $\alpha$  besitzt. Ein kombinierter Vergleich von Ytterbium- und Cäsium-Uhren erlaubt somit eine Suche nach Veränderungen sowohl von  $\alpha$  als auch von  $\mu$ .

Diesem Ansatz folgend wurden Ytterbium- und Cäsiumuhren der PTB über

einen Zeitraum von mehreren Jahren verglichen. Es zeigte sich, dass Änderungen im Wert von  $\alpha$  ( $\alpha = 0,007297\dots$ ) pro Jahr höchstens ab der 21. Nachkommastelle auftreten können. Dies ist die erste signifikante Verbesserung der Grenze einer möglichen zeitlichen Variation von  $\alpha$  seit über 12 Jahren, mit einer um den Faktor 20 höheren Genauigkeit. Für Änderungen von  $\mu$  wurde das bisherige Limit um den Faktor 2 verbessert. Neben der Einschränkung einer potenziellen zeitlichen Veränderung begrenzen die Daten ebenfalls eine mögliche räumliche Abhängigkeit der Naturkonstanten vom Gravitationspotential der Sonne auf der Erdumlaufbahn. ■

#### Ansprechpartner

Nils Huntemann  
Fachbereich 4.4  
Zeit und Frequenz  
Telefon: (0531) 592-4430  
nils.huntemann@ptb.de

#### Wissenschaftliche Veröffentlichung

R. Lange, N. Huntemann, J. M. Rahm, C. Sanner, H. Shao, B. Lipphardt, Chr. Tamm, S. Weyers, E. Peik: *Improved limits for violations of local position invariance from atomic clock comparisons. Phys. Rev. Lett. 126, 011102 (2021)*

# Hybrides Mikroskop

- Besonders interessant für**
- dimensionelle Messtechnik
  - Hersteller interferometrischer Mikroskope

Die Rasterkraftmikroskopie steht vor der Herausforderung, dreidimensionale Strukturen schnell und präzise zu messen. Diese schnelle Inspektion auf größere Flächen auszudehnen ist Ziel eines neuen hybriden Messsystems. Die Entwicklung der PTB integriert in den Auf-

bau eines interferometrischen optischen Mikroskops eine Rasterkraftmesseinrichtung, die zur Aufnahme eines detaillierten Ausschnitts in den optischen Pfad geschwenkt wird. Die Besonderheit dabei ist, dass der interferometrische



Interferenzstreifen auf einem Cantilever

Messpfad gleichzeitig als Auswerteeinheit des Rasterkraftmikroskops dient. Die Projektion des Interferenzbilds auf

dem Cantilever erfolgt mit einer neuen Bildanalyse, bei der die Position der Interferenzstreifen ausgewertet wird. Das System ist somit einfach in bestehende interferometrische Messgeräte integrierbar. (Technologieangebot 511) ■

**Vorteile**

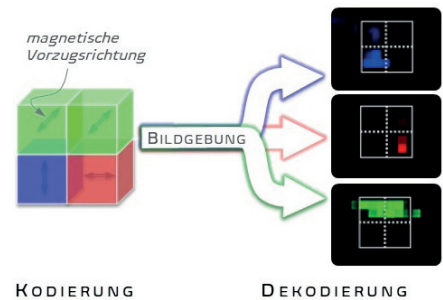
- Erhöhung der dreidimensionalen Auflösung interferometrischer Mikroskope
- Reduzierung der Messzeit
- Nachrüstung in bestehende Systeme

# 3-D-Druck magnetischer Objekte

- Besonders interessant für**
- additive Fertigung
  - Medizintechnik
  - Automobilbranche

Ein neues Konzept aus der PTB für die additive Fertigung (auch 3D-Druck genannt) beschreibt eine zeitsparende, präzise Erzeugung von Bauteilen, die gezielt mit magnetischen Nanopartikeln als Zusatzstoffen angereichert sind. Das Verfahren ermöglicht die schichtweise Erzeugung einer gewünschten magnetischen Anisotropie, die im späteren Produkt latent erhalten bleibt. Der

nichtmagnetische Formkörper erhält eine für die Praxis vorteilhafte magnetische Signatur (eine Vorzugsrichtung, -achse oder -ebene der Magnetisierbarkeit). Mit der Methode konnten erstmals magnetische Referenzmessobjekte hergestellt und mithilfe magnetischer Bildgebungsverfahren erfolgreich abgebildet werden. Sie ermöglicht weitergehende Untersuchungen, etwa zur Fertigung abbildungstreuer medizinischer Modelle (Organe, Gefäße) mit definierten magnetischen Eigenschaften oder zur bauteilindividuellen Kennzeichnung für die additive Fertigung. (Technologieangebot 517) ■



**Vorteile**

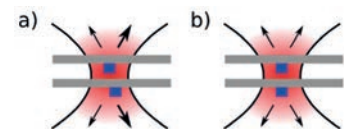
- berührungslose magnetische Messung
- zeitsparende, präzise Herstellung
- direkte Messung der Aufbaurichtung

# Positionsgenaue Markerstrukturen

- Besonders interessant für**
- dimensionelle Messtechnik
  - Fertigungsmesstechnik

In der industriellen Fertigung werden häufig Markerstrukturen genutzt, um die relative Lage zweier Objekte zueinander zu ermitteln. Eine neue Messmethode der PTB hat durch die Kombination von optischem Imaging und Scatterometrie eine Auflösung der räumlichen Überlagerung von unter

1 nm erreicht und ist dabei besonders schnell. Dabei werden die Markerstrukturen in den Fokus eines Lasers gebracht und das von ihnen gestreute Licht auf einer Quadrantendiode detektiert. Bei exakter Überlagerung der Strukturen ergibt sich eine symmetrische Intensitätsverteilung an der Diode. Abweichungen hiervon sind ein genaues Maß für die Güte der Überlagerung. Die Methode lässt sich mit einfachen optischen Komponenten in einen Messprozess integrieren. (Technologieangebot 522) ■



Schematische Darstellung der Signale bei fehlerbehafteter (a) und guter (b) Überlagerung

**Vorteile**

- Auflösung räumlicher Überlagerung < 1 nm
- schnelle Detektion
- einfache Integration

**Ansprechpartner für diese Technologieangebote**

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

## Auszeichnungen

### Felix Witt

Die Masterarbeit von Felix Witt wurde vom Niedersächsischen Forschungszentrum für Luftfahrt (NFL) mit dem Karl-Doetsch-Nachwuchspreis ausgezeichnet. Er hat im Rahmen eines gemeinsamen Projektes zwischen dem Institut für Flugführung (IFF) der TU Braunschweig und dem PTB-Fachbereich 3.4 *Analytische Chemie der Gasphase* ein sehr schnelles Hygrometer für die absolute, laseroptische Messung des Wassergehaltes in der Atmosphäre entwickelt.



## Messverfahren für Wasserstoff

Die PTB und die Salzgitter Flachstahl haben einen Kooperationsvertrag geschlossen, um bereits verfügbare Wasserstoffmengen-Messtechnik zu prüfen und Messverfahren weiterzuentwickeln. Auf dem Gelände der Salzgitter Flachstahl wird die PTB eine Messstrecke zur Prüfung von Messgeräten unter Realbedingungen nutzen. Die Versuche ergänzen die Forschungsaktivitäten der PTB rund um den Einsatz von Wasserstoff, etwa den Aufbau eines Prüfstandes für große Durchflüsse oder die Weiterentwicklung europaweiter Normen und Standards. (Ansprechpartner: Rainer Kramer, 0531 592-1330, rainer.kramer@ptb.de)

## Stromspeicher für Mehrfamilienhäuser

Ein neues Forschungsprojekt mit dem Namen MELANI untersucht, wie sich mehrere Wohnparteien eines Mehrfamilienhauses eine Photovoltaikanlage und einen Stromspeicher teilen können. An dem vom Bundeswirtschaftsministerium mit 2,3 Mio. Euro geförderten Projekt sind die Firmen Naturstrom, SMA Solar Technology AG, das elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme der TU Braunschweig und die PTB beteiligt. Im Fokus stehen die Messtechnik, ein dezentrales Energiemanagement für die teilnehmenden Wohnungsnutzer sowie Abrechnungsprozesse. (Ansprechpartner: Florian Schilling, 0531 592-2350, florian.schilling@ptb.de)

## Corona-Unterstützung

In der Corona-Pandemie unterstützt die Internationale Zusammenarbeit der PTB ihre Partnerländer dabei, ihre Qualitätsinfrastruktur zu stärken, etwa bei der Zertifizierung medizinischer Schutzkleidung, der Kalibrierung von Infrarotthermometern oder der Prüfung von Beatmungsgeräten. In einer interdisziplinären Taskforce arbeiten Expertinnen und Experten daran, virtuelle Arbeitsprozesse zu optimieren, damit die Aktivitäten der PTB auch aus der Distanz umgesetzt werden können. Weitere Informationen: [www.covid19.ptb.de](http://www.covid19.ptb.de) (Ansprechpartnerin: Sabine Thomas, 0531 592-8209, sabine.thomas@ptb.de)



## Studie zur NS-Vergangenheit

In einem dreijährigen Forschungsprojekt, das im Oktober 2020 gestartet ist, lassen die Ressortforschungseinrichtungen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) ihre Vergangenheit während der NS-Zeit und der Nachkriegsepoche erforschen. Die PTB sowie die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) gehen auf Vorgängereinrichtungen zurück, die im 19. Jahrhundert gegründet wurden und auch während der NS-Zeit bestanden.



Das Gelände der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) in Berlin im Jahr 1937

## PTB und DAkkS

Die PTB und die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) haben in einer Verwaltungsvereinbarung den Einsatz von PTB-Mitarbeitenden als Begutachter/innen für die DAkkS neu geregelt. Damit wird

sichergestellt, dass auch unter den veränderten Bedingungen etwa aus der Datenschutzgrundverordnung oder der Revision der DIN EN ISO/IEC 17011 sowie der DIN EN ISO/IEC 17025 weiterhin die Unabhängigkeit und Unparteilichkeit der Begutachtenden sichergestellt ist. (Ansprechpartner: Michael Wolf, 0531 592-9100, michael.wolf@ptb.de)

## Risiken neuer Materialien

In einer neuen behördenübergreifenden Arbeitsgemeinschaft „Advanced Materials“ soll unter der Leitung des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR) ein Expertengremium, darunter auch PTB-Experten, mögliche Gesundheits- und Umweltrisiken von „Advanced Materials“ bewerten. Es soll den zukünftigen Umgang mit den fortschrittlichen Werkstoffen, zu denen auch neue Nanomaterialien zählen, regulatorisch und im Sinne der Risikofrüherkennung beleuchten. Die PTB fokussiert sich dabei auf messtechnische Fragestellungen bei der zuverlässigen Charakterisierung der neuartigen Materialien. (Ansprechpartner: Harald Bosse, 0531 592-5010, harald.bosse@ptb.de)

### Impressum

PTB-News 2/2021, deutsche Ausgabe, April 2021, ISSN 1611-1621

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

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

Herausgeberin: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig und Berlin  
 Redakteure: Andreas Barthel, Alexander Gottwald, Tobias Klein, Christoph Kolbitsch, Christian Lisdat, Hansjörg Scherer, Erika Schow, Jens Simon (verantwortlich)  
 Layout: Volker Käbert, 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)



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