

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.

Magnetischer Blick durch die Schädeldecke

Schnelle Gehirnsignale erstmals nichtinvasiv gemessen

FORSCHUNGSNACHRICHTEN

Antiferromagnetische Domänen

Magneto-Seebeck-Mikroskopie erlaubt Einblick in Schaltvorgänge 2

Auf dem Weg zum „Nanometer-Normal“

Ausdehnung und Kompressibilität von einkristallinem Silizium 3

Diodenlaser für die optische Messtechnik

Jodstabilisierte Diodenlaser könnten Gaslaser als Wellenlängennormale ablösen 4

Benchmark für Einzelelektronenschaltkreise

Analyseverfahren für eine universelle Beschreibung der Genauigkeit von Quantenschaltkreisen 4

Strahlenschutz bei Ultrakurzpulslasern

PTB unterstützt Gesetzesänderung mit Messungen an ihrer neuen Ultrakurzpuls-Laseranlage 5

Alterung von Lithium-Schwefel-Batterien

Einblick in atomare Vorgänge bei verschiedenen Ladezuständen 6

TECHNOLOGIETRANSFER

Doppel-D-Spiegelhalter, Aufladung von Partikelströmungen, Sorptionskörper für Massebestimmungen 7

VERSCHIEDENES

Ämter und Auszeichnungen, Knapp 16 Millionen Euro für die Quantencomputer-Forschung, Wasserstoff-Innovationslabor, 30 Jahre Untertagelaboratorium 8

Besonders interessant für

- Neurologie
- Magnetometrie

Das Gehirn verarbeitet Informationen über langsame und schnelle Hirnströme. Um letztere zu untersuchen, mussten bisher Elektroden in das Gehirn eingeführt werden. In einer Kooperation zwischen PTB und Charité wurden diese schnellen Hirnsignale jetzt erstmals von außen sichtbar gemacht – und eine erstaunliche Variabilität festgestellt. Möglich wurden diese Messungen der winzigen magnetischen Felder des Gehirns mit einem in der PTB entwickelten, besonders empfindlichen Magnetfeld-Sensorsystem.

Störungen in der Informationsverarbeitung im Gehirn wirken sich oft als schwerwiegende neurologische Erkrankungen aus. Die Erforschung der Signalweitergabe im Gehirn ist deshalb der Schlüssel zum besseren Verständnis etwa von Parkinson oder Epilepsie. Dabei haben sich zwei nichtinvasive Methoden etabliert: die Elektro-Enzephalografie (EEG) und die Magnet-Enzephalografie

(MEG). Zuverlässig detektieren beide allerdings nur die langsamen, nicht die schnellen Hirnströme.

Langsame Ströme (postsynaptische Potenziale) entstehen, wenn Nervenzellen Signale von anderen Nervenzellen empfangen. Feuern sie selbst und geben damit Informationen an nachgeschaltete Neuronen oder auch Muskeln weiter, verursacht dies schnelle Ströme mit einer Dauer von nur einer Tausendstelsekunde (Aktionspotenziale). In den gemeinsamen Untersuchungen von PTB und Charité wurden jetzt auch diese schnellen Hirnströme als Antwort auf einzelne Sinnesreize erkennbar gemacht.

Das wurde über eine deutliche Reduktion des Eigenrauschens des verwendeten Sensorsystems erreicht. Die Magnetfeldsensoren, supraleitende Quanteninterferometer (SQUIDs), werden in flüssiges Helium getaucht, um sie auf -269 °C zu kühlen. Dazu ist das Kühlgefäß sehr aufwendig isoliert. Diese Superisolierung besteht aus mit Aluminium bedampften Folien. Aluminium ist zwar nicht ferromagnetisch, aber die Elektronenbewegung in dem Metall erzeugt ein magnetisches Rauschen, das kleine Magnetfelder beispielsweise von Nervenzellen über-



8 Konzeptbild eines neuronalen Netzes. Die Informationsverarbeitung im Gehirn ist einer der komplexesten Prozesse des Körpers. (Abbildung: Adobe Stock / Ktsdesign)

lagert. In dem neuen Ansatz wurde die Superisolierung des Kühlgefäßes so konstruiert, dass dessen Rauschen vernachlässigbar klein wurde. So ließ sich die Empfindlichkeit der Sensortechnologie um das Zehnfache steigern.

Bei Messungen nach der Reizung eines Armnervs gesunder Probanden bestätigte sich die Fähigkeit des MEG, schnelle Reizantworten zu messen. Dabei waren erstaunlicherweise trotz konstanter Stimulation die schnellen Hirnströme nicht gleichförmig, sondern veränderten sich von Reiz zu Reiz, unabhängig von

den langsamen Hirnsignalen. Die Information über eine Berührung der Hand wird vom Gehirn also erstaunlich variabel verarbeitet, obwohl alle Nervenreize gleichartig waren.

Die Ergebnisse eröffnen neue Antworten auf grundlegende neurologische Fragen wie etwa zum Einfluss von Aufmerksamkeit oder Müdigkeit auf die Informationsverarbeitung im Gehirn. Und das neue Sensorsystem kann zu einem tieferen Verständnis und einer besseren Therapie neurologischer Erkrankungen beitragen. ■

Ansprechpartner

Rainer Körber
Fachbereich 8.2
Biosignale
Telefon: (030) 3848-7576
rainer.koerber@ptb.de

Wissenschaftliche Veröffentlichung

G. Waterstraat, R. Körber, J.-H. Strom, G. Curio: *Noninvasive single-trial analysis of human neocortical population spikes*. *PNAS* **118**, 2017401118 (2021)

Antiferromagnetische Domänen abgebildet

Magneto-Seebeck-Mikroskopie erlaubt Einblick in Schaltvorgänge

Besonders interessant für

- Materialwissenschaften
- Anwendungen in der Spintronik

Antiferromagnetische Materialien sind im Inneren zwar magnetisch, jedoch wechselt die Richtung ihrer geordneten mikroskopischen Momente zwischen einzelnen Elementarmagneten. Darum gibt es kein magnetisches Nettomoment. Mittels Magneto-Seebeck-Mikroskopie wurde der magnetische Zustand eines Antiferromagneten messbar gemacht, um ihn für Anwendungen z. B. in der Spintronik nutzen zu können.

Ein Meilenstein für die Anwendung von Antiferromagneten in der Spintronik, z. B. für extrem schnelle Speicherbausteine, war die Erkenntnis, dass auch in antiferromagnetischen Materialien die Elementarmagnete mit einem aufgeprägten elektrischen Strom geschaltet werden können. Die antiferromagnetische Ordnung ist durch die Bildung von Domänen gekennzeichnet, die eine bestimmte magnetische Orientierung der Elementarmagnete und einen von der Magnetisierungsrichtung abhängigen Magneto-Seebeck-Koeffizienten besitzen.

In einer Zusammenarbeit mit der Universität Regensburg wurde eine Methode entwickelt, die

Aufschluss über die lokale Anordnung der Domänen gibt. So konnte zum ersten Mal das Schalten der Domänen durch Strompulse im für Anwendungen besonders relevanten Materialsystem CuMnAs analysiert werden. Die Methode basiert auf der Rasterkraftmikroskopie (AFM): Zur Messung der antiferromagnetischen Ordnung wird eine metallbeschichtete AFM-Spitze mit einem Infrarotlaser bestrahlt und so ein sehr starker lokaler Wärmegradient erzeugt. An diesem heißen Punkt entsteht in der Probe eine vom Material, der Temperatur und der Magnetisierung abhängige Spannung (Magneto-Seebeck-Effekt), welche dann gemessen wird. Wird die Spitze über einen Bereich bewegt, in dem eine Domäne ihre Ausrichtung ändert, spiegelt sich dies in der aufgezeichneten Spannung wider. Auf diese Weise kann die Magneto-Seebeck-Mikroskopie

die antiferromagnetische Ordnung charakterisieren. Mit diesem Verfahren wurden die magnetischen Domänen in einer 20 Nanometer dünnen antiferromagnetischen Schicht aus CuMnAs sowie deren Manipulation durch Stromimpulse abgebildet.

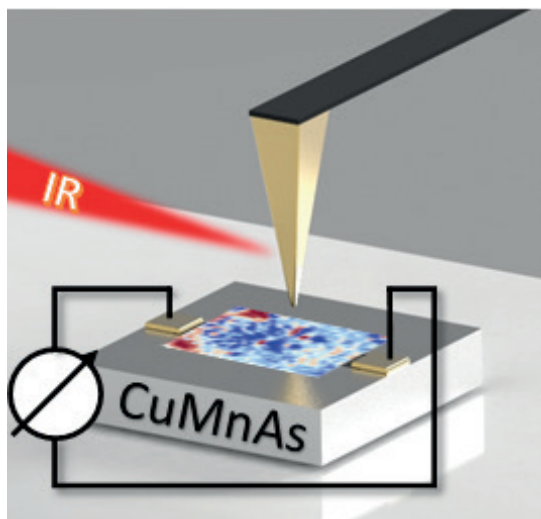
Dieses neue Verfahren zur räumlich hochauflösenden Abbildung antiferromagnetischer Domänen wird ein wichtiges Instrument für zukünftige Untersuchungen zu den physikalischen Grundlagen neuartiger Schaltmechanismen sein, die wichtige Bausteine im aufstrebenden Gebiet der antiferromagnetischen Spintronik darstellen. ■

Ansprechpartner

Bernd Kästner
Fachbereich 7.1
Radiometrie mit Synchrotronstrahlung
Telefon: (030) 3481-7104
bernd.kaestner@ptb.de

Wissenschaftliche Veröffentlichung

T. Janda, J. Godinho, T. Ostatnický et al.: *Magneto-Seebeck microscopy of domain switching in collinear antiferromagnet CuMnAs*. *Phys. Rev. Mater.* **4**, 94413 (2020)



Prinzip der Magneto-Seebeck-Mikroskopie: Eine AFM-Spitze wird über die Oberfläche bewegt und koppelt IR-Strahlung in die CuMnAs-Schicht. Dort entsteht ein heißer Punkt und eine messbare Spannung an den Kontakten, die als Funktion des Ortes aufgezeichnet wird und für die jeweilige Domänenorientierung charakteristisch ist.

Auf dem Weg zum „Nanometer-Normal“

Thermische Ausdehnung und Kompressibilität von einkristallinem Silizium absolut gemessen

Besonders interessant für

- Materialcharakterisierung
- Grundlagen der Metrologie
- Längenmessung auf der Nanometerskala

In der PTB wurden absolute Längenmessungen an einem einkristallinen Siliziumendmaß mit abbildender Interferometrie durchgeführt, die eine kleinere Messunsicherheit als alle vorherigen Messungen bieten. Sie präzisieren bisherige CODATA-Referenzdaten und sind hilfreich für eine neue sekundäre Realisierung des Meters.

Begründet durch die Notwendigkeit eines Referenzmaterials für hochpräzise Messungen zur thermischen Ausdehnung gab es in der Vergangenheit eine Vielzahl von Messungen an Silizium über einen weiten Temperaturbereich. Einkristallines Silizium dehnt sich aufgrund seiner diamantartigen Kristallstruktur in alle Raumrichtungen gleichartig aus, es ist also isotrop bezüglich der thermischen Ausdehnung und zudem in hoher Qualität im industriellen Maßstab verfügbar.

Ergebnisse von Messungen der thermischen Ausdehnung zwischen 7 K und 293 K mittels abbildender Interferometrie wurden in der PTB bereits vor sechs Jahren vorgestellt, wobei eine systematische Abweichung der CODATA-Referenzdaten

in diesem Temperaturbereich festgestellt wurde. Im Gegensatz zu dilatometrischen Messungen aus anderen Arbeiten sind die PTB-Ergebnisse aus absoluten Längenmessungen abgeleitet. An diese Arbeit knüpft die vorliegende Untersuchung der thermischen Ausdehnung an, die den Temperaturbereich auf bis zu 320 K erweitert, mit einer reduzierten Messunsicherheit, und darüber hinaus die gleichzeitige Bestimmung der Kompressibilität von Silizium umfasst.

Die Messdaten wurden mit einer neuen Methode analysiert, die der Tatsache Rechnung trägt, dass der thermische Ausdehnungskoeffizient – über eine Ableitung berechnet – eine Größe ist, die empfindlich auf die Modellwahl zur Datenauswertung reagiert. Der Ansatz basiert auf Bayes'scher Modellmittelung und erlaubt, verschiedene Modelle in einem gemeinsamen Rahmen zu behandeln und über die Berechnung von Modellwahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen.

Es zeigte sich, dass im abgedeckten Temperatur- und Druckbereich die thermische Ausdehnung kaum vom Luftdruck abhängt. Die neuen Messungen präzisieren die bisherigen Referenzwerte; die ermittelte Messunsicherheit ist bis zu einer Größenordnung kleiner als bei bisher berichteten Ergebnissen.

Da die jüngste Revision der „*Mise en*

pratique für die Definition des Meters im SI“ auf den Gitterabstand von Silizium als Grundlage für Methoden zur sekundären Darstellung des Meters auf der Nanometerskala verweist, kann das gewonnene Wissen auch hier genutzt werden. ■



Endmaß aus einkristallinem Silizium mit einer Größe von 197 mm × 35 mm × 9 mm

Ansprechpartner

Guido Bartl

Fachbereich 5.4

Interferometrie an Maßverkörperungen

Telefon: (0531) 592-5430

guido.bartl@ptb.de

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

G. Bartl, C. Elster, J. Martin, R. Schödel, M. Voigt, A. Walkov: *Thermal expansion and compressibility of single-crystal silicon between 285 K and 320 K*. *Meas. Sci. Technol.* **31**, 065013 (2020)

J. Martin, G. Bartl, C. Elster: *Application of Bayesian model averaging to the determination of thermal expansion of single-crystal silicon*. *Meas. Sci. Technol.* **30**, 045012 (2019)

Diodenlaser für die optische Messtechnik

Jodstabilisierte Diodenlaser könnten Gaslaser als Wellenlängennormale ablösen

Besonders interessant für

- Hersteller und Anwender von Laserinterferometern und Längenmessgeräten
- Kalibrierlabore
- optische Messtechnik

In Zusammenarbeit mit einem Industriepartner hat die PTB ein sehr kompaktes Wellenlängennormal entwickelt

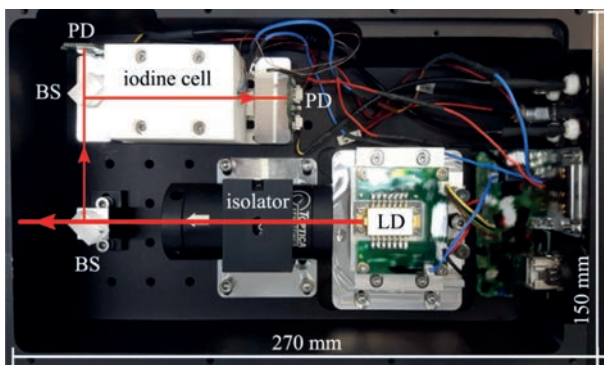
und evaluiert. Es basiert auf einem Diodenlaser, dessen Frequenz auf Übergänge im Jodmolekül stabilisiert ist. Dieser Typ Laser könnte in Zukunft die leistungshungrigen und großen Helium-Neon-Laser als Normal für die interferometrische Längenmessung ablösen.

Helium-Neon-Laser mit einer Wellenlänge von 633 nm werden schon seit Langem als Wellenlängenreferenzen für

die industrielle interferometrische Längenmessung eingesetzt. Sie erreichen mit vergleichsweise geringem Aufwand relative Genauigkeiten von 10^{-8} , was einer Unsicherheit von 10 nm auf einen Meter entspricht und für einen Großteil der Anwendungen vollkommen ausreicht. Allerdings ist die Technologie veraltet und die Zahl der Hersteller nimmt stetig ab. Zudem sind die Laser gegenüber modernen Diodenlasern sehr groß, benötigen

Hochspannung und haben einen schlechten Wirkungsgrad sowie eine kleine Ausgangsleistung.

Um die große Zahl der vorhandenen Interferometer in der Längenmesstechnik nahtlos weiterverwenden zu können, muss bei alternativen Lösungen die Wellenlänge von 633 nm beibehalten werden. Dafür bieten sich Diodenlaser an, die von sich aus allerdings keine ausreichende Genauigkeit der Wellenlänge besitzen. Hier kommt die Stabilisierung mit Jod ins Spiel: Jodmoleküle besitzen viele Absorptionslinien im benötigten Wellenlängenbereich, die als absolute Wellenlängenreferenz dienen können.



Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts wurde von der Toptica Photonics AG ein spezieller Laserdiodenchip mit interner optischer Wellenlängenselektion bei 633 nm mit einer nur 3,3 cm langen Jodzelle in einem 27 cm × 15 cm großen Gehäuse kombiniert. Die Laserfrequenz wird automatisiert auf eine bestimmte Doppler-verbreiterte Jod-Absorptionslinie stabilisiert. Für Anwendungen steht eine vergleichsweise hohe Leistung von ca. 5 mW am Ausgang einer Glasfaser zur Verfügung. Das Gerät wurde mit einem optischen Frequenzkamm gegen Atomuhren der PTB evaluiert. Dabei konnte eine relative Instabilität von unter 10^{-10} für Mittelungszeiten größer 10 s erreicht werden, die deutlich unter den Werten kommerzieller einfach stabilisierter Helium-Neon-Laser liegt. Die Absolutfrequenz

Einblick in den Prototypen mit angeedeutetem Strahlengang mit Laserdiode (LD), Strahlteiler (BS) und Photodetektoren (PD)

ergab sich in guter Übereinstimmung mit erwarteten Werten. Die Linienform und die Stabilisierung wurde modelliert, sodass jetzt auch die Absolutfrequenz und die Stabilität bei Auswahl anderer Jodlinien leicht vorhergesagt werden können.

Der Prototyp hat das Potenzial, mit mikrooptischen Elementen in einem nur wenige Zentimeter großem Gehäuse integriert zu werden, um so in Zukunft sehr kompakte und genaue Interferometer zu ermöglichen. ■

Ansprechpartner

Uwe Sterr
 Fachbereich 4.3
 Quantenoptik und Längeneinheit
 Tel. (0531) 592-4310
 uwe.sterr@ptb.de

Wissenschaftliche Veröffentlichung

F. Krause, E. Benkler, C. Nölleke, P. Leisching, U. Sterr: Simple and compact diode laser system stabilized to Doppler-broadened iodine lines at 633 nm. *Appl. Opt.* **59**, 10808–10812 (2020)

Benchmark für Einzelelektronenschaltkreise

Analyseverfahren für eine universelle Beschreibung der Genauigkeit von Quantenschaltkreisen

Besonders interessant für

- Nanotechnologie
- Quanteninformationsverarbeitung
- Elektrische Quantenmetrologie

Die Manipulation einzelner Elektronen mit dem Ziel, Quanteneffekte nutzbar zu machen, verspricht qualitativ neue Anwendungsmöglichkeiten in der Elektronik. In diesen Einzelelektronenschaltungen, die den Gesetzen der Quantenmechanik gehorchen, treten jedoch statistische Abweichungen von der fehlerfreien Funktionsweise auf. Daraus ergibt sich eine fundamentale Unsicherheit, deren Verständnis und Quantifizierung maßgeblich für zukünftige Weiterentwicklungen sind. Die PTB hat in Zusammenarbeit mit der Universität Lettland hierfür ein statistisches Testverfahren entwickelt.

Einzelelektronenschaltkreise werden als Quantennormale für die elektrische Stromstärke entwickelt und bereits in Prototypen von Quantencomputern eingesetzt. In diesen mesoskopischen Quantenschaltungen erschweren Wechselwirkungen und Rauschprozesse die Untersuchung fundamentaler Unsicherheiten, welche somit große Anforderungen an Messtechnik mit allerhöchstem Präzisionsniveau stellt.

Im Bereich der Quantencomputer wird häufig ein Testverfahren herangezogen, in dem Funktionsweise und Genauigkeit der Gesamtschaltung über die Akkumulation von Fehlern nach einer Sequenz von Operationen bewertet wird. Forscher der PTB und der Universität Lettland haben nun einen Benchmark für Einzelelektronenschaltkreise entwickelt. Die Schaltungsgenauigkeit wird dabei durch die zufälligen Schritte eines Fehlersignals beschrieben, das

nach wiederholter Ausführung von Schaltkreisoperationen von einem integrierten Sensor erfasst wird. Die statistische Analyse dieses als Random-Walk bezeichneten Verlaufs ermöglicht, die seltenen, aber bei der Manipulation einzelner Quantenteilchen unvermeidbaren Fehler zu identifizieren.

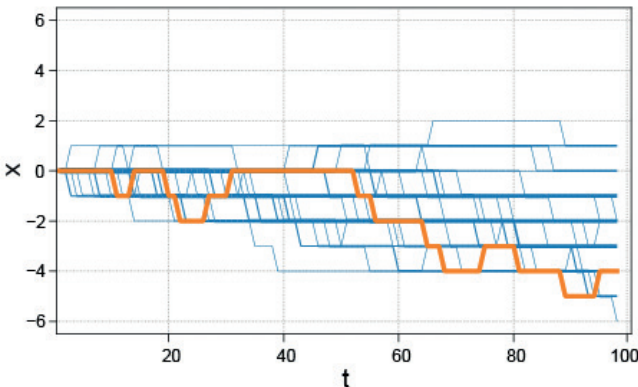
Mithilfe des Random-Walk-Benchmarks wurde der Transfer einzelner Elektronen in einer Schaltung aus Einzelelektronenpumpen untersucht, die an der PTB als Primärnormal für die Realisierung der SI-Basiseinheit Ampere entwickelt wird. In diesem Experiment erfassen empfindliche Ladungsdetektoren das Fehlersignal mit Einzelelektronenauflösung. Die durch das Zählen individueller Teilchen ermöglichte statistische Analyse zeigt nicht nur grundsätzliche Grenzen der Schaltungsgenauigkeit, verursacht durch externe Rauschbeiträge und zeitliche Korrelationen, sondern bietet auch

ein robustes Maß für Fehler in der elektrischen Quantenmetrologie.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren legt die Grundlage für

die Validierung von Quantennormalen für elektrische Größen und bietet darüber hinaus weitere Anwendungsmöglichkeiten für die Entwicklung und Analyse

der Funktionsweise komplexer Quantensysteme. ■



Simulierte Entwicklungen möglicher Random-Walk-Verläufe des Fehlersignals x über der Anzahl t von Wiederholungen der Schaltungsoperation, wobei die Zählstatistiken des experimentell gemessenen Fehlersignals berücksichtigt sind. Die orangefarbene Linie hebt beispielhaft einen möglichen Verlauf hervor. Die Linienbreiten der blauen Linien entsprechen den statistischen Häufigkeiten der jeweiligen eingenommenen Zustände.

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

Wissenschaftliche Veröffentlichung
 D. Reifert, M. Kokainis, A. Ambainis, V. Kashcheyevs, N. Ubbelohde: A random-walk benchmark for single-electron circuits. *Nat. Commun.* **12**, 285 (2021)

Strahlenschutz bei Ultrakurzpulslasern

Die PTB begleitet Gesetzesänderungen mit Strahlenschutzmessungen an ihrer neuen Ultrakurzpuls-Laseranlage

Besonders interessant für

- Materialbearbeitung
- Strahlenschutz

Für die Materialbearbeitung werden immer häufiger Ultrakurzpulslaser eingesetzt, deren einzeln Pulse nur Piko-sekunden dauern. Da diese Geräte unerwünschte Röntgenstrahlung abgeben können, schreibt das Strahlenschutzgesetz seit dem 20. Mai 2021 eine Genehmigungspflicht vor. Die PTB hat diese Gesetzesänderung mit umfangreichen Strahlenschutzmessungen an ihrer neuen Ultrakurzpuls-Laseranlage begleitet.

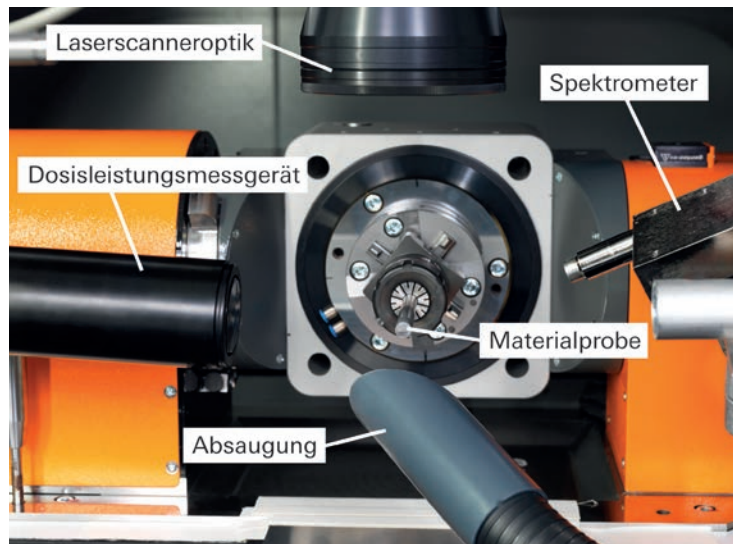
Ultrakurzpulslaser (UKP-Laser) dienen beispielsweise zum Schneiden von Gorillaglas für Handydisplays oder zum Bohren von Einspritzdüsen für emissionsärmere Motoren. Dabei werden einzelne Laserpulse mit hohen Bestrahlungsstärken im Bereich von 10^{15} W/cm^2 auf das Werkstück geschossen und erzeugen ein Plasma, durch das das Material abgetragen wird. Die Pulsdauern im Pikosekundenbereich ermöglichen einen genauen Materialabtrag, ohne das umgebende Material zu erhitzen.

Doch die durch Laser-Plasma-Wechselwirkungen beschleunigten Plasmaelektronen können auch gepulste Rönt-

genstrahlung mit Photonenenergien von mehr als 5 keV emittieren. Wegen dieser ungewollten Emission fallen UKP-Laseranlagen unter das Strahlenschutzgesetz (StrlSchG). Die gesetzlichen Regelungen für UKP-Laseranlagen im Rahmen des StrlSchG sollen weiter spezifiziert werden. In einer ersten Gesetzesänderung wurde für das Betreiben einer UKP-Laseranlage ein Genehmigungsverfahren vorgeschrieben. Dabei muss der Grenzwert der Ortsdosisleistung von $10 \mu\text{Sv/h}$ in 10 cm Abstand von der berührbaren Oberfläche eingehalten werden.

Die PTB hat die Gesetzesänderung mit umfangreichen Strahlenschutzmes-

sungen begleitet, die sie im Rahmen des Genehmigungsantrages für ihre moderne UKP-Laseranlage durchführte. Dabei arbeiteten die PTB-Strahlenschutzexperten eng mit den beim Betrieb der Anlage erfahrenen Kollegen aus der Abteilung Fertigungsmesstechnik zusammen. Messungen der stark gepulsten Röntgenstrahlung sind aufgrund typischer Photonenenergien im Bereich zwischen weniger als 5 keV und etwa 30 keV anspruchsvoll. Der Energiebereich kommerzieller Messmittel beginnt erst ab etwa 20 keV; typische Röntgenvorrichtungen starten bei etwa 25 keV. Bei den Strahlungsmessungen wurden rückgeführte Messmittel



Beispielhafter Aufbau einer Messung mit einem Spektrometer und einem Ortsdosimeter an der UKP-Laseranlage der PTB. Als Material wurde ein Rundstab aus Wolfram verwendet.

verwendet und unterschiedliche Bearbeitungsprozesse, Materialien und Lasereinstellungen hinsichtlich der erzeugten Photonenenergie und Dosisleistung der Röntgenstrahlung untersucht. Diese detaillierten Untersuchungen waren aufgrund der Komplexität und Nichtlinearität der Laser-Plasma-Wechselwirkung notwendig.

Parallel ist die PTB gemeinsam mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) an zwei thematisch verwandten Ressortforschungsprojekten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, vergeben über das Bundesamt für Strahlenschutz, beteiligt. Dabei sollen aus rückgeführten

Messungen in diesen Strahlungsfeldern belastbare Daten gewonnen werden und Prüfkonzepte zur Gewährleistung des Strahlenschutzes an UKP-Laseranlagen entwickelt werden.

Auf Grundlage der ermittelten Daten berät die PTB das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, die Strahlenschutzkommission sowie den Bund-Länder-Ausschuss bei diesem neuen Thema und unterstützt damit die Entwicklung einer dringend benötigten einheitlichen Richtlinie zur Prüfung des ionisierenden Strahlenschutzes an UKP-Laseranlagen und die damit verbundenen Anpassungen des gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerks. ■

Ansprechpartner

Ulf Stolzenberg
Fachbereich 6.3
Strahlenschutzdosimetrie
Telefon: (0531) 592-6226
ulf.stolzenberg@ptb.de

Das Strahlenschutzgesetz (StrlSchG)

<https://www.gesetze-im-internet.de/strlSchG/>

Die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)

https://www.gesetze-im-internet.de/strlSchV_2018/

Alterung von Lithium-Schwefel-Batterien

Einblick in atomare Vorgänge bei verschiedenen Ladezuständen

Besonders interessant für

- Elektromobilität
- Smart Grids
- Hersteller mobiler Geräte
- Batteriehersteller

Bislang erreichen Lithium-Schwefel-Batterien noch nicht ihre maximal mögliche Kapazität und Lebensdauer. Molekülspezifische, zeitaufgelöste und rückführbare Messungen an der Synchrotronstrahlungsquelle BESSY II haben gezeigt, dass die Anreicherung von Polysulfiden an der Anode ein Hauptgrund dafür sein könnte.

Ein umweltfreundlicherer Batterietyp mit höherer Kapazität und längerer Lebensdauer als die gängigen Lithium-Ionen-Batterien könnte die Lithium-Schwefel-Batterie sein, mit Lithium als Anoden- und Schwefel als Kathodenmaterial. Schwefel ist reichlich vorhanden, preiswert und umweltfreundlich. Weil er auch ein leichteres Element als die in herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien genutzten Schwermetalle Mangan, Nickel und Kobalt ist, ist die theoretische Energiedichte einer Lithium-Schwefel-Batterie signifikant höher. Sie beträgt bis zu 2500 Wh/kg. (Zum Vergleich: Bei Lithium-Ionen-Batterien liegt sie theoretisch bei 350 Wh/kg, real bei ca. 220 Wh/kg.)

Doch bisher konnte nur rund ein Viertel davon realisiert werden. Zudem altern die Batterien schnell und erreichen die von der Industrie geforderten mindestens 1000 Ladezyklen noch nicht.

Als eine Ursache für den schnellen Rückgang der Kapazität wurden die Polysulfide vermutet. Polysulfide sind kettenförmige Moleküle aus Lithium und Schwefel, also aus jenen Elementen, die in dieser Zellchemie für die Energiespeicherung sorgen. Wenn sich die Polysulfide im Elektrolyten lösen, geht ihr Anteil für die Energiespeicherung verloren, und die Kapazität sinkt. Polysulfide bilden sich während des Batteriebetriebs an der Kathode, lösen sich im Elektrolyten und wandern zur Anode. Beim Wiederaufladen lagern sie sich mit zunehmender Zyklenzahl an der Anode an.

In der PTB konnte erstmals molekülspezifisch die Bewegung der Polysulfide zwischen den Elektroden und insbesondere die Akkumulation an der Anode für fortschreitende Zyklenzahl beobachtet werden.

Die zeitaufgelösten Messungen im laufenden Betrieb der Zelle (Operando-Modus) ermöglichen eine Zuordnung von Veränderungen auf atomarer Ebene zu den elektrischen Eigenschaften der Batterie. Zudem wurde die Veränderung der Polysulfid-Moleküllänge bestimmt, die Löslichkeit und Reaktivität maßgeblich beeinflusst.

Für die Messungen wurden an der Synchrotronstrahlungsquelle BESSY II

in Berlin die Nahkanten-Absorptionsfeinstruktur-Analyse (NEXAFS) sowie referenzprobenfreie Quantifizierung mit Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) für das Element Schwefel eingesetzt. Die Verfahren sind sehr genau, rückführbar auf das Internationale Einheitensystem (SI) und kommen ohne Referenzmaterial aus.

Die Ergebnisse zeigen, dass nicht primär die Bildung der Polysulfide, sondern ihre Bewegung und Ablagerung an der Anode für den Rückgang der Zellkapazität verantwortlich ist. Dies führt zu neuen Strategien im Zelldesign, zum Beispiel zum Einsatz polysulfid-undurchlässiger Separatoren. ■

Ansprechpartner

Claudia Zech
Fachbereich 7.2
Röntgenmesstechnik mit Synchrotronstrahlung
Telefon: (030) 3481-7179
claudia.zech@ptb.de

Wissenschaftliche Veröffentlichung

C. Zech, P. Hönicke, Y. Kayser, S. Risse, O. Grätz, M. Stamm, B. Beckhoff: Polysulfide driven degradation in lithium-sulfur batteries during cycling – quantitative and high time-resolution operando X-ray absorption study for dissolved polysulfides probed at both electrode sides. *J. Mater. Chem. A*, **9**, 10231–10239 (2021)

Doppel-D-Spiegelhalter

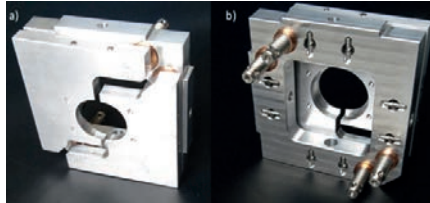
Besonders interessant für

- Optik
- Hersteller optischer Komponenten

In der Optik müssen Strahlen, die mit einem Abstand von wenigen Millimetern verlaufen, häufig unabhängig voneinander justiert werden. Bei manchen Einbauszenarien wäre es wünschenswert, dies in einer einzigen Baugruppe zu realisieren, um den dabei erzeugten Strahlenabstand zu verringern. Das PTB-Konzept eines

neuen Doppelspiegelhalters löst dieses Problem in einfacher Weise. Die beiden D-förmigen Halbspiegel werden in einer gemeinsamen Baugruppe gehalten,

jedoch unabhängig voneinander justiert. Dadurch haben beide Halbspiegel die gleiche Stabilität. (Technologieangebot 525) ■



Ansicht des Spiegelhalters von vorne (a) und hinten (b)

Vorteile

- unabhängige Justage zweier Strahlen
- weniger Strahlenabstand und Platzverbrauch
- hohe mechanische Stabilität

Aufladung von Partikelströmungen

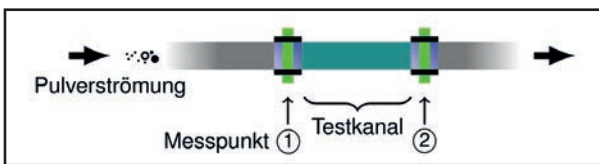
Besonders interessant für

- Explosionsschutz
- pharmazeutische Industrie
- Lebensmittel- und Mineral(öl)industrie

Für den Explosionsschutz in industriellen Anlagen ist es sehr wichtig zu wissen, wie sich Partikel (etwa Pulver) beim

Transport in Strömungsvorgängen elektrostatisch aufladen. Die neue Technologie basiert auf zwei unterschiedlichen Messungen mithilfe der Particle Image Velocimetry (PIV). Zwischen zwei definierten Messabschnitten befindet sich ein Testkanal, an den ein elektrostatisches Feld angelegt ist. Es lenkt die unterschiedlich aufgeladenen Partikel ab.

licht, die elektrostatische Aufladung von laminaren oder turbulenten Strömungen (bei Pulver oder Flüssigkeiten) online und nichtinvasiv zu messen und kann die Sicherheit vieler Transportprozesse verbessern. (Technologieangebot 527) ■



Schematische Darstellung des Funktionsprinzips

Durch die Beobachtung der einzelnen Teilchen in diesen Messbereichen wird die Ladungsänderung zwischen diesen Abschnitten ermittelt. Das Verfahren ermög-

Vorteile

- Messung der elektrostatischen Ladungsverteilung von Strömungen
- erweiterter Einsatzbereich für turbulente Strömungen
- sowohl für Pulver als auch Flüssigkeiten geeignet

Sorptionskörper für Massebestimmungen

Besonders interessant für

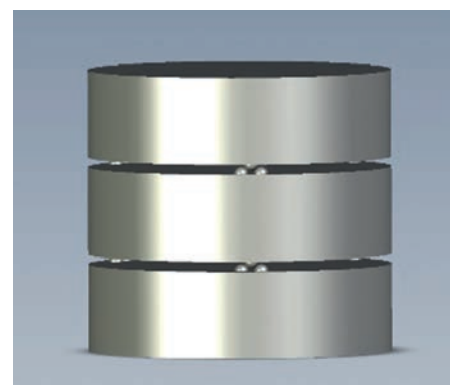
- Hersteller von Waagen und Gewichten
- Metrologieinstitute

Bei der Kalibrierung von Massenormalen ist die Bestimmung der Masse von an der Oberfläche angelagerten Stoffen wichtig. Sie kann mithilfe von Sorptionskörpern ermittelt werden, die aus mehreren einzelnen Scheiben bestehen und zur Steigerung der Messgenauigkeit in Form einer Korrektur berücksichtigt

werden. Ein neues Konzept aus der PTB ermöglicht sowohl eine effiziente Handhabung als auch eine einfache Reinigung der einzelnen Scheiben. Erreicht wurde dies durch eine kipp- und wippstabile Lagerung, mit der sich die einzelnen Elemente reversibel zusammensetzen lassen. (Technologieangebot 519) ■

Vorteile

- kippstabile, reproduzierbare Stapelung
- höhere Messgenauigkeit
- anwendungsfreundliche Handhabung



Schematische Darstellung eines Drei-Scheiben-Sorptionskörpers

Ansprechpartner für diese Technologieangebote

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

Ämter und Auszeichnungen

Cornelia Denz

Ab dem 1. Mai 2022 wird die Physikerin Prof. Dr. Cornelia Denz von der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster die PTB leiten. Der derzeitige PTB-Präsident Prof. Dr.



Dr. h. c. Joachim Ullrich, der die Präsidentschaft seit dem Jahr 2012 innehat, scheidet dann altersbedingt aus. In der 135-jährigen Geschichte der PTB wird Cornelia Denz die erste Frau an der Spitze der PTB sein. Sie erhielt ihre Berufung in dieses höchste Amt der nationalen Metrologie vom Bundesminister für Wirtschaft und Energie Peter Altmaier, in dessen Ressort die PTB angesiedelt ist. Das Ministerium folgt mit dieser Berufung dem einstimmigen Vorschlag einer mit Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft und Wirtschaft prominent besetzten Findungskommission.

Frank Härtig

Der Vizepräsident der PTB Dr.-Ing. Prof. h. c. Frank Härtig hat am 3.9.2021 die Präsidentschaft der International Measurement Confederation (IMEKO) übernommen. In den kommenden drei Jahren steht er an der Spitze dieses nichtstaatlichen Zusammenschlusses, dessen 42 Mitgliedsorganisationen sich mit der weltweiten Weiterentwicklung von Messtechnik befassen. Damit ist die PTB Gastgeber des IMEKO-Weltkongresses 2024 in Hamburg.



Jörn Stenger

Das Mitglied des Präsidiums der PTB Dr. Jörn Stenger ist neuer Vorsitzender von EURAMET, der Vereinigung der europäischen Metrologieinstitute. Er war bereits in der EURAMET-Generalversammlung 2020 in das Amt gewählt worden, das er jetzt antritt. Seine Amtszeit als EURAMET-Chairperson dauert bis 2024.



Frank Lienesch

Der Leiter der Abteilung 9 *Gesetzliche und Internationale Metrologie* Dr. Frank Lienesch ist neuer Vizepräsident von COOMET (Euro-Asian Cooperation of National Metrology Institutions), der Vereinigung osteuropäischer Metrologieinstitute. Auf der Jubiläumssitzung zum 30-jährigen Bestehen von COOMET am 15. Juni wurde er für drei Jahre in das Amt gewählt.



Piet. O. Schmidt

Der Leiter des *QUEST-Instituts an der PTB* Prof. Dr. Piet Schmidt hat einen ERC Advanced Grant erhalten. Damit fördert der Europäische Forschungsrat (ERC) ein Projekt zur erstmaligen Realisierung optischer Uhren, bei denen hochgeladene Ionen mithilfe von Quantentechniken kontrolliert und über Laserspektroskopie gemessen werden. Das Projekt mit einer Laufzeit von fünf Jahren wird vom ERC mit 2,5 Millionen Euro gefördert.



Knapp 16 Millionen Euro für die Quantencomputer-Forschung

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das Verbundprojekt MIQRO mit 15,8 Millionen Euro. In dem Projekt soll ein Quantencomputer basierend auf Hochfrequenz-gesteuerten Ionen entwickelt werden. Neben der PTB nehmen daran die Leibniz Universität Hannover, die Universität Siegen, die Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, die QUARTIQ GmbH sowie die eleQtron GmbH als assoziierte Partner teil. Die Laufzeit beträgt vier Jahre. Der in diesem Projekt entwickelte und betriebene Quantencomputer soll im Anschluss an das Projekt auf tausend Quantenbits skalierbar sein und damit vielfältigen industriellen und akademischen Anwendungen den Weg bereiten, die jenseits der Möglichkeiten von klassischen Supercomputern liegen. (Ansprechpartner: Christian Ospelkaus, 0531 592-4740, christian.ospelkaus@ptb.de)

Wasserstoff-Innovationslabor

Das Wasserstoff-Innovationslabor mit dem Titel „Nachhaltige Verbrennungskonzepte“ ist gestartet. Mit einer Förderung des niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur in Höhe von 1,2 Millionen Euro geht das Projekt in die dreijährige Umsetzungsphase. Beteiligt sind neben der PTB die Leibniz Universität Hannover, die TU Braunschweig, die TU Clausthal und die Jade Hochschule Wilhelmshaven. (Ansprechpartner: Ravi Fernandes, 0531 592-3300, ravi.fernandes@ptb.de)

30 Jahre Untertagelaboratorium

UDO, das Untertagelaboratorium der PTB, besteht inzwischen seit 30 Jahren und bietet mit einem der weltweit niedrigsten Strahlungsspiegel beste Bedingungen für die Überwachung der Umweltradioaktivität und damit indirekt auch für die Beobachtung des Klimawandels und dessen Parameter. Letzteres geschieht durch die Beobachtung von natürlichem Radon in der Atmosphäre, das dabei als „tracer“ für die Ausbreitung von Treibhausgasen dient und Rückschlüsse auf deren Ursprung und Emissionsraten erlaubt. Eingerichtet wurde es im Jahr 1991 zunächst im Bergwerk Asse II. 2011 zog es ins Salzbergwerk der esco (Kali + Salz AG) in Grasleben um. Ein Großteil der in Europa eingesetzten Dosimetriesysteme, deren Daten stündlich an das Joint Reseach Center (JRC) der EU-Kommission nach Ispra (Italien) geliefert werden, wurden im Laufe der Zeit im UDO-Labor untersucht und kalibriert. (Ansprechpartner: Faton Krasniqi, 0531 592-6223, faton.krasniqi@ptb.de)

Impressum

PTB-News 3/2021, deutsche Ausgabe, September 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 > 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



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