

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

### Treibhauseffekt genau messen

Neues Referenznormal für die Messung der von der Atmosphäre emittierten Infrarotstrahlung **2**

### Normale für Rastersondenmikroskope

Prozessanlage für die effiziente Herstellung kristalliner Normale **3**

### Mit Xenon auf der Suche nach Biomarkern

Substanzmengen erstmals ohne Referenzmaterial quantitativ bestimmt **3**

### Frequenzlineal für Phasenrauschmessungen

Ein Femtosekundenlaser ermöglicht Messungen bei Trägerfrequenzen bis 100 GHz **4**

### Kalibrierung von digitalen Elektrizitätszählern

Verifikation von abtastenden Elektrizitätszählern **5**

### Neue Partikelzähler für die AU

PTB erteilt die ersten drei Baumusterprüfungen für Kfz-Abgasuntersuchungen **6**

## TECHNOLOGIETRANSFER

Stabile Spiegel für die Druckmessung **7**  
 Differenzielles Gradiometer **7**  
 Flexibel einsetzbarer optischer Verstärker **7**

## VERSCHIEDENES

Ämter und Auszeichnungen **8**  
 Mehr Flächen für Windenergie an Land **8**  
 QI-Digital **8**  
 Eine optische Atomuhr für die Praxis **8**

# Optische Atomuhr mit hochgeladenen Ionen

Eine Uhr mit völlig neuen Teilchensystemen erlaubt neue Einblicke in fundamentale Physik

### Besonders interessant für

- Zeit- und Frequenzmetrologie
- Grundlagenforschung

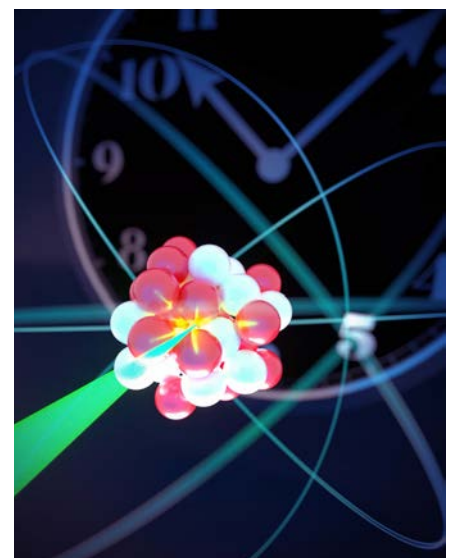
Optische Atomuhren sind die genauesten je gebauten Messgeräte und inzwischen zu einer Schlüsseltechnik in der Grundlagen- und der angewandten Forschung geworden, etwa zum Test der Konstanz von Naturkonstanten oder für Höhenmessungen in der Geodäsie. Am QUEST-Institut in der PTB wurde in einer Kooperation und im Rahmen des Exzellenzclusters QuantumFrontiers zum ersten Mal eine optische Atomuhr realisiert, die auf hochgeladenen Ionen basiert.

Hochgeladene Ionen sind im Kosmos weit verbreitet, etwa in der Sonne oder anderen Sternen. Sie haben viele Elektronen verloren und weisen daher eine hohe positive Ladung auf. Ihre verbliebenen äußeren Elektronen sind daher besonders stark am Atomkern gebunden. Deshalb reagieren hochgeladene Ionen weniger stark auf Störungen durch äußere elektromagnetische Felder, können aber als empfindliche Sonden für fundamentale Effekte der speziellen Relativitätstheorie, der Quantenelektrodynamik und des Atomkerns dienen. In der Kooperation des QUEST-Institutes in der PTB mit dem Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) Heidelberg und der TU Braunschweig konnte daher eine wichtige Frage der Grundlagenphysik geklärt werden: Erstmals konnte der quantenelektrodynamische Kernrückstoß, eine wichtige theoretische Vorhersage, in einem Mehrelektronen-System nachgewiesen werden.

Aufgrund ihrer speziellen Atomstruktur kann man hochgeladene Ionen

nicht direkt mit Laserlicht kühlen, und auch übliche Detektionsverfahren sind nicht anwendbar. Dies wurde gelöst, indem ein einzelnes hochgeladenes Argon-Ion aus einem heißen Plasma isoliert und zusammen mit einem einfach geladenen Beryllium-Ion in einer Ionenfalle gespeichert wurde. Das erlaubt es, das hochgeladene Ion mithilfe des Beryllium-Ions indirekt zu kühlen und zu untersuchen. Für die folgenden Experimente wurde ein kryogenes Fallensystem gebaut. Anschließend gelang es mithilfe eines Quantenalgorithmus, das hochgeladene Ion noch weiter zu kühlen, nämlich nahe an den quantenmechanischen Grundzustand, was einer Temperatur von 200 millionstel Kelvin oberhalb des absoluten Nullpunkts entspricht.

Jetzt wurde eine optische Atomuhr basierend auf dreizehnfach geladenen Argon-Ionen realisiert und das Ticken mit der bestehenden Ytterbium-Ionen-Uhr an der PTB verglichen. Dazu musste das System sehr genau charakterisiert wer-



Laser-Spektroskopie an einem hochgeladenen Ion

den, um beispielsweise die Bewegung des hochgeladenen Ions und Effekte äußerer Störfelder zu verstehen. Dabei wurde eine relative Messunsicherheit von  $2 \cdot 10^{-17}$  erreicht, was vergleichbar mit vielen aktuell betriebenen optischen Atomuhren ist. Weitere technische Verbesserungen sollte die neue Uhr in den Bereich der besten Atomuhren bringen.

Die angewandten Methoden sind universell einsetzbar und erlauben es, viele verschiedene hochgeladene Ionen zu

untersuchen. Darunter fallen auch atomare Systeme, mit denen man nach Erweiterungen des Standardmodells der Teilchenphysik suchen kann. Ausgewählte hochgeladene Ionen sind besonders empfindlich gegenüber eventuellen

Änderungen der Feinstrukturkonstante und gegenüber bestimmten Kandidaten dunkler Materie, die in Modellen jenseits des Standardmodells gefordert werden, aber mit bisherigen Methoden nicht nachgewiesen werden konnten. ■

#### **Ansprechpartner**

*Piet O. Schmidt*  
QUEST-Institut in der PTB  
Telefon: (0531) 592-4700  
[piet.schmidt@quantummetrology.de](mailto:piet.schmidt@quantummetrology.de)

#### **Wissenschaftliche Veröffentlichung**

*S. A. King, L. J. Spieß, P. Micke et al: An optical atomic clock based on a highly charged ion. Nature 611, 43–47 (2022)*

## Treibhauseffekt genau messen

### Neues Referenznormal für die Messung der von der Atmosphäre emittierten Infrarotstrahlung

#### **Besonders interessant für**

- Meteorologie
- Umwelt- und Klimaforschung

Innerhalb der europäischen Forschungsprojektserie „Metrology for Earth Observation and Climate“ wurde ein neuer Referenz-Schwarzkörper entwickelt: der „Hemispherical Blackbody“.

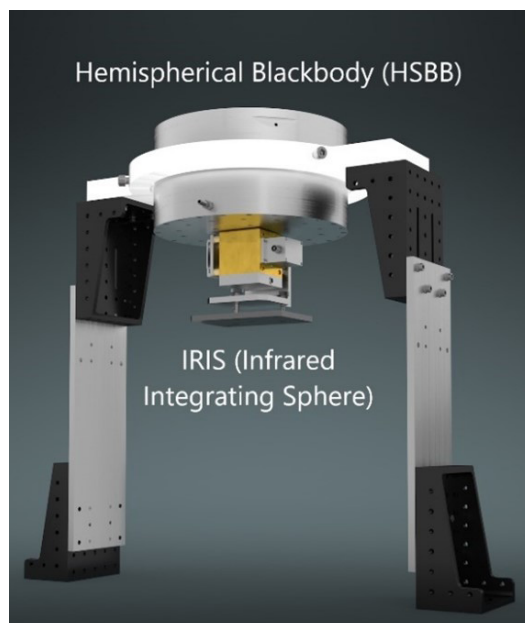
Die von der Atmosphäre in Richtung der Erde emittierte Infrarot-Strahlung (die atmosphärische Gegenstrahlung) wird weltweit von zahlreichen Messstationen kontinuierlich gemessen. Sie ist ein Maß für die Stärke des Treibhauseffektes, dessen Zunahme die Ursache für den Klimawandel ist. Die Messungen der atmosphärischen Gegenstrahlung werden typischerweise mit Pyrgeometern durchgeführt. Das sind spektral breitbandige Infrarot-Detektoren mit einem hemisphärischen Akzeptanzwinkel. Um langfristig die Aussagekraft und Vergleichbarkeit der Messdaten sicherzustellen, müssen diese Pyrgeometer regelmäßig kalibriert, d. h. messtechnisch auf Normale rückgeführt werden.

Der neue Referenz-Schwarzkörper, der Hemispherical Blackbody (HSBB), wurde von der PTB in Kooperation mit dem Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos / World Radiation Center (PMOD/WRC) entwickelt. Der HSBB erfüllt die speziellen Anforderungen an diese Kalibrierungen und

ist über die Strahlungstemperaturskala der PTB auf die Internationale Temperaturskala ITS-90 und damit auf das Internationale Einheitensystem (SI) rückführbar. Die Ergebnisse von Vergleichsmessungen mit dem am PMOD/WRC befindlichen Schwarzkörper-Normal, einer etablierten Referenz für die Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung, zeigen eine sehr gute Übereinstimmung innerhalb einer Unsicherheit von  $0,5 \text{ W/m}^2$ . Die typischen Unsicherheiten der Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung liegen derzeit im Bereich von  $5 \text{ W/m}^2$ . Als Transfernormal für den Vergleich wurde unter anderem ein Infrared Integrating Sphere-Instrument genutzt.

Während die bisherige Rückführung am PMOD/WRC auf Kontaktthermetrie und optischen Simulationen beruht, ermöglichen der HSBB und die Vergleichsmessungen eine zweite unabhängige Art der Rückführung. Gleichzeitig stellt die beobachtete Übereinstimmung in den Bestrahlungsstärke-Skalen von PMOD/WRC und PTB eine Vali-

dierung der bisherigen Rückführung dar. Diskrepanzen, die es bei den weltweiten Messungen der atmosphärischen Gegenstrahlung bisher gab und die in der Unsicherheit berücksichtigt wurden, können nun ausgeräumt und die Unsicherheit bei der Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung verkleinert werden. ■



Der neu entwickelte HSBB zusammen mit einem Transfernormal

#### **Ansprechpartner**

*Moritz Feierabend*  
Fachbereich 73  
Detektorradiometrie und  
Strahlungsthermetrie  
Telefon: (030) 3481-7610  
[moritz.feierabend@ptb.de](mailto:moritz.feierabend@ptb.de)

#### **Wissenschaftliche Veröffentlichung**

*M. Feierabend, J. Gröbner, I. Müller, M. Reiniger, C. Monte: Bilateral comparison of irradiance scales between PMOD/WRC and PTB for longwave downward radiation measurements. Metrologia, akzeptiert (2022)*

# Normale für Rastersondenmikroskope

Prozessanlage für die effiziente Herstellung kristalliner Normale

## Besonders interessant für

- Fertigungsmesstechnik
- Hersteller von Rasterkraftmikroskopen
- Anwender in Industrie und Forschung

Eine neu entwickelte Prozessanlage in der PTB ermöglicht es, gleichzeitig mehrere kristalline Normale aus Silizium für die Kalibrierung von Rastersondenmikroskopen herzustellen. Damit können die hochwertigen Normale schneller und kostengünstiger als zuvor angeboten werden.

Seit einigen Jahren arbeitet die PTB an sogenannten kristallinen Normalen für die dimensionelle Kalibrierung. Bei ihnen wird das Kristallgitter des Siliziums als eine Art „natürliches Lineal“ genutzt, um Abstände unterhalb von 100 nm mit sehr hoher Genauigkeit messen zu können. Mit kristallinen Normalen können eine sehr viel höhere Auflösung (ca. 0,3 nm) mit sehr viel kleineren Unsicherheiten (ca. 0,03 nm) erreicht werden als mit herkömmlichen Normalen, die jeweils um mehr als den Faktor 10 schlechter abschneiden.

Ein Vorteil kristalliner Normale ist deren inhärente Rückführung: Die Atome

im Silizium haben immer den gleichen Abstand, der daher nicht mehr aufwendig mit speziellen, metrologisch rückgeführten Geräten gemessen werden muss. Somit können die Normale vergleichsweise günstig angeboten werden, sofern viele von ihnen gleichzeitig und reproduzierbar hergestellt werden können.

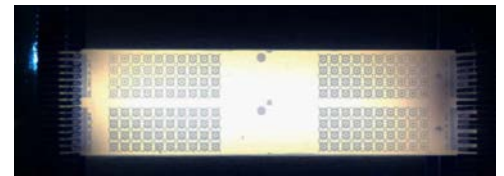
Zu diesem Zweck wurde an der PTB eine neue Anlage entwickelt, um den Herstellungsprozess solcher Normale besser kontrollieren zu können. Bereits nach kurzer Einfahrzeit der Anlage konnten mehr Proben auf einmal und größere Proben als bisher produziert werden. Die Ausbeute, also die Anzahl der funktionsfähigen Chips, ist mehr als doppelt so hoch wie früher und liegt aktuell bei vier gleichzeitig prozessierten Proben pro Durchlauf. Gleich im ersten Versuch konnten Proben mit kristalliner Oberfläche und monoatomaren Stufen hergestellt werden. Auch das zweite Ziel, nämlich die relevanten Prozessbedingungen besser kontrollieren zu können, wurde erfüllt, sodass jetzt auch grundlegende Fragestellungen etwa zur nutzbaren Fläche und möglichen Stufenhöhen bearbeitet werden können.

Mit dieser Anlage ist es möglich, neue Proben für Anwender in ausrei-

chender Stückzahl bereitzustellen und so die Weitergabe der Normale aus dem metrologischen Labor in die Anwendung in Industrie und Laborpraxis zu ermöglichen. Als nächstes sollen die Herstellung im Hinblick auf Prozessausbeute und Durchsatz weiter optimiert, die Auswertung der Mikroskopmessungen für die Nutzer automatisiert sowie nationale und internationale Normen für deren Anwendung erarbeitet werden. ■

## Ansprechpartner

Ingo Busch  
 Fachbereich 5.1  
 Oberflächenmesstechnik  
 Telefon: (0531) 592-6136  
 ingo.busch@ptb.de



Vergrößerter Probenhalter für die simultane Prozessierung von bis zu acht Normalen (vier gezeigt). Aufgrund der Probentemperatur von mehr als 1000° C strahlen die Proben Licht im sichtbaren Bereich ab. Die Leuchtstärke ist ein Hinweis auf die Temperaturverteilung in der Probe, wobei ein möglichst großer homogener Bereich angestrebt wird.

# Mit Xenon auf der Suche nach Biomarkern

Substanzmengen erstmals ohne Referenzmaterial quantitativ bestimmt

## Besonders interessant für

- Medizintechnik
- biomedizinische Forschung

Mithilfe hyperpolarisierten Xenons lassen sich per Magnetresonanzverfahren molekulare Stoffe sehr empfindlich und genau nachweisen. In der PTB wurde ein neuer Lösungsansatz entwickelt, um solche Messungen auch quantitativ auswertbar zu machen. Das neue Verfahren ist referenzprobenfrei und plattformunabhängig.

Der Nachweis von Biomarkern, also bestimmten Proteinen oder Zellen, die auf Krankheiten hindeuten, nimmt in der biomedizinischen Forschung sowie der klinischen Versorgung eine immer wichtigere Rolle ein. Die eingesetzten Messverfahren müssen sehr empfindlich und genau sein. Nutzt man Magnetresonanz (MR) mithilfe von hyperpolarisiertem Xenon, lassen sich Biomarker in vitro in nanomolaren Konzentrationen nachweisen. So lässt sich zum Beispiel die Antwort des Immunsystems auf Krankheitserreger untersuchen.

Das Edelgas Xenon wird hyperpolari-

siert, um es leichter per Magnetresonanz detektierbar zu machen. Dabei werden die magnetischen Momente der Xenon-Atome hochgradig ausgerichtet, ähnlich kleinen Magnetnadeln im Magnetfeld. Infolgedessen werden die gemessenen MR-Signale von Xenon verstärkt, und selbst sehr geringe Mengen können detektiert werden. Zudem ist Xenon für die Suche nach Molekülen gut geeignet, denn die Xenon-Atome können zwischen einem freien und einem an das Zielmolekül gebundenen Zustand hin und her wechseln (Xenonaustausch). Mithilfe sogenannter MR-Sättigungstransfertechniken kann

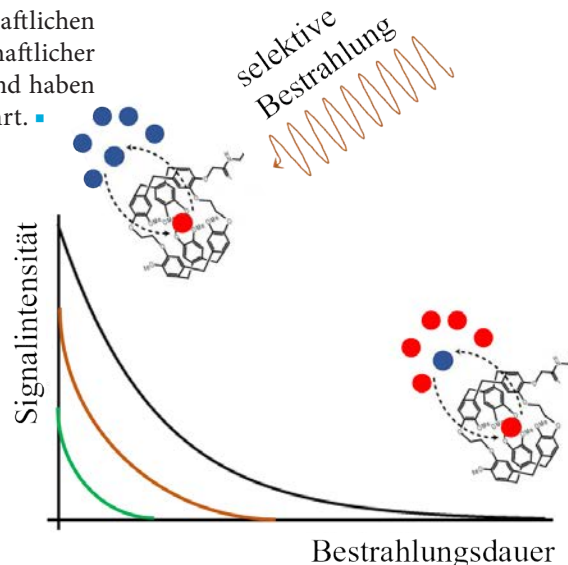
dann der Bindungspartner (das Zielmolekül) sehr empfindlich nachgewiesen werden. Allerdings ließ sich bisher die Menge der Bindungspartner nicht quantitativ analysieren, da die Hyperpolarisation nicht exakt wiederholbar ist und der Sättigungstransfer durch die Austauschdynamik bestimmt wird. Damit ist ein direkter Signalvergleich mit Referenzmaterialien nicht mehr aussagekräftig.

In der PTB wurde deshalb ein neuartiger Ansatz entwickelt, der den Xenonaustausch gezielt nutzt. Der Sättigungstransfer wird mehrmals mit jeweils leicht veränderten experimentellen Parametern wiederholt, und aus den Messungen lässt sich die Menge der Bindungspartner berechnen. Dazu wird kein Referenzmaterial benötigt, und das Messverfahren läuft auf jedem Messgerät gleich ab. Es ist somit referenzprobenfrei und plattformunabhängig. Das neue Verfahren ist in der PTB an dem Xenon-bindenden Molekül Cryptophan-A, das zusätzlich auch das interessierende Zielmolekül binden kann, etabliert worden. Dieser Biosensor soll zum quantitativen Nachweis von Biomarkern in der diagnostischen und therapeutischen Verfahrensentwicklung eingesetzt werden.

Die Arbeiten werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung durch die Maßnahme „Validierung des

technologischen und gesellschaftlichen Innovationspotentials wissenschaftlicher Forschung – VIP+“ gefördert und haben zu einer Patentanmeldung geführt. ■

- 0,8 bar / 2,5  $\mu\text{T}$
- 0,4 bar / 10  $\mu\text{T}$
- 0,02 bar / 75  $\mu\text{T}$



Ein in seinem magnetischen Moment ausgerichtetes Xenonatom (rot) ist an das Molekül Cryptophan-A gebunden, umgeben von mehreren freien, aber gleich ausgerichteten – also genauso hyperpolarisierten – Xenonatomen (blau). Wird nur das gebundene Xenonatom mit Radiowellen bestrahlt, nimmt sein magnetisches Moment eine neue Ausrichtung an, das heißt, die Gleichausrichtung mit dem freien Xenon geht verloren. Dieser Verlust an Gleichausrichtung (Hyperpolarisation) wird über den sogenannten Xenonaustausch nach und nach auf die freien Xenonatome (blau) transferiert, sodass deren Signal über die Bestrahlungsdauer abnimmt. Je nach Wahl der Experimentparameter Xenondichte und Bestrahlungsamplitude ändern sich Ausgangsintensität und Rate der Abnahme, was die quantitative Analyse ermöglicht.

#### Ansprechpartner

Lorenz Mitschang  
 Fachbereich 8.3  
 Biomedizinische Optik  
 Telefon: (030) 3481-7632  
 lorenz.mitschang@ptb.de

#### Wissenschaftliche Veröffentlichung

L. Mitschang, S. Korchak, W. Kilian, T. Riemer: *Comprehensive quantitative and calibration-free evaluation of hyperpolarized Xenon-host interaction by multiparametric NMR. Analytical Chemistry*, 94, 2561–2568 (2022)

# Frequenzlineal für Phasenrauschmessungen

Ein Femtosekundenlaser ermöglicht Messungen bei Trägerfrequenzen bis 100 GHz

#### Besonders interessant für

- Hochfrequenz-Messtechnik
- Quantentechnologie

Um das Phasenrauschen hochfrequenter Signale zu messen, wird das zu untersuchende Signal in der Regel mit einem rauscharmen Referenzsignal gleicher Frequenz verglichen. An der PTB wurde ein System entwickelt, das Messungen von Mikrowellensignalen mit Frequenzen von bis zu 100 GHz auf einem mit herkömmlichen Methoden nicht erreichbar niedrigen Rauschniveau ermöglicht. Dafür sorgt ein „Frequenzlineal“ im Mikrowellenbereich, das mithilfe eines Femtosekundenla-

sers erzeugt wird und aus einer Vielzahl äquidistanter, extrem rauscharmer Referenzsignale besteht.

Bei kommerziellen Phasenrauschmessplätzen wird das benötigte Referenzsignal intern durch einen Oszillator erzeugt, der über einen weiten Frequenzbereich abstimmbar ist. So wird die Messung durch den Frequenzbereich des Referenzoszillators (typischerweise nur einige Gigahertz) und durch sein Rauschen beschränkt. Bei dem neuen System werden die Messsignale extern aus dem hohen GHz-Bereich vor der Phasenrauschmessung in den MHz-Bereich konvertiert. Dafür wird eine phasenrauscharme Komponente des Frequenzlineals genutzt. Das Ergebnis erlaubt eine Phasenrauschmes-

sung mit einem viel geringeren Eigenrauschen des Messsystems.

Ausgenutzt wird, dass sich mit modengekoppelten Femtosekunden-Pulslasern das extrem niedrige Phasenrauschen optischer Dauerstrichlaser auf die Repetitionsrate des Pulslasers von wenigen hundert Megahertz übertragen lässt. Wird diese Repetitionsrate mit einer Fotodiode detektiert, entsteht aufgrund der kurzen optischen Pulse ein Kamm von Oberwellen der Repetitionsrate. Jede Frequenzkomponente dieses Kamms weist nahezu die Stabilität des Referenzsignals auf. Die Breite des so erzeugten elektrischen Frequenzkamms ist durch die Bandbreite der Fotodiode begrenzt. Kommerziell verfügbar sind Fotodioden mit Bandbreiten von bis zu 100 GHz. Für die Phasen-

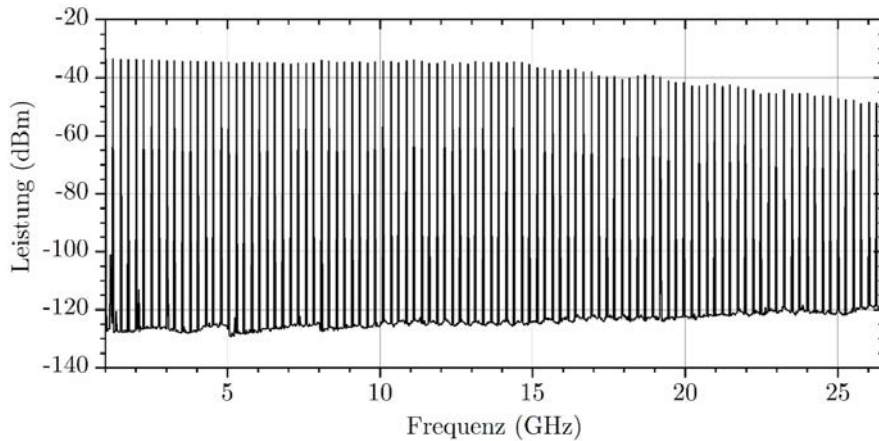
rauschmessung wird nun diejenige Frequenzkomponente aus dem elektrischen Kamm herausgefiltert, die der Frequenz des zu vermessenden Signals am nächsten ist. Durch Mischen beider Frequenzen wird ein Signal im MHz-Bereich erzeugt und mit einem rauscharmen, niederfrequenten Phasenrauschmess-

platz spezifiziert.

In einem ersten Demonstrationsexperiment wurde statt der Anbindung des Frequenzkamms im optischen Frequenzbereich eine Anbindung an in der PTB verfügbare besonders rauscharme Referenzsignale bei 100 MHz und bei 9,6 GHz gewählt. Es wurde gezeigt, dass

das geringe Rauschen dieser Referenzsignale auf alle Komponenten des Mikrowellenkamms übertragen wurde.

Ein solches System kann zukünftig zur Durchführung von Kalibrierungsdienstleistungen für Hochfrequenz-Oszillatoren bis in den Millimeter-Wellenbereich verwendet werden. ■



Mikrowellenfrequenzkamm am Ausgang einer Fotodiode mit 16 GHz Bandbreite. Der Abstand zwischen den „Zinken“ ist exakt gleich und beträgt rund 250 MHz.

**Ansprechpartner**  
 Burghard Lipphardt  
 Fachbereich 4.4  
 Zeit und Frequenz  
 Telefon: (0531) 592-4428  
 burghard.lipphardt@ptb.de

**Wissenschaftliche Veröffentlichung**  
 P. Walkemeyer, B. Lipphardt, M. Kazda: Referenced frequency ruler for the phase noise analysis of oscillators in the high GHz range. 2021 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS) 404-407 (2021)

# Kalibrierung digitaler Elektrizitätszähler

## Verifikation von abtastenden Elektrizitätszählern

### Besonders interessant für

- Metrologieinstitute
- Kalibrierlaboratorien
- Hersteller von Elektrizitätszählern

Um die Stabilität zukünftiger elektrischer Verteilungs- und Übertragungsnetze zu gewährleisten, werden echtzeitfähige Steuerungs- und Überwachungssysteme benötigt. Dazu gehört auch eine metrologisch bewertete Messtechnik für die präzise und zeitlich hochaufgelöste Erfassung der Energieflüsse, die für die Abrechnung von Energiekosten relevant sind. Die dafür erforderliche Messtechnik kann zukünftig auf digitalen, also abtastenden („Sampled Value“, SV-) basierten Technologien beruhen, wobei die zugehörigen Hochspannungssensoren und die nachgeschaltete Messelektronik zeitlich hochgenau synchronisiert sein müssen. Für die Verifikation der SV-basierten Elektrizitätszähler hat die PTB einen Messaufbau entwickelt, der auf einem

als Kalibrator dienenden SV-Protokoll-generator beruht.

Die PTB ist in Deutschland zuständig für die metrologische Rückführung von Messgeräten in Hochspannungsnetzen. Sie stellt sicher, dass die übertragene Energie durch entsprechende Messgeräte richtig erfasst wird, indem sie Messgeräte auf nationale Normale rückführt.

Der neu entwickelte Kalibrieraufbau

beruht auf einen SV-Generator, der es erlaubt, emulierte hohe Wechselspannungen (oder -ströme) zeitlich synchronisiert und normgerecht gemäß Netzwerkprotokoll IEC 61850-9-2 LE an einen zu verifizierenden Elektrizitätszähler zu übertragen. Dabei sind die Abstraten, also die zeitlichen Auflösungen der abgetasteten Messwerte, zwischen 4000 und 14 400 Samples pro Sekunde durch das Netzwerkprotokoll vorgegeben. Im Kali-



Neu entwickelter SV-Generator der PTB (links) und ein über Ethernetkabel angeschlossener kommerzieller Energiezähler (rechts)

brieraufbau für SV-basierte Messgeräte ersetzt der Generator dann die digitalen Messwandler.

Die Software zur Steuerung des SV-Generators umfasst im Wesentlichen die Funktion der SV-Kurvenform-erzeugung, die Ablaufsteuerung des Messprotokolls und die Leistungs- bzw. Energieberechnung. Die erzeugten Spannungs- und Stromsignale bilden dabei den Leistungs- und Energiefluss eines Dreiphasen-Netzes nach. Daraus werden Referenzleistung und -energie für die Kalibrierung berechnet.

Derzeit bereitet die International Electrotechnical Commission (IEC) eine spezielle Norm für digitale Elektrizitätszähler vor (IEC TS 62053-25 ED1). Für die Ausarbeitung eines Prüfplans für einen zu kalibrierenden Elektrizitätszähler hat die PTB daher zunächst die bereits existierende Norm IEC 62053-22 für

statische elektronische Wirkverbrauchs-zähler der Genauigkeitsklassen 0,1 S bis 0,5 S herangezogen. Unter Verwendung des neu entwickelten Aufbaus konnte damit ein erster verfügbarer kommerzieller digitaler Energiezähler der Genauigkeitsklasse 0,2 S eines europäischen Herstellers bei der Netzfrequenz von 50 Hz, einer Nennspannung von 100 kV und bei einem Nennstrom von 1000 A getestet werden. Die gemäß erarbeitetem Prüfplan durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass die Messabweichungen des Energiezählers für die Messgröße „Wirk-

energie“ eine Größenordnung unterhalb der Toleranzgrenzen liegen, die durch die Genauigkeitsklasse des Zählers definiert ist.

Im Hinblick auf die zu erwartende Änderung der Normungslage in den nächsten Jahren wird der Messplatz diesen zukünftigen Anforderungen stetig angepasst. Darüber hinaus wird in näherer Zukunft die effizientere Auslesung der Zählerstandsdaten mittels einer optischen Schnittstelle in die Bewertung übernommen. ■

#### **Ansprechpartner**

*Enrico Mohns  
Fachbereich 2.3  
Elektrische Energiemesstechnik  
Telefon: (0531) 592-2300  
enrico.mohns@ptb.de*

#### **Wissenschaftliche Veröffentlichung**

*Y. Chen, E. Mohns, M. Seckelmann, S. de Rose: Precise amplitude and phase determination using resampling algorithms for calibrating Sampled Value instruments. Sensors 20, 7345 (2020)*

## Neue Partikelzähler für die AU

### PTB erteilt die ersten drei Baumusterprüfungen für Kfz-Abgasuntersuchungen

#### **Besonders interessant für**

- AU-Prüfstellen
- Hersteller von Partikelzählern
- Automobilhersteller
- Eichbehörden

Diesel-Kfz müssen spätestens ab dem 1. Juli 2023 im Rahmen ihrer nächsten Abgasuntersuchung (AU) nachweisen, dass sie weniger als 250 000 Partikel pro Kubikzentimeter Abgas ausstoßen. Um diesen Grenzwert verlässlich zu messen, werden Partikelzähler benötigt, die für diese spezielle Messung ausgelegt sind. Ihr Messbereich muss zur Partikelgröße, zur Partikelkonzentration und zu den Eigenschaften von Diesel-Abgas passen, und sie müssen auf die spezielle Testprozedur im Rahmen der Abgasuntersuchung in den Werkstätten abgestimmt sein. Inzwischen hat die Konformitätsbewertungsstelle (KBS) der PTB die ersten drei dieser aufwendigen Baumusterprüfungen abgeschlossen.

Die Messung der Partikelanzahlkonzentration im Diesel-Abgas fällt in Deutschland unter das Mess- und Eichgesetz. Die Messgeräte müssen hierzu spezielle Anforderungen erfüllen. Beispielsweise müssen sie manipulations-sicher arbeiten, stabil und robust sein gegenüber Störungen und natürlich „richtig“ messen. Diese Anforderungen werden in Deutschland einzig von der KBS der PTB im Rahmen einer Baumusterprüfung an einem repräsentativen Gerät geprüft und dokumentiert. Dabei wird beispielsweise geprüft, ob die maximal zulässigen Fehlergrenzen eingehalten werden oder ob das Gerät schnell genug messen kann. Ebenfalls wird überprüft, ob die Geräte auch in heißer oder kalter Umgebung einwandfrei arbeiten oder ob elektromagnetische Störungen – etwa durch Handys – einen Einfluss auf den Messwert haben können.

Die wesentlichen Anforderungen an diese Partikelzähler stehen in der Mess- und Eichverordnung. Die Details zu deren Konkretisierung sind in PTB-Anfor-

derungen festgehalten, die in den letzten Jahren unter Beteiligung aller relevanten Kreise (Vertreter zuständiger Ministerien, der Bundesanstalt für Straßenwesen, Prüforganisationen, Hersteller- und Verwenderverbände, Eichbehörden, PTB) erstellt wurden. Sie wurden im Mai 2021 veröffentlicht.

Die ersten drei Messgeräte haben alle erforderlichen Prüfungen bestanden und ihre Baumusterprüfbescheinigungen erhalten. Weitere Messgeräte sind noch in der Prüfung. ■

#### **Ansprechpartnerin**

*Sonja Pratzler  
Fachbereich 3.4  
Analytische Chemie in der Gasphase  
Telefon: (0531) 592-3440  
sonja.pratzler@ptb.de*

#### **Die PTB-Anforderung**

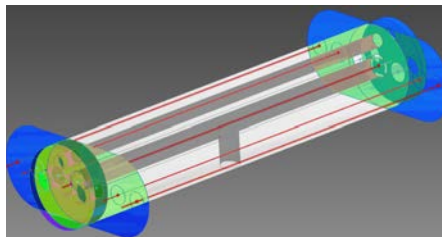
*PTB-Anforderung 12.16 „Partikelzähler“, Ausgabe Mai 2021,  
<https://oar.ptb.de/resources/show/10.7795/510.20210623>,  
DOI 10.7795/510.20210623*

# Stabile Spiegel für die Druckmessung

## Besonders interessant für

- Hochpräzisionstechnik
- Kalibrierlaboratorien
- nationale Metrologieinstitute

Über die Refraktivität reiner Gase lassen sich vorzugsweise Drücke im Bereich von 1 Pa bis 100 kPa mit höchster Genauigkeit messen. Hierfür wurde in der PTB ein spezieller Fabry-Perot-Resonator entwickelt, dessen Spiegel zur Minimierung der Deformation in einem speziellen Design angeordnet sind. Die Konstruktion



Designzeichnung des Multiresonators zur höchstpräzisen Messung der Gaseigenschaften

beruht darauf, die Resonatorspiegel möglichst spannungsfrei beidseitig mit dem gleichen Druck zu beaufschlagen, auch wenn der Druck im Innern der Messka-

vität sich deutlich vom Umgebungsdruck unterscheidet. Somit wird die druckinduzierte Verbiegung der Resonatorspiegel unterdrückt, was für deutlich geringere Deformationen der Resonatoren und entsprechend geringere Unsicherheiten der potenziell primären Druckstandards sorgt. (Technologieangebot 487). ■

## Vorteile

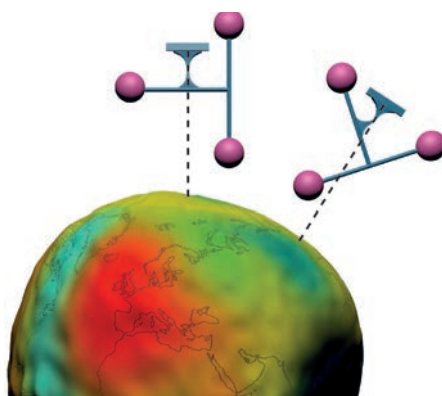
- spannungsfreie Befestigung
- keine Verbiegung der Spiegel
- höchstgenaue Messung und Regelung der Temperatur

# Differenzielles Gradiometer

## Besonders interessant für

- Risikoanalysen bei Bauvorhaben
- Hersteller von Gravimetern

Sensoren zur Untersuchung des Schwerefeldes der Erde werden in vielfältigen Bereichen der Geodäsie, Geophysik und Gravimetrie eingesetzt. Für die Messung von Dichteinhomogenitäten in der Erdoberfläche wurde in der PTB ein differenzielles Gradiometer mit hoher Empfindlichkeit entwickelt. Das als Null-



instrument konzipierte Gradiometer ist insbesondere zur Bestimmung von vertikalen Schweregradienten geeignet, während es gegenüber störenden Einflüssen durch lineare Schweregradienten sowie die absolute Fallbeschleunigung unempfindlich ist. (Technologieangebot 539). ■

## Vorteile

- hohe Empfindlichkeit
- vertikale Sensitivität
- unabhängig von der Fallbeschleunigung

# Flexibel einsetzbarer optischer Verstärker

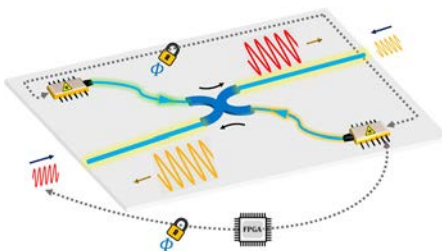
## Besonders interessant für

- Hersteller ultrastabiler optischer Laserquellen
- optische Sensorik
- nationale Metrologieinstitute

Bei der optischen Frequenzübertragung per Glasfaserverbindung über lange Distanzen ist die Kompensation optischer Verluste eine große Herausforderung. Die herkömmlichen optischen Verstärker sind anfällig gegen Rückstreuung und -reflexion, die zu unvermeidlichen

Phasensprünge in dem übertragenen Signal führen. Das neue Konzept der PTB basiert auf einem Brillouin-Verstärker, der eine besonders hohe optische Verstärkung und Schmalbandigkeit auf-

weist. Die Neuentwicklung ermöglicht einen kostengünstigen und flexibel einsetzbaren Aufbau, der relative Frequenztransfer-Unsicherheiten von unter  $10^{-20}$  erlaubt. Der neue Brillouin-Verstärker ist für verschiedene Frequenzbänder geeignet. (Technologieangebot 551). ■



## Vorteile

- kostengünstiges Design
- kontinuierliche Nachverfolgung der Frequenzverschiebung
- flexibler Einsatz

## Ansprechpartner für diese Technologieangebote

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

## Ämter und Auszeichnungen

### Annette Röttger

Die Physikerin ist seit dem 1. Oktober *Mitglied des Präsidiums* der PTB. Davor leitete sie die Abteilung 6 *Ionisierende Strahlung*. Ihre fachlichen Schwerpunkte für ihre neue Tätigkeit als Mitglied des Präsidiums liegen in den für die Zukunft wichtigen Themenfeldern „Sicherheit und Resilienz“ sowie den Schwerpunktthemen „Klima und Umwelt“, „Medizin“ und „Energie“. Annette Röttger engagiert sich zudem für Diversität und Gleichstellung und ist eine Expertin für Veränderungsprozesse. In ihrer neuen Rolle wird sie sich im besonderen Maße um nationale und europäische Forschungsprogramme kümmern und aktiv bei EURAMET e.V. mitarbeiten.



### Tobias Schäffter

Der Leiter der Abteilung 8 *Medizinphysik und metrologische Informationstechnik* wurde am 27. Oktober zum Mitglied in die Deutsche Akademie für Technikwissenschaften (acatech) gewählt. Die von Bund und Ländern geförderte nationale Akademie sieht sich als Stimme der Technikwissenschaften im In- und Ausland. Sie berät Politik und Gesellschaft in technikkissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen.



### Thomas Fedke

Der Wissenschaftler im Fachbereich 1.6 *Schall* hat den IEC 1906 Award erhalten. Damit würdigt die Internationale Elektrotechnische Kommission seine Tätigkeit in nationalen und internationalen Normungsgremien.



### Christoph S. Aigner

Der Wissenschaftler im Fachbereich 8.1 *Biomedizinische Magnetresonanz* wurde auf dem Erwin L. Hahn Workshop im Oktober in Essen für seine Veröffentlichung „Calibration-free pTx of the human heart at 7 T via 3D universal pulses“ mit dem „International Erwin L. Hahn



Award“ in der Kategorie „Body“ ausgezeichnet. Bereits im Mai war er zum „Junior Fellow of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine (ISMRM)“ ernannt worden. Er erhielt die Ernennungsurkunde „as a young researcher of outstanding quality and promise“ vom Präsidenten der Gesellschaft auf der diesjährigen Jahrestagung in London.

## Mehr Flächen für Windenergie an Land



Seit dem 1. August 2022 hat die DFS Deutsche Flugsicherung GmbH ihre Anlagenschutzbereiche rund um Drehfunkfeuer verkleinert. So wird weiteres Potenzial für mehr Flächen für Windenergieanlagen in Deutschland geschaffen und ein wichtiger Beitrag zur Energiewende geleistet. Wesentliche Aspekte hatte die PTB im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Forschungsprojekts WERAN (Wechselwirkung Windenergieanlagen und Radar/Navigation) entwickelt: Darin hatte ein von der PTB mit Messtechnik ausgestatteter Oktokopter Messdaten in verschiedenen Höhen und Entfernungen rund um Windkraftanlagen erfasst. Die ermittelten Daten hatten zu einer neuen Abstands-Berechnungsformel für Windkraftanlagen geführt. (Ansprechpartner: Thorsten Schrader, 0531 592-1010, thorsten.schrader@ptb.de)

## QI-Digital

In einer zunehmend digitalisierten Welt muss auch die Qualitätssicherung neu gedacht werden, als Grundvoraussetzung für die digitale und grüne Transformation der Wirtschaft. In der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) ins Leben gerufenen Initiative QI-Digital suchen die zentralen Akteure der deutschen Qualitätsinfrastruktur (QI) gemeinsam mit interessierten Stakeholdern aus Wirtschaft und Forschung neue Lösungen für eine mo-

derne Qualitätssicherung. Beim QI-Digital Forum im Oktober wurden die Herausforderungen und Möglichkeiten für die Qualitätssicherung diskutiert und Lösungsansätze sowie die Pilotprojekte aus der Initiative QI-Digital vorgestellt. Zuvor war ein Beirat gewählt worden, dem Expertinnen und Experten aus Unternehmen und Verbänden, Vertreterinnen und Vertreter aus Forschungseinrichtungen und Behörden sowie Akteure der QI angehören.

(Ansprechpartner: Jens Niederhausen, 0531 592-9414, jens.niederhausen@ptb.de)

## Eine optische Atomuhr für die Praxis

In einem internationalen Forschungsprojekt namens AQUa („Advanced Quantum Clock for Real-World Application“) soll in 3,5 Jahren eine optische Atomuhr basierend auf neutralen Atomen entstehen, die sehr genau und robust zugleich ist. Sie kann dann ohne aufwendige Laboraufbauten und ohne den Einsatz von Atomuhrspezialisten im Praxisalltag genutzt werden, etwa wenn Geodäten die Erhöhung des Meeresspiegels aufgrund der Klimaerwärmung messen wollen. Die EU fördert das Projekt mit 7,5 Mio Euro. Neben der PTB sind an dem Projekt acht weitere Partner aus Metrologieinstituten, Universitäten und der Industrie aus sechs Ländern beteiligt. Die Koordination liegt bei der Universität Amsterdam. (Ansprechpartner: Christian Lisdat, 0531 592-4320, christian.lisdat@ptb.de)

### Impressum

PTB-News 1/2023, deutsche Ausgabe, Januar 2023, 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, 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 Klimaschutz.