

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.

**FORSCHUNGSNACHRICHTEN**

**Mit weniger Sensordaten mehr erreichen**  
Verbesserte Abschätzung der Messunsicherheit bei interpolierten Messdaten **2**

**Dunkle Materie bleibt „dunkel“**  
Mit optischen Uhren auf der Suche nach Wechselwirkungen zwischen ultraleichter dunkler Materie und Photonen **3**

**Kontrollierte Kollision zweier Elektronen**  
Neuartige Quantenelektronik steuert zeitgenau die Wechselwirkung zwischen einzelnen Elektronen in einem Halbleiterchip **4**

**Neues Beta-Primärnormal**  
Verbesserte Kalibrierung von Betastrahlungsquellen **4**

**Kalibrierungen werden digital**  
Digitales Akkreditierungssymbol und Digitaler Kalibrierschein stehen direkt vor der Einführung in die Praxis **5**

**Neuer Primärmessplatz für Infraschall**  
Rückführbare Kalibrierung von Mikrofonen bis hinunter zu 0,1 Hz **6**

**TECHNOLOGIETRANSFER**

**Ionenfalle mit supraleitender Elektrode** **7**  
**Bestimmung der magnetischen Flussdichte** **7**  
**E-Ladesäulen überprüfen** **7**

**VERSCHIEDENES**

**Auszeichnungen** **8**  
**Deutsch-japanische Kooperation verlängert** **8**  
**KI erklären** **8**  
**IMEKO 2024** **8**

# Klare MRT-Bilder trotz Implantat

## Drahtlose Kommunikation zwischen Implantat und Tomograf verhindert Überhitzung von Gewebe

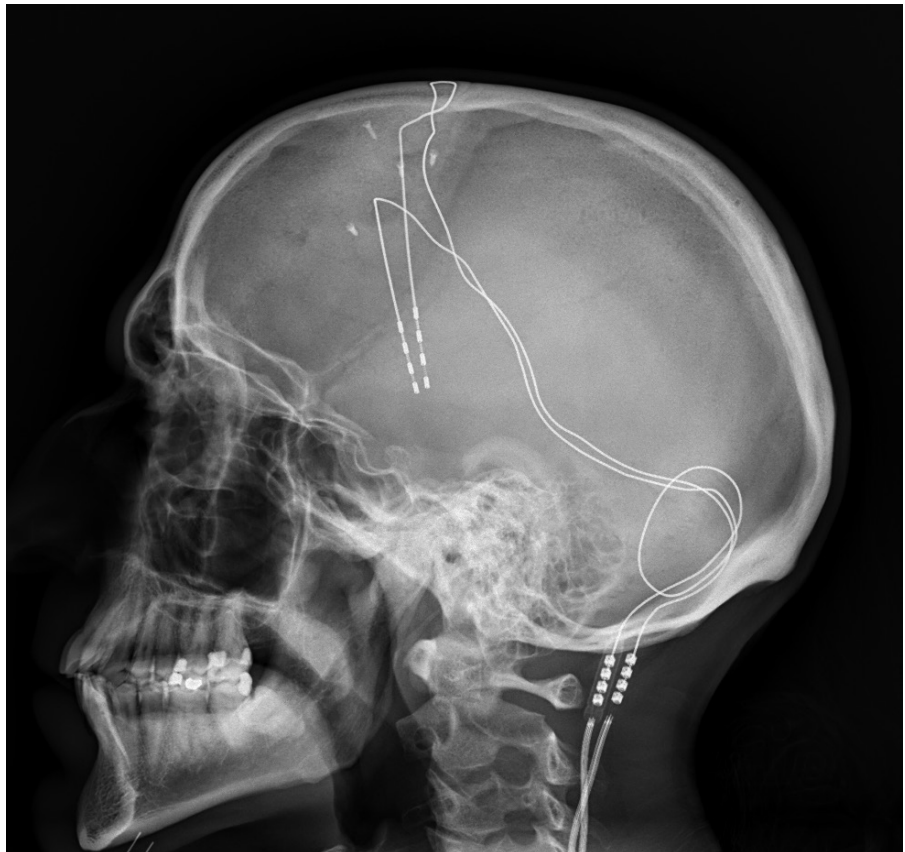
Besonders interessant für

- Bildgebende Diagnostik

Die Magnetresonanztomografie (MRT) ist weltweit das zweithäufigste medizinische Bildgebungsverfahren mit über 100 Millionen Untersuchungen pro Jahr. Allerdings müssen Patienten, die Implantate tragen, oft auf diese lebensrettende Diagnosemöglichkeit verzichten oder eine geringere Bildqualität hinnehmen. Vor allem bei aktiven Implantaten wie Herzschrittmachern und Neurostimulatoren kann eine MRT-Untersuchung zu einer gefährlichen Erwärmung im Körper führen, wenn

sie nicht vorsichtig angewendet wird. In der PTB wurde gezeigt, dass dieses Problem durch drahtlose Kommunikation zwischen Implantat und Magnetresonanztomograf gelöst werden kann.

Etwa 50 Millionen EU-Bürger tragen medizinische Implantate, der Markt für diese Implantate in der EU weist ein Volumen von mehr als drei Milliarden Euro auf. Die Wahrscheinlichkeit, sowohl ein Implantat als auch eine Magnetresonanztomografie zu benötigen, ist in der Altersgruppe der 60- bis 80-Jährigen am höchsten. Angesichts der alternden Be-



Bei Krankheiten wie Parkinson helfen sogenannte Hirnschrittmacher sehr gut. Doch ein solches Implantat kann bei einem MRT-Scan zu gefährlichen Erwärmungen führen. (Röntgenaufnahme; Quelle: Wikimedia Commons)

völkerung wird die Relevanz voraussichtlich weiter zunehmen. Allerdings stellen metallische Implantate im Körper bei der MRT ein Sicherheitsrisiko dar. Dies liegt an der Wechselwirkung des leitfähigen Implantats mit den starken elektromagnetischen Feldern des MRT-Geräts, die zu gefährlicher Gewebeerwärmung führen kann. Der Nachweis der MRT-Sicherheit, insbesondere hinsichtlich der Vermeidung von Erwärmung, ist ein anspruchsvoller und komplexer Prozess, der erhebliche Produkthaftungsrisiken für die Hersteller von Implantaten birgt.

Im Rahmen des STASIS-Projekts der Europäischen Partnerschaft für Metrologie hat die PTB eine wegweisende Lösung entwickelt. Sie besteht aus einem kompak-

ten und kostengünstigen Sensor, der in implantierbare aktive medizinische Geräte (AIMDs) integriert werden kann. Dieser Sensor dient dazu, hochfrequenzinduzierte elektrische Felder direkt am Gerät vor Ort in Echtzeit zu messen. Die erfassten Echtzeitdaten werden drahtlos an den Magnetresonanztomografen übertragen. Er verarbeitet diese Informationen, um die Bildqualität während der Untersuchung zu optimieren, ohne dabei die Sicherheit der Patienten zu beeinträchtigen.

Dieser innovative Ansatz hat das Potenzial, die Anwendung von MRT bei Patienten mit AIMDs zu revolutionieren und Millionen von Menschen zu helfen, die auf diese Technologie angewiesen sind. ■

#### Ansprechpartner

Lukas Winter  
Fachbereich 8.1  
Biomedizinische Magnetresonananz  
Telefon: (030) 3481-7573  
lukas.winter@ptb.de

#### Wissenschaftliche Veröffentlichung

B. Silemek, F. Seifert, J. Petzold, R. Brühl, B. Ittermann, L. Winter: Wirelessly interfacing sensor-equipped implants and MR scanners for improved safety and imaging. Magn. Reason. Med. 90, 2608–2626 (2023)

## Mit weniger Sensordaten mehr erreichen

### Verbesserte Abschätzung der Messunsicherheit bei interpolierten Messdaten

#### Besonders interessant für

- Temperaturmessung
- Koordinatenmesstechnik
- Smart Buildings / IoT für Gebäude
- Kalibrierlabore

**Möchte man die Temperatur an beliebigen Punkten in einem Raum bestimmen, so ist dies mittels Sensornetzwerken und geeigneten Interpolationsverfahren prinzipiell möglich. In der PTB wurde untersucht, wie vertrauenswürdig solche interpolierten Daten sind.**

Dabei kam das nach Daniel G. Krige benannte geostatistische Interpolationsverfahren des Kriging zum Einsatz. Die Tem-

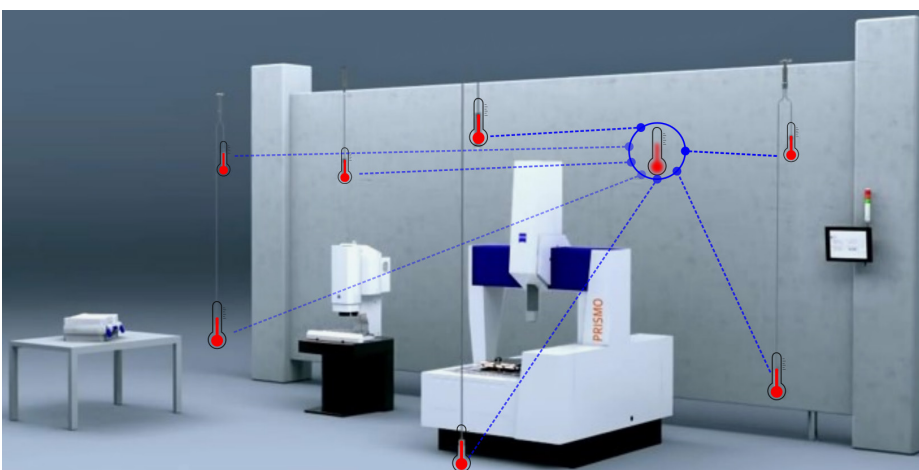
peratur an einem Punkt im Raum, an dem sich kein Sensor befindet, wird als bester linearer Schätzer auf der Basis der an anderen Stellen gemessenen Temperaturen bestimmt. Die interpolierte Temperatur wird dabei als Realisierung einer Zufallsvariablen angesehen, der ein Mittelwert und eine Standardabweichung zugeordnet wird. Die Standardabweichung (bzw. bei sich ändernden Sensordaten deren Mittelwert) kann man als Beitrag der Interpolation zur Unsicherheit der abgeschätzten Temperatur ansehen.

Um darüber hinaus auch die Unsicherheitsbeiträge der Sensoren berücksichtigen zu können, wurde an der PTB eine neue Methode entwickelt: Sind die Mess-

unsicherheiten der einzelnen Sensoren etwa aus Kalibrierungen bekannt, kann deren Einfluss auf die interpolierten Werte mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation bestimmt werden: Die von den Sensoren gelieferten Werte werden zufällig im Rahmen ihrer Messunsicherheit geändert und die Auswirkung auf die interpolierte Zufallsvariable bestimmt. Wird dies sehr oft durchgeführt, kann die durch die Schwankung der Sensordaten verursachte Standardabweichung der interpolierten Temperatur bestimmt werden.

Das neue Verfahren wurde am Beispiel eines klimatisierten Laborraums demonstriert, in dem sich zwei Koordinatenmessgeräte befinden. Im Raum sind 24 Platin-Widerstandsthermometer zur Überwachung räumlicher und zeitlicher Temperaturschwankungen verteilt. Die interpolierten Werte und deren Unsicherheiten hängen wie erwartet am stärksten von denen des nächstgelegenen Sensors ab; in der Regel weisen Werte in der Nähe eines Sensors eine geringere Unsicherheit auf. Es konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass das Verfahren zur Erkennung unerwünschter Wärmequellen eingesetzt werden kann.

Das Verfahren ist nicht auf Temperaturmessungen beschränkt, sondern auch auf Sensornetze für beliebige andere Messgrößen anwendbar. Es wurde bewusst allgemein gehalten und kann unter ande-



Schematische Darstellung des Messraums mit einigen Sensoren. Mithilfe des neuen Verfahrens können Temperaturen und deren Unsicherheiten an beliebigen Stellen auf Basis lokaler Sensordaten geschätzt werden.

rem auch genutzt werden, wenn Sensoren unterschiedlicher Qualität gemeinsam zum Einsatz kommen. Neben der räumlichen ist auch eine zeitliche Interpolation möglich, um fehlende Messwerte abzuschätzen, was eine robuste Reaktion bei möglichen Sensorausfällen sicherstellt. ■

#### Ansprechpartner

Anupam Vedurmudi  
Fachbereich 9.4  
Metrologie für die digitale Transformation  
Telefon: (0531) 592-9413  
anupam.vedurmudi@ptb.de

#### Wissenschaftliche Veröffentlichung

A. P. Vedurmudi, K. Janzen, M. Nagler, S. Eichstaedt: Uncertainty-aware temperature interpolation for measurement rooms using ordinary Kriging. Meas. Sci. Technol. 34, 064007 (2023)

## Dunkle Materie bleibt „dunkel“

### Mit optischen Uhren auf der Suche nach Wechselwirkungen zwischen ultraleichter dunkler Materie und Photonen

#### Besonders interessant für

- Physikalische Grundlagenforschung

**Kann dunkle Materie mit Photonen wechselwirken und die Atomstruktur beeinflussen? Ein Vergleich zweier verschiedener Typen optischer Atomuhren der PTB verbesserte bisherige experimentelle Nachweisgrenzen für eine mögliche Kopplung um mehr als eine Größenordnung und über einen weiten Bereich möglicher Massen der dunklen Materie-Teilchen. Deren Beschaffenheit und mögliche Wechselwirkungen konnten damit weiter eingegrenzt werden, auch wenn noch kein entsprechender Nachweis gelungen ist.**

Astronomische Beobachtungen weisen auf die Existenz sogenannter dunkler Materie hin, die mehr als 80 % der gesamten Materie ausmacht und, soweit bisher bekannt, nur über Gravitation mit der uns bekannten, sichtbaren Materie wechselwirkt. Insbesondere wurde bisher keine Wechselwirkung mit Photonen nachgewiesen – daher auch die Bezeichnung „dunkel“ für diesen Typ Materie.

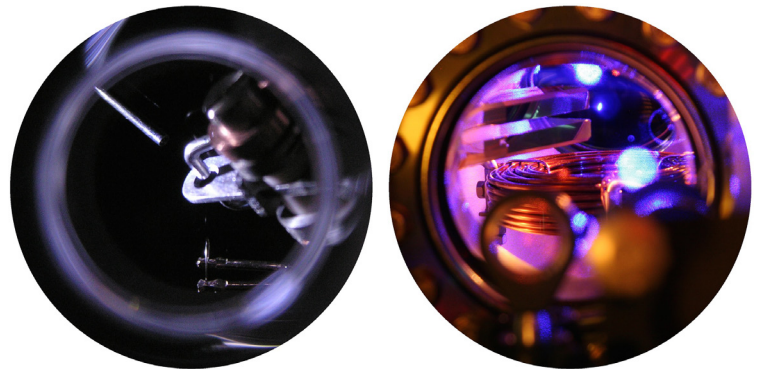
Ein vielversprechender theoretischer Ansatz besagt, dass dunkle Materie aus Teilchen bestehen könnte, die extrem leicht sind und sich nicht wie einzelne Teilchen, sondern wie eine Welle verhalten: sogenannte ultraleichte dunkle Materie. In diesem Fall würden bisher unentdeckte, schwache Wechselwirkungen der dunklen Materie mit Photonen zu kleinsten Oszillationen der Feinstrukturkonstanten führen. Die Feinstrukturkonstante beschreibt die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung. Sie legt die atomaren Energieskalen fest und beeinflusst damit auch die Übergangsfrequenzen, die in Atomuhren als Referenz genutzt werden.

Da verschiedene Übergänge unterschiedlich empfindlich auf mögliche Änderungen der Konstanten reagieren würden, können Vergleiche von Atomuhren für die Suche nach ultraleichter dunkler Materie genutzt werden. Erstmals wurde eine Atomuhr, die besonders empfindlich gegenüber möglichen Änderungen der Feinstrukturkonstanten ist, in einer solchen Suche eingesetzt.

Sie wurde über mehrere Monate mit zwei anderen Atomuhren von geringerer Sensitivität in Messungen verglichen. In den Messdaten wurden Oszillationen gesucht – die Signatur der ultraleichten dunklen Materie. Da keine signifikanten Oszillationen gefunden wurden, blieb dunkle Materie „dunkel“. Durch die Abwesenheit eines Signals konnten neue experimentelle Obergrenzen für die Größe einer möglichen Kopplung von ultraleichter dunkler Materie an Photonen bestimmt werden. Bisherige Limits wurden in einem weiten Bereich um mehr als eine Größenordnung verbessert. Auch eine mögliche Änderung der Feinstrukturkonstante wurde in den Daten nicht detektiert, jedoch bestehende Limits verschärft.

Im Gegensatz zu bisherigen Uhrenvergleichen wurden hier zwei der drei Atomuhren in einem einzigen experimentellen Aufbau realisiert. Dafür wurden zwei unterschiedliche Übergangsfrequenzen

eines einzelnen, gefangenen Ions verwendet: Das Ion wurde abwechselnd auf den beiden optischen Übergängen abgefragt. Damit ist ein wichtiger Schritt gelungen, um optische Frequenzvergleiche noch kompakter und robuster zu gestalten – zum Beispiel für eine zukünftige Suche nach dunkler Materie im Weltall. ■



Für die Suche nach dunkler Materie wurden drei Atomuhren verglichen: Zwei davon nutzen unterschiedliche Übergänge in demselben  $\text{Yb}^+$ -Ion, das in einer Einzelionenfalle gespeichert wird (links). Die dritte Atomuhr verwendet ca. 1000 neutrale Strontiumatome in einem optischen Gitter (rechts).

#### Ansprechpartner

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

#### Wissenschaftliche Veröffentlichung

M. Filzinger, S. Dörscher, R. Lange, J. Klose, M. Steinel, E. Benkler, E. Peik, C. Lisdat, N. Huntemann: Improved limits on the coupling of ultralight bosonic dark matter to photons from optical atomic clock comparisons, Phys. Rev. Lett. 130, 253001 (2023)

# Kontrollierte Kollision zweier Elektronen

## Neuartige Quantenelektronik steuert zeitgenau die Wechselwirkung zwischen einzelnen Elektronen in einem Halbleiterchip

### Besonders interessant für

- Physikalische Grundlagenforschung
- Quanten- und Nanotechnologie

Das gezielte Aufeinandertreffen einzelner Photonen oder Elektronen eröffnet eine empfindliche Messmethode, um deren gegenseitige Beeinflussung untersuchen und kontrollieren zu können. Durch diese Reduktion auf einzelne scharfe Signalimpulse lassen sich die Auflösung von Messungen verbessern und neue Bauteile für die Quanteninformationsverarbeitung schaffen. In nanostrukturierten Halbleiterschaltungen können zwei Elektronen einzeln auf sich kreuzenden Signalleitungen ballistisch geführt werden, um so ihre Wechselwirkung zur Steuerung oder Abtastung elektrischer Signale einzusetzen. Die grundlegende Funktion eines solchen nichtlinearen Schaltungselements wurde von drei unabhängigen Forschungsteams, jeweils angeführt von NEEL (F), NPL (UK) und PTB, in unterschiedlichen, sich ergänzenden Realisierungen demonstriert.

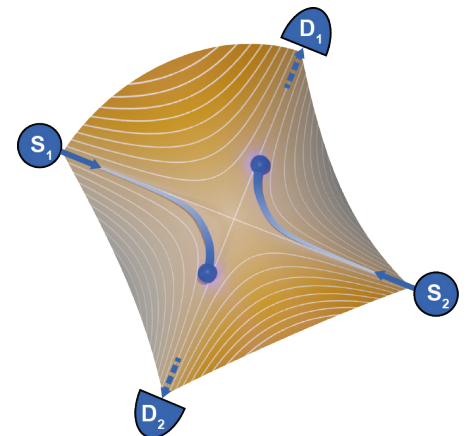
Elektrischen Strom auf der Basis einzelner Ladungsträger in elektrischen Schaltungen zu manipulieren und zu kontrollieren, stellt eine große Herausforderung dar, weil elektrische Impulse die Schaltung aufgrund der kleinen Strukturgrößen in sehr kurzen Zeitspannen durchqueren. Durch gezielte Kollision einzelner Elektronen in geeigneten Schaltungen kann der Elektronenstrom jedoch mit hoher Zeitauflösung abgetastet werden. Die Funktionsweise einer solchen Elektronen-

kollisionsschaltung ähnelt dem Versuch, ein sich schnell bewegendes Projektil mit einem weiteren Schuss zu treffen.

Zur Realisierung einer derartigen Schaltung hat die PTB einen Halbleiterchip entwickelt. Darauf integriert sind Elektronenquellen, die einzelne Elektronen kontrolliert auf der Zeitskala von Pikosekunden aussenden können, sowie Detektoren, die einzelne Elektronen erfassen können. Diese Komponenten sind Teil eines „Elektronikbaustens“ für Schaltungen, in denen einzelne Elektronen, die sich ballistisch und getrennt von allen übrigen bewegen, gesteuert werden können. Überkreuzen sich die jeweiligen Pfade eines von zwei getrennten Quellen erzeugten Elektronenpaares in einer Kollisionsregion auf dem Chip, ist deren Wechselwirkung ausschlaggebend dafür, welches Elektron welchen der unterschiedlichen Signalausgänge erreicht. Die gleichzeitige Ankunft der Elektronen in der Kollisionsregion, die sogenannte Koinzidenz, und die Erfassung jedes einzelnen Elektrons nach dem Durchqueren der Schaltung, die Korrelation der „Klicks“ der Detektoren in den Signalausgängen, verleihen dieser Methode der Koinzidenzkorrelation eine hohe Genauigkeit und hohe zeitliche Auflösung.

Obwohl die Elektronen sich nur für einen sehr kurzen Moment begegnen, konnte die PTB in Zusammenarbeit mit der Universität Lettland auf diese Weise zeigen, dass einzelne ballistische Elektronen kontrolliert zu einer deutlichen Wechselwirkung gebracht werden können, deren Stärke verschiedene Anwendungen im Bereich der Quantentechnologien ermög-

licht. Dazu zählen neuartige ultraschnelle elektronische Sensoren oder Schalter sowie die Erzeugung quantenmechanisch verschränkter elektronischer Zustände als Träger von Quanteninformationen für Quantencomputer. ■



Simulation der elektronischen Kollisionsschaltung: Zwei Elektronenquellen (S1, S2) senden zeitgleich ununterscheidbare Elektronen auf entgegengerichteten Bahnen aus. Deren Bewegung im Potential eines elektronischen Strahlteilers kann aufgrund gegenseitiger Wechselwirkung genau gesteuert werden. Das Ergebnis wird von zwei Detektoren (D1, D2) erfasst, die die Ankunft eines einzelnen Elektrons feststellen können.

### Ansprechpartner

Niels Ubbelohde  
Fachbereich 2.5  
Halbleiter und Magnetismus  
Telefon: (0531) 592-2534  
niels.ubbelohde@ptb.de

### Wissenschaftliche Veröffentlichung

N. Ubbelohde et al.: Two electrons interacting at a mesoscopic beam splitter. Nat. Nanotechnol. 18, 733 (2023)

# Neues Beta-Primärnormal

## Verbesserte Kalibrierung von Betastrahlungsquellen

### Besonders interessant für

- Strahlenschutz in Medizin und Industrie

Eine neue primäre Messeinrichtung der PTB macht die Kalibrierung von Betastrahlungsquellen effizienter und genauer.

Betastrahlung wird in der Medizin für Diagnose und Therapie eingesetzt, beispielsweise als radioaktive Markierung der Tracer in der Positronen-Emissions-Tomografie (PET). In der Industrie wird sie beispielsweise zur Kontrolle von geringen Materialschichtdicken im Mik-

rometer- bis wenige Millimeter-Bereich verwendet, da sie eine relativ geringe Durchdringungsfähigkeit besitzt (z. B. im Vergleich zu Röntgenstrahlung). Für das betroffene Personal ist es wichtig, dass die Dosisgrenzwerte eingehalten werden, insbesondere die der Haut. Um Betastrah-

lungsquellen hochgenau zu kalibrieren, also die abgestrahlte Dosisleistung genau zu vermessen, betreibt die PTB seit mehr als 30 Jahren ein Primärnormal (BPS1).

In den letzten Jahren hat die PTB ein verbessertes Beta-Primärnormal (BPS2) entwickelt, das effizientere Kalibrierungen ermöglicht. Es verfügt über einen Absorberwechsler, sodass die gesamte Kalibrierung einer Betastrahlungsquelle in einem automatischen Messablauf durchgeführt werden. Zudem ist die genaue Geometrie der Messkammer dadurch kontrollierbar, dass die Plan-Parallelität ihrer räumlichen Abmessungen erstmalig mess und einstellbar ist. Das ermöglicht es, detailliertere Untersuchungen zur Anwendbarkeit von Korrekturfaktoren durchzuführen.

In der ISO-6980-Normenreihe zu Beta-Referenzstrahlungsfeldern wurden in den vergangenen Jahren verbesserte Methoden zur Bestimmung von Korrekturfaktoren eingebracht. Die sich daraus ergebenden Werte wurden auf das alte und das neue Beta-Primärnormal der PTB angewendet. Die Ergebnisse der beiden Normale stimmten im Mittel auf etwa  $\pm 1\%$  überein, was innerhalb der statistischen Un-



Die neu entwickelte Messkammer der PTB mit Quellenhalterung und Strahlungsfilter davor (links); ein Absorber auf dem Weg vor die Kammer (Mitte); Absorbermagazin (rechts)

sicherheiten liegt. Dies ist eine deutliche Verbesserung gegenüber der Anwendung der bisherigen Ausgabe der ISO 6980 aus den Jahren 2004/2006. Bei deren Verwendung betragen die Abweichungen im Mittel zwar auch nur bis zu 1,7 %, jedoch treten einzelne Extremwerte bis zu knapp 5 % auf, während diese Extremwerte bei Verwendung der aktualisierten Normenreihe maximal 2,5 % betragen.

Die PTB bezieht sich seit Mitte 2023 auf die revidierte ISO 6980 und auf das neue Beta-Primärnormal BPS2. ■

**Ansprechpartner**

Rolf Behrens  
 Fachbereich 6.3  
 Strahlenschutzdosimetrie  
 Telefon: (0531) 592-6340  
 rolf.behrens@ptb.de

**Wissenschaftliche Veröffentlichung**

R. Behrens: New Beta Primary Standard (BPS2) and revised ISO 6980 at PTB. Metrologia 60, 045005 (2023)

**Die Normenreihe**

ISO 69801-1, ISO 69801-2, ISO 69801-3: Reference betaparticle radiation (2023)

# Kalibrierungen werden digital

## Digitales Akkreditierungssymbol und Digitaler Kalibrierschein stehen direkt vor der Einführung in die Praxis

**Besonders interessant für**

- Kalibrierlaboratorien
- Industrie 4.0

Nach einer erfolgreichen Pilotphase können ab Ende März 2024 akkreditierte Kalibrierlaboratorien das digitale Akkreditierungssymbol beantragen und damit digital nachweisen, dass sie akkreditiert sind. Zusammen mit dem von der PTB entwickelten Digitalen Kalibrierschein kann es als maschinenlesbarer, manipulationssicherer und verifizierbarer Kalibriernachweis dienen und letztlich den Papier-Kalibrierschein ablösen.

In der Industrie 4.0 müssen alle beteiligten Maschinen schnell, reibungslos und störungssicher kommunizieren. In diese digitale Kommunikationskette muss sich auch der Nachweis einreihen, dass ein Messgerät von einer autorisierten Stelle und mit Erfolg kalibriert wurde. Zwei entscheidende Elemente dieses Nachweises

haben die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) und die PTB in eine digitale Form überführt und praxisreif gemacht: den Nachweis, dass die kalibrierende Stelle von der DAkkS akkreditiert worden ist (das digitale Akkreditierungssymbol) und den Nachweis, dass das Messgerät kalibriert wurde: Letzteres ist der von der PTB entwickelte Digitale Kalibrierschein (Digital Calibration Certificate, DCC). Erst durch die Kombination dieser beiden Elemente wurde die vollautomatische Verarbeitung als „eAttestation“ möglich.

Die eAttestation wurde über mehrere Monate getestet. Die teilnehmenden Pilotbetriebe bewerteten den Umgang mit ihr als schnell, einfach und nützlich. Damit ist der Weg frei für die endgültige Überführung in die Praxis: Akkreditierte Stellen können das digitale Akkreditierungssymbol ab dem 30. März 2024 bei der DAkkS beantragen.

Das digitale Akkreditierungssymbol basiert auf einem elektronischen Siegel,

einer Art Firmenstempel mit zusätzlichen Akkreditierungsinformationen. Es ermöglicht den korrekten Nachweis einer Akkreditierung im digitalen Raum. Entsprechend ermöglicht der Digitale Kalibrierschein den korrekten, störungssicheren, maschinenlesbaren Transfer der Kalibrierergebnisse. Auf dieser Basis lassen sich zukünftig automatisierte und



Die Kombination des Digitalen Kalibrierscheins (DCC) der PTB mit dem Akkreditierungssymbol der DAkkS ist ein Beitrag zur umfassenden Automatisierung von Produktionsprozessen.

vernetzte Produktionsprozesse und deren Qualitätssicherung realisieren. Dies ermöglicht Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen im Prozessablauf.

PTB und Deutscher Kalibrierdienst (DKD) werden die Harmonisierung der Inhalte des DCC weiterführen. Damit leisten die Expertengremien im DKD einen Beitrag, um die Qualitätssicherung „Made in Germany“ auch im internationalen Kontext weiter bekannt und erfolgreich nutzbar zu machen.

Das Projekt ist ein wichtiger Baustein der Initiative „QI-Digital.“ Darin arbeiten DAkkS und PTB gemeinsam mit BAM, DIN und DKE an zukunftsfähigen digitalen Lösungen in den verschiedenen Bereichen der Qualitätsinfrastruktur (QI): Messwesen, Normen und Standards, Akkreditierungen, Konformitätsbewertungen und Marktüberwachung. ■

#### **Ansprechpartner**

Siegfried Hackel  
Senior Scientist 1.01  
Digitalisierung in der Abteilung 1  
Telefon: (0531) 592-1017  
siegfried.hackel@ptb.de

Shanna Schönhals  
Fachbereich 1.2  
Festkörpermechanik  
Telefon: (0531) 592-1240  
shanna.schoenhals@ptb.de

Die Initiative QI-Digital im Internet:  
[www.qi-digital.de](http://www.qi-digital.de)

## Neuer Primärmessplatz für Infraschall

### Rückführbare Kalibrierung von Mikrofonen bis hinunter zu 0,1 Hz

#### **Besonders interessant für**

- Akustik
- Energiewende

Für die Messung von Infraschall fehlt bisher eine verlässliche Infrastruktur für die Rückführung von Messgeräten und Sensoren. Als wichtiger Entwicklungsschritt dazu wurde in der PTB ein neuartiger Primärmessplatz für Infraschall aufgebaut, der die Abnahme des Umgebungsluftdrucks mit der Höhe als Anregungssignal nutzt.

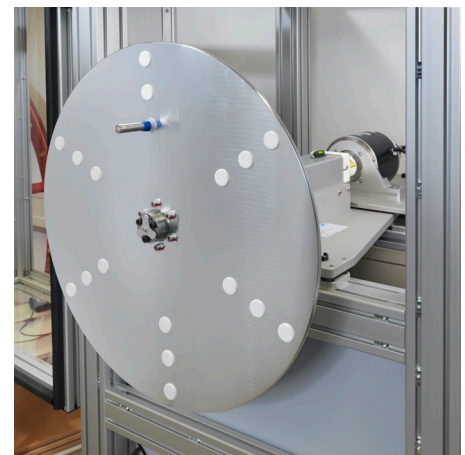
Die zuverlässige Messung und die Beurteilung von Infraschall werden insbesondere im Zusammenhang mit der Energiewende immer wichtiger. Um potenzielle Schallemissionen verlässlich beurteilen zu können, müssen Mikrofone für Schallpegelmessungen verwendet werden, die mithilfe einer primären Methode kalibriert wurden. So ist die Rückführung auf die Schalldruckeinheit Pascal sichergestellt. Doch die etablierten Primärkalibrieremethoden sind im Infraschallfrequenzbereich nur eingeschränkt geeignet.

Daher wurde in der PTB im Rahmen des EMPIR-Projekts Infra-AUV ein Infraschall-Kalibrieraufbau entwickelt, der die Abnahme des Umgebungsluftdrucks mit der Höhe zur Erzeugung eines Referenzsignals nutzt. Ein Prüfling wird dazu auf einer vertikal rotierenden Scheibe montiert und durch die Rotation einer sinusförmigen Höhenänderung ausgesetzt.

Die Amplitude des daraus resultierenden Wechseldrucks ist analytisch aus einfach messbaren Größen wie Umgebungstemperatur, -feuchte und -luftdruck bestimmbar, die Frequenz des Wechseldrucks ergibt sich aus der Rotationsgeschwindigkeit.

Der neue Aufbau deckt einen Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 5 Hz ab, eine Erweiterung bis 10 Hz ist geplant. Damit ist der Anschluss an die etablierte Druckreziprozitätsmethode gegeben, die mit Einschränkungen ab einer Frequenz von 2 Hz aufwärts für die Primärkalibrierung von Mikrofonen einsetzbar ist. Der Frequenzbereich der neuen Methode wird am unteren Ende durch hohe Hintergrundgeräuschpegel begrenzt. Am oberen Ende nimmt das Signal-zu-Rausch-Verhältnis durch einsetzendes Strömungsrauschen infolge der schnellen Bewegung des Mikrofons ab. Die Messunsicherheit für die Bestimmung der Empfindlichkeit geeigneter Mikrofone ist über den gesamten abgedeckten Frequenzbereich kleiner als 0,1 dB.

Die Kalibrierergebnisse aus diesem neuen Messplatz wurden in einem bilateralen Vergleich mit Ergebnissen des Laser-Pistonphons des französischen Metrologieinstitutes Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) verglichen. Die Ergebnisse stimmen überein. Eine weitere Validierung erfolgt im Rahmen des Infra-AUV-Projekts in einem internationalen Ringvergleich. ■



Das Kalibrierprinzip ist bestechend einfach: Das zu prüfende Mikrofon wird auf dieser Scheibe montiert. Sie rotiert vertikal und setzt das Mikrofon dadurch einer sinusförmigen Höhenänderung im Raum aus. Die Geschwindigkeit der Scheibe bestimmt die Tonhöhe.

#### **Ansprechpartner**

Marvin Rust  
Fachbereich 1.6  
Schall  
Telefon: (0531) 592-1427  
marvin.rust@ptb.de

#### **Wissenschaftliche Veröffentlichung**

Marvin Rust et al.: Primary calibration for airborne infrasound utilizing the vertical gradient of the ambient pressure. *Metrologia* 60, 045001 (2023)

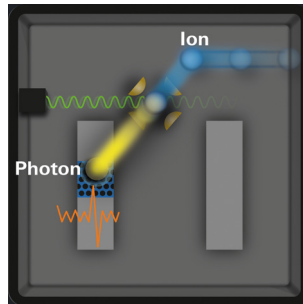
# Ionenfalle mit supraleitender Elektrode

**Besonders interessant für**

- Angewandte Quantentechnologie
- Hersteller von Ionenfallen

Ein Quantencomputer verwendet Qubits für die Ausführung seiner Operationen. Ionenfallen haben sich bisher als eine der besten Möglichkeiten zur Herstellung, Speicherung und Manipulation von Qubits erwiesen. Das PTB-Konzept basiert auf der Integration bisher separater Komponenten: Der Sensor zur Photodetektion und die Fallen-Elektrode, die aus einer supraleitenden Schicht aufgebaut

ist, werden zusammengeführt. Bei Ab-



Die supraleitende Schicht einer Fallen-Elektrode (links) ermöglicht die Photodetektion eines im Fallenpotenzial gefangenen Ions.

sorption eines Photons geht der Supraleiter vom supra- in den normalleitenden Zustand über. Diese Zustandsänderung wird über eine Widerstandsmessung detektierbar. Die Idee ermöglicht einen vereinfachten Aufbau von Ionenfallen und insbesondere bei einer Serienfertigung eine vereinfachte Herstellung. (Technologieangebot 0545) ■

**Vorteile**

- erhöhte Integrationsdichte
- vereinfachter Aufbau
- keine zusätzlichen optischen Elemente

# Bestimmung der magnetischen Flussdichte

**Besonders interessant für**

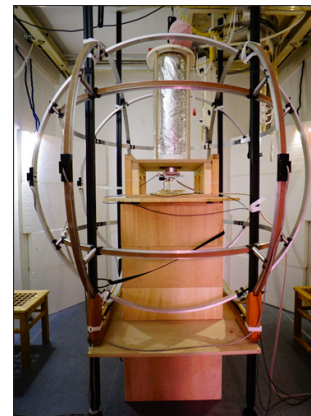
- Magnetometer-Hersteller
- Hersteller von Magnetfeldsensoren

Die Stärke der magnetischen Flussdichte kann hochgenau mit Magnetometern bestimmt werden, die auf dem Prinzip der Kernmagnetresonanzmessung basieren. Ein neues Verfahren eignet sich besonders gut für niedrige Felder innerhalb magnetischer Abschirmungen. Dabei werden hyperpolarisierte Proben verwendet und mindestens zwei Rabi-

Zyklen mit jeweils unterschiedlichen Anregungsfrequenzen angeregt. Das neue Verfahren erlaubt in kürzerer Zeit eine ähnlich genaue Feldbestimmung wie eine deutlich längere Einzelmessung, ohne den Zustand der Hyperpolarisation zu zerstören. (Technologieangebot 0548) ■

**Vorteile**

- kürzere Messzeiten
- hohe Genauigkeit
- schnelle Wiederholbarkeit



3-achsiges Helmholtzspulensystem und Magnetresonanzdetektor im geschirmten Raum zur Vermessung der magnetischen Flussdichte

# E-Ladesäulen überprüfen

**Besonders interessant für**

- Eichbehörden, staatlich anerkannte Prüfstellen
- Konformitätsbewertungsstellen
- Hersteller von Ladeeinrichtungen

Wenn eine E-Ladesäule nicht ins Labor kommen kann, dann kommt das Labor zur E-Ladesäule. Das elektrische Ladesäulen-Inspektionssystem (ELVIS) ist ein vollausgestattetes Labor, das unabhängig von Ort und Wetter jede installierte E-Ladeeinrichtung mobil genau unter die Lupe nehmen kann. Dazu stellt

ELVIS Prüftechnik für Ladeeinrichtun-



Mobiles Prüflabor ELVIS

gen mit einstellbaren Spannungs- und Stromprüfpunkten und sehr hoher Leistungsaufnahme bereit. Hierfür ist die Kombination rückspeisefähiger Gleichstrom-Lasten mit einer parallelgeschalteten resistiven Last innovativ umgesetzt, um auf die mobilen Anforderungen zu reagieren. (Technologieangebot 0574) ■

**Vorteile**

- dynamische Einstellung der Prüfpunkte
- vergleichsweise leichte und kostengünstige Kombination
- Prüfung hoher Ladeleistungen von bis zu 100 kW

**Ansprechpartner für diese Technologieangebote**

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

## Auszeichnungen

### Frank Lienesch

Der Leiter der Abteilung 9 *Gesetzliche und internationale Metrologie* hat in der OIML (Internationale Organisation für Gesetzliches Messwesen) den deutschen Vorsitz im „International Committee of Legal Metrology“ (CIML) von Roman Schwartz übernommen.



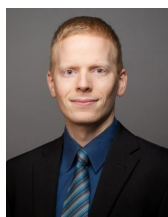
### Roman Schwartz

Der ehemalige Vizepräsident der PTB und seit 2017 Präsident des *International Committee of Legal Metrology* (CIML) wurde auf der 58. CIML-Sitzung in Chiang-Mai, Thailand, am Ende seiner sechsjährigen Amtszeit mit der OIML-Ehrenmitgliedschaft sowie der OIML-Medaille in Anerkennung seiner langjährigen Verdienste um die OIML geehrt.



### Marko Esche

Der Mitarbeiter im Fachbereich 8.5 *Metrologische Informationstechnik* wurde auf der 58. CIML-Sitzung in Chiang-Mai, Thailand, in Anerkennung seiner hervorragenden Leistung als Koordinator der Projektgruppe „Revision des OIML-Dokuments D 31 Softwareanforderungen an gesetzlich geregelte Messgeräte“ mit einem „OIML Letter of Appreciation“ geehrt.



### Thomas Gerster

Der Wissenschaftler im Fachbereich 2.5 *Halbleiterphysik und Magnetismus* (und inzwischen auch zusätzlich im *Quantentechnologie-Kompetenzzentrum* der PTB) hat für seine Promotionsarbeit „Entwicklung und Validierung von Einzelelektronenpumpen auf Basis von GaAs/AlGaAs-Quantenpunkten für ein Quantenstromnormal“ den Quantum Future Award (2. Platz) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) erhalten. Der Preis ist mit 4000 Euro Reisemitteln dotiert.



### Rainer Kramer

Der am 1.7.2023 in den Ruhestand getretene ehemalige Mitarbeiter im Fachbereich 1.4 *Gas* wurde auf der 58. CIML-Sitzung in Chiang-Mai, Thailand, in Anerkennung seiner Leistungen als langjähriges Mitglied des technischen Komitees TC 8/SC 7 *Gas Metering* sowie der Arbeit in der WELMEC Arbeitsgruppe 11 *Utility meters* mit einem „OIML Letter of Appreciation“ geehrt.



## Deutsch-japanische Kooperation verlängert

Nach einer erfolgreichen Begutachtung kann das deutsch-japanische Zentrum für Zeit, Konstanten und fundamentale Symmetrien (TCFS) in seine zweite fünfjährige Amtszeit starten. Es wird die Zusammenarbeit zwi-

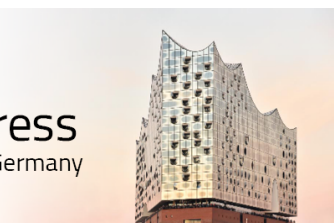
schen deutschen und japanischen Instituten weiter stärken. Die internationalen Expertinnen und Experten entwickeln empfindlichste Instrumente für grundlegende Messungen in der Atom- und Kernphysik, der Antimaterie- und Dunkle-Materie-Forschung, der Quantenoptik und der Metrologie. Beteiligt sind die Max-Planck-Institute für Kernphysik (MPIK) und für Quantenoptik (MPQ), die japanische Spitzenforschungseinrichtung RIKEN und die PTB. (Ansprechpartner: Ekkehard Peik, 0531 592-4400, ekkehard.peik@ptb.de)

## KI erklären

Künstliche Intelligenz, meist in Form neuronaler Netze, wird bereits häufig eingesetzt, um Empfehlungen für menschliche Entscheidungen und Entscheider auszusprechen oder die Entscheidungen gleich selbst zu treffen. Doch die Kriterien, die einer Entscheidung zugrunde liegen, bleibt für Nutzerinnen und Nutzer oft undurchschaubar. Dem Bedürfnis entsprechend, KI erklärbar zu machen, ist unter Beteiligung der PTB eine Vornorm zu erklärbarer KI entstanden. (DIN SPEC 92001-3: [www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-92001-3/369799101](http://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-92001-3/369799101); Ansprechpartner: Stefan Haufe, 030 3481-7284, stefan.haufe@ptb.de)



**IMEKO 2024**  
XXIV World Congress  
26–29 August 2024 | Hamburg, Germany



Für den großen Weltkongress der Internationalen Messtechnischen Konföderation (IMEKO) vom 26. bis 29 August in Hamburg können Sie noch bis zum 31. Januar Ihr Paper einreichen. Dieselbe Deadline gilt für die Einreichung von Arbeiten für den Helmholtz-Preis, der dann auf dem IMEKO-Weltkongress

verliehen wird. (Nähere Informationen zum IMEKO-Weltkongress: [imeko2024@ptb.de](mailto:imeko2024@ptb.de), <https://www.imeko2024.org>. Nähere Informationen zum Helmholtz-Preis: <https://www.helmholtz-fonds.de/helmholtzpreis/teilnahme-ausschreibung-2024>)

**Impressum**  
PTB-News 1/2024, deutsche Ausgabe, Januar 2024, 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  
Herausgeber: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig und Berlin  
Redakteure: Andreas Barthel, Martin Götz, Alexander Gottwald, Tobias Klein, Christian Lisdat, Norbert Löwa, 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 Klimaschutz.