

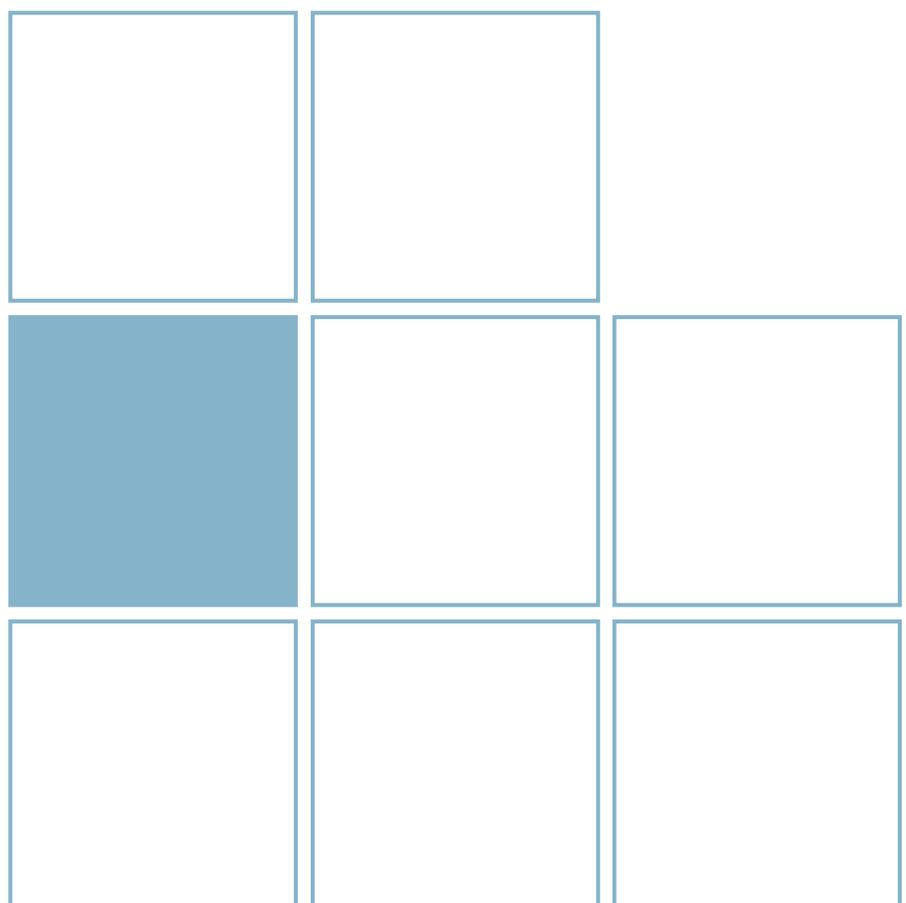


# PTB jahresbericht

Annual Report

2013

Physikalisch-Technische  
Bundesanstalt  
Jahresbericht 2013



# Vorwort

Die Metrologie hat seit der Gründung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt vor 126 Jahren nichts von ihrer Bedeutung für Wissenschaft, Gesellschaft und Wirtschaft eingebüßt. Sie wird, im Gegenteil, für eine moderne Industrienation in einer immer komplexer werdenden, global vernetzten Welt immer wichtiger, ja von entscheidender Bedeutung. Die Zukunft verantwortlich zu gestalten, gelingt dabei nur im Bewusstsein und in der Kenntnis der Tradition.

Die gelungene Feier zum hundertjährigen Bestehen des Helmholtz-Fonds sowie die feierliche Auszeichnung der PTB mit ihrem Institut Berlin als „historische Stätte“ der European Physical Society, EPS, beleuchteten dieses Spannungsfeld von Tradition, Wandel und Zukunft auf eindrucksvolle Weise.

So wurde der Helmholtz Fonds u. a. deswegen gegründet, weil die damaligen Mittel „...nicht die für eine im Strome der wissenschaftlichen Entwicklung stehenden Anstalt erforderliche Beweglichkeit und Auskömmlichkeit“ boten. Diese Thematik ist in Form der bisher bei weitem nicht ausreichend auf die PTB übertragenen Flexibilisierungsmaßnahmen des zum 1.1.2013 in Kraft getretenen Wissenschaftsfreiheitsgesetzes, unter anderem im Bereich des Baus, aber auch im Hinblick auf die Vergütung von Spitzenkräften, bis auf den heutigen Tag sehr aktuell, mit erheblichen potenziellen Auswirkungen auf unsere Konkurrenzfähigkeit in der Zukunft.

Herausragende wissenschaftliche Leistungen der Reichsanstalt zu Anfang des 20. Jahrhunderts mit enormer praktischer und wirtschaftlicher Bedeutung beruhten bereits damals auf dem vorausschauenden Aufgreifen zukunftssträchtiger Gebiete und begründeten das Renommee der PTR. Die nun erstmals in Deutschland dafür verliehene EPS-Auszeichnung ehrt die Entdeckung bedeutender grundlegender physikalischer Gesetze und Effekte an der Reichsanstalt, ist jedoch gleichzeitig auch Verpflichtung, immer wieder Arbeitsgebiete zu hinterfragen, um das Aufgreifen neuer Themen möglich zu machen.

Welches sind die zukunftssträchtigen Gebiete in der Metrologie? Wo platziert sich die PTB heute in einem im Vergleich zu damals viel komplexer gewordenen Umfeld in der Dienstleistung und der wissenschaftlichen Forschung in Deutschland, Eu-

ropa und der Welt? Wie können wir Synergien mit Universitäten zur Erfüllung unserer Aufgaben noch besser nutzen und welche formalen Spielräume und Randbedingungen brauchen wir dafür? Diese und andere Fragen wurden zum Auftakt des Jahres intensiv diskutiert.

Drei ehrgeizige Vorhaben wurden identifiziert: die weltbeste Vermessung der Avogadro-Konstanten zur Darstellung des Kilogramm und die präziseste Realisierung des Ampere, beides im „neuen SI“, sowie die Entwicklung und hochpräzise Vernetzung der verlässlichsten und genauesten optischen Uhren der nächsten Generation. Diese Projekte sind gleichzeitig von weitreichender praktischer Bedeutung, werden das Dienstleistungsangebot der PTB signifikant erweitern und haben darüber hinaus wissenschaftliches Entdeckungspotenzial, so z. B. bei der Frage: Sind die Naturkonstanten tatsächlich konstant?

Unsere Dienstleistungen, einschließlich der Politikberatung, sollen unsere Schlüsselrolle im gesetzlichen Messwesen weiter stärken sowie den Einfluss und die Wirkung unserer Arbeit in Politik und Öffentlichkeit ausbauen. Hier wurden in hervorragender Zusammenarbeit mit dem BMWi wesentliche Beiträge zur Ausgestaltung und Umsetzung des neuen Mess- und Eichgesetzes geleistet. Die Einrichtung des Regelermittlungsausschusses unter Leitung der PTB sowie die Fortentwicklung der Konformitätsbewertungsstelle an der PTB werden gerade vorbereitet und sind unter anderem der Garant dafür, dass die PTB auch langfristig eine Schlüsselrolle im gesetzlichen Messwesen einnimmt. Zusammen mit Länderbehörden, staatlich anerkannten Prüfstellen, Wirtschafts- und Verbraucherverbänden werden hier in Zukunft richtungsweisende Entscheidungen für nicht europäisch geregelte Messgeräte getroffen.

Das Aufgreifen von Querschnittsthemen ist aufgrund der breit gefächerten Expertise eine spezifische Stärke der PTB. Das neu aufgestellte Konzept „Metrologie für die Energiewende“ wurde im Ministerium vorgestellt, Workshops fanden statt und werden Anfang 2014 im Bereich „Kraftwerkseffizienz“, „Zentrum für Windenergie“ sowie „Gasnetze“ weiter vertieft. Das Thema „Gesundheit“ wurde als neues Querschnittsthema im Rahmen eines Workshops diskutiert und identifiziert und soll neu aufgegriffen werden. Nicht zuletzt wird die „Nanometrologie“

mit der gemeinsamen Einwerbung des „Laboratory for Emerging Nanotechnology“ (LENA) unter Federführung der Technischen Universität (TU) Braunschweig und einer Fördersumme von ca. 28 Mio. € sowie der hervorragenden Beurteilung der beantragten NanoMet-Graduiertenschule durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) weiter gestärkt.

Die erfolgreiche Kooperation in der Nanometrologie bildet gleichzeitig den Kondensationskeim einer erweiterten Zusammenarbeit mit der TU, die unter neuem Namen, „Metrologie-Initiative Braunschweig“ (MIB) nicht nur die fortgeführte „International Graduate School of Metrology“ (IGSM) beinhaltet, sondern darüber hinaus durch gemeinsame Berufungen, auch von Nachwuchswissenschaftlern, sowie durch Beiträge der PTB zur Lehre nachhaltig erweitert werden soll. Zusammen mit weiter ausgebauten Kollaborationen mit der Universitätsklinik Charité, der Technischen Universität in Berlin und der Leibniz-Universität in Hannover, hier u. a. mit einem gemeinsam beantragten Sonderforschungsbereich, wollen wir die Synergie mit den benachbarten Universitäten stärken und ausbauen.

Die Metrologie in Europa geht mit dem „European Metrology Programme for Innovation and Research“ (EMPIR), das 2013 wesentliche inhaltliche und politische Fortschritte machte, von allen Gremien positiv bewertet wurde und bereits 2014 mit einem voraussichtlichen Gesamtumfang von ca. 600 Mio. € über sieben Jahre starten soll, in großen Schritten weiter voran. Darüber hinaus formen sich gerade mehrere, teilweise noch „virtuelle“ Europäische Zentren, alle mit Beteiligung der PTB, wie zum Beispiel in der Erdbeobachtung, der Metrologie in der Chemie oder der metrologisch-mathematischen Modellierung, mithilfe derer für neue, oft aus Projekten im laufenden europäischen Metrologie-Forschungsprogramm EMRP hervorgegangene Dienstleistungen, die auf europäischer Ebene nachhaltigen Bedarf erwarten lassen, eine dauerhafte Plattform geschaffen werden soll.

Die PTB spielt in weiter zunehmendem Maße eine wichtige Rolle in der weltweiten Metrologie nicht nur durch Mitarbeit in zahlreichen wichtigen internationalen Gremien, unter anderem der Meterkonvention, sondern durch nochmals deutlich gesteigerten Projektumfang im Bereich der technischen

Zusammenarbeit, meist unterstützt und in Kooperation mit dem Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ).

Um all dies weiter zu verfolgen und die Stellung der PTB als eines der führenden Metrologie-Institute international zu sichern und auszubauen, brauchen wir attraktive Arbeitsbedingungen für hochmotivierte Mitarbeiter/innen und zur Gewinnung externer Spitzenkräfte. Hierzu wurden unter anderem die Kinderbetreuungsmöglichkeiten weiter verbessert, die Modelle zur Tele- und Teilzeitarbeit weiter ausgebaut und die Gesundheitsvorsorge intensiviert. Ein sehr wichtiges Thema in diesem Zusammenhang sind die Perspektiven der zeitlich befristeten Mitarbeiter/innen an der PTB, die aufgrund der Einsparung von Dauerstellen in der Vergangenheit eine zunehmend wichtige, unverzichtbare und inzwischen oft tragende Rolle, insbesondere bei der Erfüllung unserer Aufgaben in der Forschung, spielen. Da wir aufgrund der nach wie vor sehr beschränkten Möglichkeiten leider bei weitem nicht allen Geeigneten eine permanente Perspektive an der PTB eröffnen können, muss es unser vordringlichstes Anliegen sein, zum einen hervorragende Arbeits- und damit Weiterqualifikationsmöglichkeiten zu bieten und zum anderen klare Rahmenlinien hin zu einer dauerhaften Anstellung an der PTB aufzuzeigen.

Die PTB konnte auch in diesem Jahr ihren Platz unter den Spitzeninstituten der Metrologie eindrucksvoll bestätigen, sodass wir gut gerüstet in die Zukunft gehen. Ich bedanke mich bei allen, die tatkräftig dazu beigetragen haben, und wünsche uns „PTBisten“ weiterhin viel Freude, Begeisterung und Erfolg bei der Arbeit sowie den Mut, die Kraft und die Bereitschaft, den Wandel für die Zukunft weiter gemeinsam zu gestalten.

# Foreword

Since the founding of the *Physikalisch-Technische Reichsanstalt* 126 years ago, metrology has lost none of its impact for science, society and the economy. On the contrary: For a modern industrial nation in an increasingly complex, globally networked world, metrology is significantly gaining in importance. Indeed, it is often even of decisive importance. In order to shape its future responsibly, we should, however, be aware of and acknowledge our tradition.

Both the successful ceremony on the occasion of the 100-year anniversary of the *Helmholtz-Fonds* (Helmholtz Fund) and the honouring of PTB, with its Berlin Institute, with the “Historic Site” award of the European Physical Society (EPS) have, in an impressive manner, highlighted this broad field between tradition, change and the future.

Thus the *Helmholtz Fonds* was founded because, among other things, the funds available at that time did not provide “... the flexibility and sufficiency required by an institute standing in the tide of scientific development”. In view of the flexibility measures which – unfortunately not sufficiently enough – have been delegated to PTB in the wake of the *Wissenschaftsfreiheitsgesetz* (Scientific Freedom Act) which became effective on 1.1.2013, this topic is still relevant to this very day (e.g. concerning the field of construction, but also with regard to the remuneration of highly qualified personnel), having considerable consequences for our future competitiveness.

The outstanding scientific achievements of the *Physikalische-Technische Reichsanstalt* (PTR) at the beginning of the 20th century, which were of enormous practical and economic relevance, were based even then on the foresighted taking up of fields with a promising future and, thereby, established the prestige of the PTR. The EPS prize awarded for the first time here in Germany honours the discovery of important fundamental laws of physics and effects by the PTR. It is, however, at the same time also an obligation to continually call working fields into question, in order to enable the taking up of new subjects.

Which are the metrological fields of the future? Where does PTB see itself today in services and in scientific research in Germany, Europe and in the world in an environment which has become much more complex – compared to former times? How

can we better utilize synergies with universities in order to fulfil our tasks, and which formal leeway and boundary conditions do we need for this? These and other questions were intensively discussed at the beginning of the year.

Three ambitious scientific projects were identified and shall be achieved: the world’s best measurement of the Avogadro constant for the realization of the kilogram and the most precise realization of the ampere, both in the context of the “new SI”, as well as the development and highly precise linking of the most reliable and most accurate optical clocks of the next generation. These projects are not only of far-reaching practical relevance, but they will also significantly extend PTB’s range of services. Furthermore, they hold a potential for scientific discovery, thus, e.g., with regard to the question: Are the natural constants actually constant?

Our services, including political consultation, are to further strengthen our key role in legal metrology and to expand our influence and the impact of our work in politics and for the public. Here, in excellent cooperation with the BMWi, considerable contributions were made in terms of the elaboration and implementation of the new Weights and Verification Act. The establishment of the *Regelermittlungsausschuss* (“Rule Determination Committee”) headed by PTB as well as the further development of the conformity assessment body at PTB are in the process of preparation and are, among other things, the guarantee that PTB will assume a key role in legal metrology also in the long run. Together with federal state authorities, state-approved testing bodies, trade associations and consumer organizations, landmark decisions will be taken here in future for non-European-regulated measuring instruments.

Taking up cross-sectional subjects is a specific strength of PTB due to its diversified expertise. The newly set up concept “Metrology for the energy transition” was presented in the Ministry, workshops were held and the topics “Power plant efficiency”, “Centre for wind energy” as well as “Gas networks” will be explored further at the beginning of 2014. The topic “Health” was discussed and identified as a new cross-sectional subject within the framework of a workshop and is envisaged to be taken up. Not least, the field of “Nanometrology” will be strengthened – not only through the joint acquisition of

the “Laboratory for Emerging Nanotechnology” (LENA) under the auspices of the Technical University (TU) Braunschweig and with a funding volume of approx. € 28 million, but also due to the fact that the *NanoMet-Graduiertenschule* (NanoMet Graduate School) which has been applied for, has been excellently assessed by the *Deutsche Forschungsgemeinschaft* (German Research Foundation – DFG).

At the same time, the successful collaboration in nanometrology forms the “condensation nucleus” of an extended cooperation with the TU. Under the new name *Metrologie-Initiative Braunschweig* (Metrology Initiative Braunschweig – MIB), it not only includes the continuing “International Graduate School of Metrology” (IGSM), but furthermore is to be considerably expanded by means of joint appointments, also of young scientists, as well as teaching contributions by PTB. By means of further intensifying collaborations with the Charité University Hospital, the Technical University in Berlin and the Leibniz University in Hanover, here, among other things, by the joint application of a *Sonderforschungsbereich* (a special field of research to be supported by the DFG), we want to strengthen and expand the synergy with the neighbouring universities.

Metrology in Europe is advancing at a great pace with the “European Metrology Programme for Innovation and Research” (EMPIR), which made considerable progress politically and in terms of content in 2013, was positively assessed by all the boards and committees, and is to begin as early as 2014 with an expected total volume of approx. € 600 million over seven years. Furthermore, several European Centres are being set up; some of them are still only “virtual” in part, however PTB is participating in all of them (as, for example, in Earth observation, metrology in chemistry and metrological-mathematical modelling). With their help, a permanent platform is to be created for new services which often emanate from projects in the current European Metrology Research Programme (EMRP) and for which lasting demand is expected at the European level.

PTB plays an important, continually increasing role in global metrology, not only as a result of collaboration in numerous important international boards and committees (among others, in the *Metre Convention*), but rather as a result of a – once again – clearly increased project volume in the field

of technical cooperation, mostly supported by and in cooperation with the *Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung* (Federal Ministry of Economic Cooperation and Development – BMZ).

To further pursue all this and to safeguard and expand the position of PTB as one of the leading international metrology institutes, we need attractive working conditions for highly motivated staff members and to acquire top personnel. To this end, among other things, the child care facilities have been further improved, the models for teleworking and part-time work have been expanded even more and the healthcare provisions have been intensified. A very important subject in this connection is the prospects of PTB staff members who have time-limited contracts but who, due to the cutting down of permanent posts in the past, play an ever increasing important, indispensable and, meanwhile, often a major role, particularly in fulfilling our tasks in the field of research. Due to our still very limited options, we unfortunately cannot by far offer the prospect of a permanent post at PTB to all suitable staff members. It therefore must be our most pressing concern, on the one hand, to offer outstanding conditions for employment and for obtaining further qualifications as well as, on the other hand, to point out clear target lines showing the way to a permanent post at PTB.

This year, too, PTB was able to impressively assert its place among the top metrological institutes; thus we can meet the future well armed. My thanks go to all of you who have actively contributed to our success and I wish us “PTBists” much lasting joy, enthusiasm and success in our work, as well as the continued courage, strength and willingness to jointly shape the change for our future.



Dieser gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2013. Den kompletten Jahresbericht mit Nachrichten und speziellen Listen finden Sie auf den Internetseiten der PTB (unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de) im Bereich „Publikationen“).

Außerdem führen wir Sie von dort zur Datenbank PTB-Publica, in der bibliografische Angaben zu sämtlichen Veröffentlichungen und Vorträgen von PTB-Mitarbeitern gesammelt werden.

### **Jahresbericht im Internet**

- Vorwort
- Nachrichten des Jahres
- Aus den Abteilungen
  - Abteilungsleiterberichte
  - Nachrichten
  - Tätigkeitsbereiche
  - Forschungsvorhaben
  - Kooperationen
- Zahlen und Fakten
  - Aktuelle Statistiken
- Externe Lehrtätigkeit
  - Vorlesungen an Universitäten, Fachhochschulen und Akademien
- Promotionen
- Kuratorium
  - Mitglieder des Kuratoriums
- Organigramm (Stand: 1. Dezember 2013)
- Datenbanken
  - PTB-Publica (Wissenschaftliche Veröffentlichungen)
  - MICert (Zulassungen des Eichwesens)
  - Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort • Foreword	
Nachrichten des Jahres • News of the Year	8
Fachabteilungen • Scientific Divisions	8
Kuratorium • Advisory Board	20
Präsidium • Presidential Board	22
Qualitätsmanagement • Quality Management	26
Technologietransfer • Technology Transfer	27
Gesetzliches Messwesen • Legal Metrology	28
Technische Zusammenarbeit • Technical Cooperation	30
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit • Press and Information Office	33
Akademische Abschlüsse • Academic Degrees	35
Promotionen • Doctorates	35
Diplom- und Masterarbeiten • (Master) Theses	36
Bachelorarbeiten • Bachelor Theses	37
Zahlen und Fakten • Figures and Facts	38
Berichte der Abteilungen	
Mechanik und Akustik	47
Elektrizität	61
Chemische Physik und Explosionsschutz	73
Optik	85
Fertigungsmesstechnik	97
Ionisierende Strahlung	107
Temperatur und Synchrotronstrahlung	117
Medizinphysik und metrologische Informationstechnik	135
Anhang	
Kuratorium	153
Organigramm	154
Arbeitsgebiete	156
Geländepläne	160

# Nachrichten des Jahres • News of the Year

## Quantenvoltmeter zur Messung von Wechselspannungen für die Industrie

In einem vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Technologietransferprojekt (MNPQ Projekt) der PTB mit zwei Industriepartnern wird ein Josephson-Messsystem für Gleich- und Wechselspannungen – ein AC-Quantenvoltmeter – für den Einsatz in industriellen Kalibrierlaboratorien entwickelt. Mit diesem neuen System werden die wesentlichen Vorteile von Normalen, die auf elektrischen Quanteneffekten basieren, nun auch für industrielle Laboratorien verfügbar: Kleinste Messunsicherheiten ohne aufwendige Rekalibrierungen verbessern die Leistung bei erhöhter Wirtschaftlichkeit. Das System basiert auf Josephson-Schaltungen, die in der PTB hergestellt werden, und ist für Spitzenspannungen bis  $\pm 10$  V und Frequenzen bis 10 kHz ausgelegt. Mit einem Prototyp konnten in der PTB bereits Wechselspannungen von 10 Hz bis 4 kHz gemessen werden, wobei Unsicherheiten von wenigen  $\mu\text{V}/\text{V}$  innerhalb einer Minute Messzeit erreicht wurden. Damit ist das neue AC-Quantenvoltmeter etwa 20-mal genauer als übliche Kalibratoren und dabei 60-mal schneller als bislang übliche Messverfahren mit Thermokonvertern. Das AC-Quantenvoltmeter kann darüber hinaus auch kommerzielle Gleichspannungsnormale (DC-Referenzen und -Voltmeter) kalibrieren.

Durch Vor-Ort-Tests in einem akkreditierten Kalibrierlabor wird das neue AC-Quantenvoltmeter jetzt für den praktischen Gebrauch optimiert. Wesentliche Zielspezifikation ist eine relative Unsicherheit von  $2,5 \mu\text{V}/\text{V}$  bei 1 kHz. Die Entwicklung verfolgt ein modulares Konzept, welches eine Erweiterung des Systems bis hin zu einem universellen „Quantenkalibrator“ für Spannungs-, Widerstands- und Stromstärkenormale ermöglichen soll.

## Quantum voltmeter to measure AC voltages for industry

Within the scope of a technology transfer project (MNPQ project) which is supported by the Federal Ministry of Economics and Technology and involves PTB and two partners from industry, a Josephson measuring system for DC and AC voltages – an AC quantum voltmeter – has been developed for use in industrial calibration laboratories. With this new system, the considerable advantages of standards which are based on electrical quantum effects will also become available to industrial laboratories: very low measurement uncertainties without tedious recalibrations improve performance while becoming more economical. The system is based on Josephson arrays, which are manufactured at PTB, and is designed for peak voltages of up to  $\pm 10$  V and frequencies of up to 10 kHz. With a prototype, AC voltages from 10 Hz to 4 kHz have already been measured at PTB, whereby uncertainties of a few  $\mu\text{V}/\text{V}$  within a measuring time of one minute were attained. This makes the new AC quantum voltmeter approximately 20 times more accurate than conventional calibrators and 60 times faster than the measurement procedures with thermal converters used to date. In addition, the AC quantum voltmeter can also calibrate commercial DC voltage standards (DC references and DC voltmeters).

The new AC quantum voltmeter is now being optimized by means of on-site tests at an accredited laboratory. The main objective is to reach a relative uncertainty of  $2.5 \mu\text{V}/\text{V}$  at 1 kHz. The system will be developed in a modular approach which will allow a future extension of the system to a universal «quantum calibrator» for voltage, resistance and current standards.



Ein kommerzielles Präzisionsmessgerät (Bildmitte, unten) wird durch das AC-Quantenvoltmeter im Wechselspannungsmodus kalibriert.

A commercial high-accuracy instrument (in the centre of the picture below) is calibrated by means of the AC quantum voltmeter in the AC voltage mode.

## Roadmap zur Neudefinition des Kilogramm

Im Zusammenhang mit den Diskussionen zur Revision des Internationalen Einheitensystems (SI) wurde auf der diesjährigen Sitzung des beratenden Komitees für Masse und abgeleitete Größen (CCM) eine neue Empfehlung, die CCM-Recommendation G 1 (2013) „On a new definition of the kilogram“, verabschiedet. Diese Empfehlung präzisiert frühere CCM-Empfehlungen und formuliert vier wesentliche Bedingungen, die aus Sicht des CCM erfüllt sein müssen, bevor das Kilogramm neu definiert werden kann:

- R1.** Wenigstens drei Experimente, darunter Wattwaagenexperimente und das Avogadroexperiment, liefern konsistente Werte für die Planck-Konstante  $h$  mit relativen Standardunsicherheiten nicht größer als  $5 \cdot 10^{-8}$ .
- R2.** Wenigstens eines dieser Ergebnisse weist eine relative Standardunsicherheit nicht größer als  $2 \cdot 10^{-8}$  auf.
- R3.** Die BIPM-Prototypen, das „BIPM ensemble of reference mass standards“ und die Massennormale der Wattwaagenexperimente bzw. des Avogadroexperimentes sind so direkt wie möglich mit dem Internationalen Kilogramm-Prototyp verglichen worden.
- R4.** Die Prozeduren der zukünftigen Darstellung und Weitergabe des Kilogramm, wie in der entsprechenden „mise en pratique“ beschrieben, sind gemäß den Grundsätzen des CIPM MRA erfolgreich erprobt und validiert worden.

Diese CCM-Empfehlung wurde inzwischen vom Internationalen Komitee für Maß und Gewicht (CIPM) bestätigt.

## Roadmap towards the redefinition of the kilogram

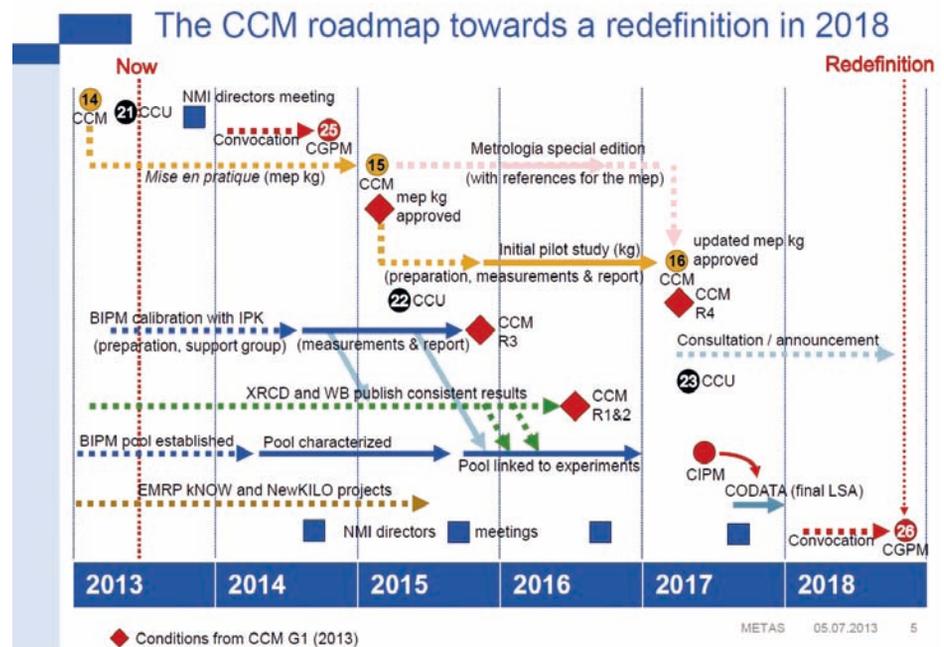
In connection with the discussions about the revision of the International System of Units (SI), a new recommendation (CCM Recommendation G 1 (2013) “On a new definition of the kilogram”) was adopted at this year’s session of the Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM). This recommendation specifies previous CCM Recommendations and formulates four fundamental conditions which the CCM considers indispensable for the kilogram to be re-defined:

- R1:** At least three experiments, among these watt-balance experiments and the Avogadro experiment, provide consistent values for Planck’s constant  $h$  with relative standard uncertainties of no more than  $5 \cdot 10^{-8}$ .
- R2:** At least one of these results exhibits a relative standard uncertainty of no more than  $2 \cdot 10^{-8}$ .
- R3:** The BIPM prototypes, the “BIPM ensemble of reference mass standards”, and the mass standards of the watt-balance experiments and of the Avogadro experiment, respectively, have been compared with the International Prototype of the Kilogram as directly as possible.
- R4:** The procedures for the future realization and dissemination of the kilogram, as described in the relevant “mise en pratique”, have been successfully tested and validated in accordance with the principles of the CIPM MRA.

This CCM Recommendation has meanwhile been confirmed by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM).

CCM-Roadmap zur möglichen Neudefinition des Kilogramm; die vier Bedingungen des CCM für eine Neudefinition sind als Meilensteine (rot markierte Rauten mit den Bezeichnungen CCM R1 bis R4) zu erkennen. (Quelle: METAS)

CCM roadmap towards the possible redefinition of the kilogram. The four conditions of the CCM for a redefinition are distinguishable as milestones (red lozenges with the designations CCM R1 to R4). (Source: METAS)



### **Metrologie für elektrochemische Energiespeichersysteme: Bestimmung des Lade- und Gesundheitszustandes von Lithium-Ionen-Batterien**

Die Forschung zu den metrologischen Grundlagen von elektrochemischen Energiespeichern ist ein neues Arbeitsgebiet in der PTB. Für Elektrofahrzeuge fehlen Verfahren für die Qualitätssicherung, um vom Batterie- bzw. Fahrzeug-Hersteller garantierte Lebensdauer-Angaben für Lithium-Ionen-Batterien zu verifizieren. Die elektrochemische Impedanzspektrometrie (EIS) ist eine Messmethode, die Aussagen zum Gesundheits- (state of health, SOH) und Ladezustand (state of charge, SOC) und damit zum Alterungsverhalten einer Lithium-Ionen-Batterie schnell und zerstörungsfrei liefert. Allerdings fehlt bisher für dieses Messverfahren eine metrologische Referenz.

Gegenwärtig sind die Ergebnisse der EIS-Messungen, die mit unterschiedlichen Messgeräten erhalten werden, für die Qualitätssicherung wenig geeignet, da es keine Aussagen zur Unsicherheit der gemessenen Parameter gibt und die Ergebnisse geräteabhängig sein können. Über die Zuordnung der aus den Impedanzspektren ermittelten Parameter zu den chemischen Vorgängen in der Batterie während ihres Einsatzes und bei der Lagerung bei unterschiedlichen Umweltbedingungen fehlen gesicherte Angaben. Die zwei jetzt realisierten temperaturkontrollierten EIS Referenzmessplätze ermöglichen es, für den SOC und SOH wesentliche Parameter aus den Impedanzspektren zu identifizieren und rückgeführt auf das SI zu messen.

Mithilfe einer zusammen mit der Arbeitsgruppe „Wechselstrom-Gleichstrom Transfer, Impedanz“ entwickelten Referenzimpedanz erfolgte die geräteunabhängige Charakterisierung der Messplätze. Der Aufbau weiterer dynamischer Referenzimpedanzen mit variierenden Widerständen und Kapazitäten, die den relevanten mHz- bis kHz-Messbereich abdecken, ist geplant. Damit ist es erstmals möglich, elektrochemische Impedanzspektrometer in diesem Messbereich zu kalibrieren.

Die Ergebnisse der EIS-Referenzmessungen an Lithium-Ionen-Batteriezellen sind auf die Qualitätssicherung der Messergebnisse an anderen Energiespeichern und -wandlern, wie z. B. Brennstoffzellen, übertragbar. Es ist geplant, das Referenzmessverfahren zukünftig für die Untersuchung von Batteriezellen und -modulen bis 150 Ah Kapazität auszubauen.

### **Metrology for electrochemical energy storage systems: Determination of the state of charge and the state of health of lithium-ion batteries**

Research related to the metrological bases of electrochemical energy storage is a new field of work at PTB. For electrical vehicles, quality assurance procedures to verify the life-span guarantee given for lithium-ion batteries by the manufacturer of batteries or vehicles are lacking. Electrochemical impedance spectrometry (EIS) is a measurement method which furnishes fast and non-destructive information on the state of health (SOH) and the state of charge (SOC) and, thus, on the ageing behaviour of a lithium-ion battery. A metrological reference for this measurement procedure has, however, so far been lacking.

Presently, the results of the EIS measurements, which are obtained with different measuring instruments, are not really suited for quality assurance as they do not provide any information on the uncertainty of the parameters measured, and as the results may depend on the device. Secured information on the assignment of the parameters determined from the impedance spectra to the chemical processes in the battery during its use and storage under different environmental conditions are lacking. The two temperature-controlled EIS reference measuring set-ups realized now allow essential parameters for the SOC and SOH to be identified from the impedance spectra and to be measured in such a way that they are traceable to the SI.

With the aid of a reference impedance developed in cooperation with the “AC/DC Transfer, Impedance” Working Group, the measuring set-ups were characterized independent of the device. The establishment of further dynamic reference impedances with varying resistances and capacitances, which cover the relevant mHz to kHz measurement range, is planned. This allows electrochemical impedance spectrometers to be calibrated for the first time in this measurement range.

The results of the EIS reference measurements carried out on lithium-ion battery cells can be transferred to the quality assurance of the results of measurements carried out on other energy stores and converters such as, e.g., fuel cells. It is planned to extend the reference measurement procedure in future for the investigation of battery cells and modules up to a capacity of 150 Ah.

## Mikroverzahnungsnormal

Die PTB hat mit Partnern aus der Industrie im Rahmen eines AIF-Projekts ein neuartiges Mikroverzahnungsnormal entwickelt. Hiermit lässt sich die Eignung von Koordinatenmessgeräten mit taktilen und/oder optischen Sensoren sowie die von dimensionell messenden Computertomografen (CT) für die Messung von Mikroverzahnungen überprüfen und vergleichen.

Mikro- und Kleinstverzahnungen mit Stirnmodulen zwischen 1  $\mu\text{m}$  und 1 mm sind zu einem unverzichtbaren Bestandteil der modernen Produktion geworden. Die Anwendungen, etwa in der Mikrosystemtechnologiefertigung oder der Mikrorobotik, erfordern häufig Getriebe mit einem Minimum an Material und dennoch hoher Präzision und Effizienz. Allerdings stellen Mikroverzahnungen aufgrund ihrer Größe und Geometrie besonders hohe Herausforderungen an die Messtechnik. Neben der sonst für Verzahnungen üblichen taktilen Messtechnik werden zunehmend auch andere Messprinzipien, z. B. optische oder tomografische, in Betracht gezogen. Allerdings fehlten bislang geeignete Normale, um die Rückführung dieser Messungen sicherzustellen und damit ihre Güte durch Ermittlung einer aufgabenspezifischen Messunsicherheit einschätzen zu können.

Das neue Mikroverzahnungsnormal der PTB verkörpert vier verschiedene Verzahnungsgrößen mit Stirnmodulen von 0,1/0,2/0,5/1,0 mm. An dem Normal lassen sich sowohl Profil- als auch Flankenlinienmessungen durchführen sowie das diametrale Zweikugelmaß bestimmen. Die Kalibrierung aller Parameter erfolgte auf einem Mikrokoordinatenmessgerät mit Messunsicherheiten  $U(k = 2)$  von unter 1  $\mu\text{m}$ . Die universelle Eignung des Normals für taktile und optische Sensoren sowie für die dimensionelle Computertomografie konnte durch Vergleichsmessungen an 5 verschiedenen Messgeräten nachgewiesen werden.

Mikroverzahnungsnormal  
(Außendurchmesser 24 mm)



## Micro gear measurement standard

Within the scope of an AiF project, PTB has developed a novel micro gear measurement standard in cooperation with partners from industry. This standard allows the suitability of coordinate measuring machines with tactile and/or optical sensors and the suitability of dimensionally measuring computer tomographs (CTs) for the measurement of micro gears to be checked and compared.

Micro gears and smallest-sized gears with transverse modules between 1  $\mu\text{m}$  and 1 mm have become an indispensable part of modern manufacturing. The applications, for example in micro systems technology manufacturing or in microrobotics, often require gears with a minimum of material, but with a high degree of precision and efficiency. Due to their size and geometry, micro gears present, however, particularly high challenges for metrology. In addition to tactile metrology, which is usually applied to gears, other measurement principles (e.g. optical or tomographic principles) are increasingly taken into account. Suitable measurement standards which ensure the traceability of these measurements and, thus, allow their quality to be assessed by the determination of a task-specific measurement uncertainty have so far, however, been lacking.

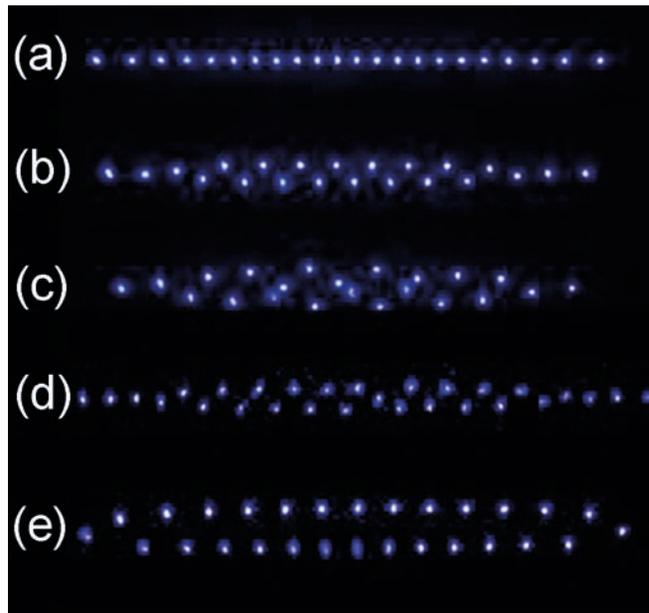
PTB's new micro gear measurement standard embodies four different gear quantities with transverse modules of 0.1/0.2/0.5/1.0 mm. On the standard, both profile and helix measurements can be performed and the diametrical dimension over balls can be determined. All parameters were calibrated on a micro coordinate measuring machine with measurement uncertainties  $U(k = 2)$  of less than 1  $\mu\text{m}$ . The universal suitability of the standard for tactile and optical sensors as well as for dimensional computer tomography could be demonstrated by comparison measurements which were carried out on five different measuring instruments.

Micro gear measurement  
standard (outer diameter:  
24 mm)

## Symmetriebrüche in Ionen-Coulomb-Kristallen

Wissenschaftler des Exzellenzclusters QUEST haben lasergekühlte Ionen in sogenannten Ionen-Coulomb-Kristallen genutzt, um Symmetriebrüche kontrolliert zu erzeugen. Dabei konnten sie das Auftreten von Defekten beobachten. Die experimentelle Realisierung dieser sogenannten topologischen Defekte in einem wohlkontrollierten System eröffnet neue Wege zur Untersuchung von Quanten-Phasenübergängen und Einsicht in die Nicht-Gleichgewichtsdynamik von komplexen Systemen. Unter anderem könnten weiterführende Experimente Rückschlüsse auf die Entwicklung des Universums kurz nach dem Urknall zulassen. Die Ergebnisse wurden in der Fachzeitschrift *Nature Communications* veröffentlicht.

In einer internationalen Kooperation mit Kollegen aus dem amerikanischen Los Alamos National Lab, der Universität Ulm und der Hebrew University in Israel gelang es erstmals, topologische Defekte in einem atom-optischen Experiment im Labor zu demonstrieren. Topologische Defekte sind Abweichungen in der räumlichen Struktur, die durch den Bruch der Symmetrie entstehen, wenn Teile eines Systems nicht miteinander kommunizieren können. Sie bilden sich während eines Phasenübergangs und zeigen sich als nicht zusammenpassende Bereiche.



Mit einer EMCCD-Kamera aufgenommene Ytterbium-Ionen in einem Ionen-Coulomb-Kristall. Die ionisierten Atome fluoreszieren im Laserlicht, der Abstand zwischen den Ionen beträgt ca. 10-20  $\mu\text{m}$ .

In den oberen Reihen sind verschiedene symmetrische Ionen-Anordnungen (Phasen) im zentralen Bereich des Coulomb-Kristalls zu sehen: (a) linear wie auf einer Perlschnur, (b) zweidimensional im Zick-Zack und (c) als dreidimensionale Helix. Wird jedoch eine schnelle Änderung von einer Phase in die andere erzwungen, kommt es zu Unregelmäßigkeiten: (d) lokalisierter Defekt zwischen zwei in sich symmetrischen Bereichen und (e) ausgeweiteter Defekt, bei dem die Anordnung der Ionen langsam von der Zick-Zack-Orientierung in die spiegelbildliche übergeht.

## Symmetry breakings in ion Coulomb crystals

Scientists of the Excellence Cluster QUEST have used laser-cooled ions in so-called “ion Coulomb crystals” in order to generate symmetry breakings in a controlled manner. Thereby, they were able to observe the occurrence of defects. Realizing these so-called “topographical defects” experimentally within a well-controlled system opens up new possibilities when it comes to investigating quantum phase transitions and looking in detail into the non-equilibrium dynamics of complex systems. Among other things, conclusions can be drawn as to the development of the universe shortly after the big bang. The results were published in the scientific journal “*Nature Communications*”.

Within the scope of an international cooperation with colleagues from the Los Alamos National Lab (USA), from the University of Ulm (Germany) and from the Hebrew University (Israel), researchers have now, for the first time, succeeded in demonstrating topological defects in an atomic-optical

experiment in the laboratory. Topological defects are errors in the spatial structure which are caused by the breaking of the symmetry when particles of a system cannot communicate with each other. They form during a phase transition and present themselves as non-matching areas.

The experimental challenge for the researchers consisted in being

Ytterbium ions in an ion Coulomb crystal, taken with an EMCCD camera. The ionized atoms fluoresce in the laser light; the distance between the ions is approx. 10  $\mu\text{m}$  to 20  $\mu\text{m}$ .

In the upper rows, different symmetrical ion arrangements (phases) are encountered in the central area of the Coulomb crystal: (a) linear, like a string of pearls; (b) two-dimensional in zigzag, and (c) as a three-dimensional helix. If, however, a fast transition from one phase to another is induced with force, irregularities occur: (d) localized defect between two areas which are actually symmetrical, and (e) extended defect in which the ions slowly change from one zigzag orientation to its mirror symmetry.

Die experimentelle Herausforderung für die Forscher lag darin, die sichere Kontrolle über ein komplexes Vielteilchensystem zu erlangen und durch eine gezielte Veränderung der äußeren Bedingungen die Symmetriebrechung herbeiführen zu können. Dies gelang mithilfe von Ytterbium-Ionen, die in sogenannten Paul-Fallen im Ultrahochvakuum gefangen und mithilfe von Laserlicht auf Temperaturen von wenigen Millikelvin gekühlt wurden. Die gefangenen, positiv geladenen Teilchen stoßen sich in der Falle ab und nehmen bei diesen ultratiefen Temperaturen eine kristalline Struktur an (Abb. a–c).

Werden die Parameter des Falleneinschlusses schneller als die Schallgeschwindigkeit im Kristall verändert, so treten topologische Defekte auf (Abb. d–e), während die Ionen eine neue Gleichgewichtsbedingung im Kristall suchen. Die Stabilität dieser Effekte konnte mithilfe numerischer Simulationen untersucht und optimiert werden. Damit ergibt sich ein ideales System, um flexibel und mit höchster Sensitivität die Physik symmetriebrechender Übergänge zu erforschen.

Das demonstrierte neue System ermöglicht in Zukunft weiterführende Experimente zu Phasenübergängen in klassischen Systemen und in der Quantenwelt sowie Tests im Bereich der Physik nicht-linearer Effekte (z. B. Solitonen) in einem wohlkontrollierten Vergleichssystem.

able to control a complex multi-particle system and to induce an intentional change in the external conditions to obtain the symmetry breaking. This was achieved by means of ytterbium ions which were trapped in so-called “radio-frequency ion traps” in ultra-high vacuum and were cooled down to a few millikelvin with the aid of laser light. The trapped, positively charged particles repel each other inside the trap and, at such ultra-low temperatures, take on a crystalline structure (Fig. a–c).

If the parameters of the trap enclosure are varied faster than the speed of sound in the crystal, then topological defects occur (Fig. d–e) while the ions are seeking a new equilibrium condition in the crystal. The stability of these effects was investigated and optimized by means of numerical simulations. This provides an ideal system to investigate the physical properties of symmetry-breaking transitions with the highest sensitivity.

The new system now demonstrated will soon allow further experiments on phase transitions in classical systems and in the quantum universe as well as tests in the field of nonlinear physics (e.g. solitons) to be performed in a well-controlled comparative system.

## Medizinischer Computertomograf für die Dosimetrie

In der medizinischen Röntgendiagnostik ist die Computertomografie (CT) eine weltweit in Kliniken und Praxen etablierte Methode. Die rasante technologische Entwicklung bei den CT-Geräten mit immer größeren Scanbreiten hat dazu geführt, dass das bewährte Dosimetrie-Konzept für die Computertomografie nicht mehr konsistent verwendet werden kann. Inzwischen gibt es eine Reihe verschiedener Vorschläge aus international tätigen Arbeitsgruppen für moderne Dosimetriekonzepte. Aus Sicht der PTB ist ein weltweit einheitliches CT-Dosiskonzept unabdingbar, um auch in Zukunft die Vergleichbarkeit von Dosismessgrößen zu gewährleisten.

Da die PTB sowohl für die Darstellung und Weitergabe der Einheiten für die in der CT-Dosimetrie verwendeten Messgrößen als auch für die Bauartprüfungen von CT-Diagnostikdosimetern zuständig ist und darüber hinaus in entsprechenden nationalen und internationalen Normungsgremien mitarbeitet, besteht hier dringender Handlungsbedarf. Aus diesem Grund hat die PTB einen eigenen medizinischen Computertomografen für die CT-Dosimetrie angeschafft. Das Gerät wird zunächst als Referenzmessplatz für die CT-Dosimetrie charakterisiert. Es wird dann zur Prüfung der vorgeschlagenen Dosiskonzepte und der in der CT-Dosimetrie verwendeten und neuartigen Detektoren auch im Rahmen von Bauartprüfungen dienen.

Computertomograf der PTB. Er ist ein in Kliniken und Praxen eingesetzter Scanner-Typ, der in der PTB zur Forschung und zur Lösung dosisbezogener Fragen dient.

PTB's CT scanner. This CT scanner is a model that is used in hospitals and medical practices; at PTB, it is used for research and for solving issues with regard to dose determination.

## A medical CT scanner for dosimetry

In medical X-ray diagnostics, computed tomography (CT) is a method which has established itself in hospitals and medical practices worldwide. Due to the rapid technological development of CT devices with constantly increasing scanning widths, the well-proven dose concept for computed tomography can no longer be used consistently. Meanwhile, international working groups have proposed a series of different modern CT dose concepts. PTB is of the opinion that a uniform CT dose concept that is valid worldwide is indispensable for continuing to ensure the comparability of dose measurands.

Since PTB is not only responsible for realizing and disseminating the units of the quantities used in CT dosimetry but also for issuing type approvals for CT dosimeters for radiodiagnostics, and since it cooperates furthermore in the respective national and international standardization committees, there is an urgent need for action in this field. For this reason, PTB has purchased its own medical CT scanner for CT dosimetry. This CT will first be characterized as a reference measuring facility for CT dosimetry. The reference measuring facility will then be used to test the proposed dose concepts and the novel detectors used in CT dosimetry – also within the scope of type tests.

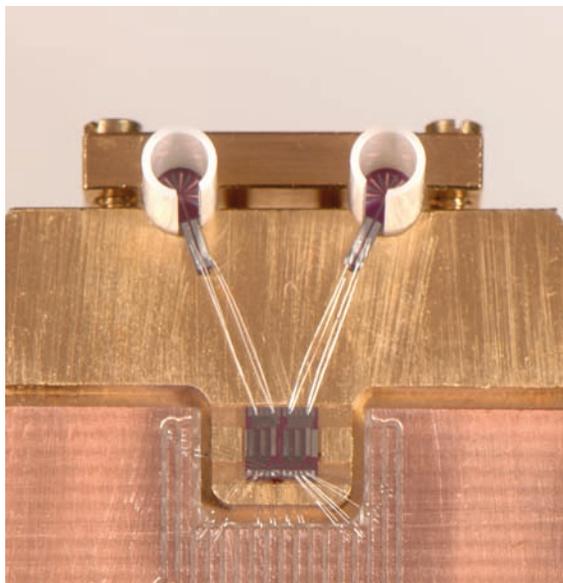


## Quantenmetrologie mit SQUIDs

Die PTB hat weltweit eine führende Rolle in der Entwicklung von SQUIDs für Anwendungen in der Präzisionsmesstechnik inne. PTB-SQUID-Sensoren wurden jetzt in zwei internationalen Kooperationsprojekten erfolgreich für Experimente der Quantenphysik eingesetzt. Das eine Projekt war ein sogenanntes Bell-Experiment der Gruppe um Anton Zeilinger von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Um dabei quantenmechanisch verschränkte Photonen hocheffizient und in genügender Anzahl zu detektieren, wurden supraleitende Transition Edge Sensor-Mikrokalorimeter der Quantendetektorgruppe des National Institute of Standards and Technology (NIST, USA) zusammen mit PTB-SQUID-Stromsensoren als Einzelphotonendetektoren eingesetzt. Die Konfiguration der verwendeten TES/SQUID-Detektormodule und deren Tests erfolgten an der PTB. Durch diese Experimente wurde der bisher vollständigste Nachweis der quantenmechanischen Verschränkung von Photonen erbracht. Photonen sind damit die ersten Quantenteilchen, für die alle sogenannten Schlupflöcher in Bell-Experimenten geschlossen wurden.

Das zweite Experiment gehört zu einer bereits seit Mitte der 90er Jahre bestehenden engen Kooperation der PTB-Kryosensorgruppe mit der Gruppe von John Saunders von der Royal Holloway University London, bei der besonders empfindliche NMR-Spektrometer für Experimente bei ultratiefen Temperaturen entwickelt werden. PTB-SQUIDs haben nun NMR-Untersuchungen mit verbesserter Empfindlichkeit an der Quantenflüssigkeit Helium-3 bei sehr tiefen Temperaturen ermöglicht. Unter anderem konnten die suprafluiden Eigenschaften extrem dünner Helium-3-Flüssigkeitslamellen in Kavitäten unter Druck und bei Temperaturen bis unter 1 mK untersucht werden. Bei den Messungen zeigte sich, dass das relativ komplizierte Phasendiagramm von Helium-3 durch das „Einsperren“ und die Eigenschaften seiner Grenzfläche zur Umgebung stark modifiziert wird.

Detektormodul mit zwei TES-Photonenzählern und einem SQUID-Sensorchip mit zwei Stromsensoren



Detector module with two TES photon counters and a SQUID sensor chip with two current sensors

## Quantum metrology with SQUIDs

PTB has taken on a worldwide leading role in the development of SQUIDs for precision measurements. Within the scope of two international cooperation projects, SQUID sensors developed and fabricated at PTB have now been successfully used in challenging quantum physics experiments. One of these projects was a so-called “Bell experiment” of Anton Zeilinger’s group from the Austrian Academy of Sciences (Österreichische Akademie der Wissenschaften). To detect quantum-mechanically entangled photons with high efficiency (and a sufficient number of them), superconducting transition edge sensor microcalorimeters of the *Quantum Detector Group* of the *National Institute of Standards and Technology* (NIST, USA) and PTB’s SQUID current sensors were used as single-photon detectors. The configuration of the TES/SQUID detector modules used and their tests were performed at PTB. These experiments have allowed the most complete detection of the quantum-mechanical entanglement of photons so far. This makes photons the first quantum particles for which all the so-called “loopholes” in Bell experiments have been closed.

The second experiment is part of a close cooperation which has existed since the mid-1990s between PTB’s *Cryosensors Group* and John Saunders’ group at the *Royal Holloway, University of London*, in which particularly sensitive NMR spectrometers are being developed. The PTB SQUIDs used have now enabled – with unprecedented sensitivity – NMR experiments on the quantum fluid helium-3 at ultra-low temperatures. Among other things, the super-fluid properties of extremely thin helium-3 liquid lamellas in cavities under pressure and down to temperatures well below 1 mK were investigated. The measurements showed that the relatively complex phase pattern of helium-3 is strongly modified by the “confinement” and by the properties of its surface towards its environment.

## Kernspin-Präzessionsmessungen zur physikalischen Grundlagenforschung

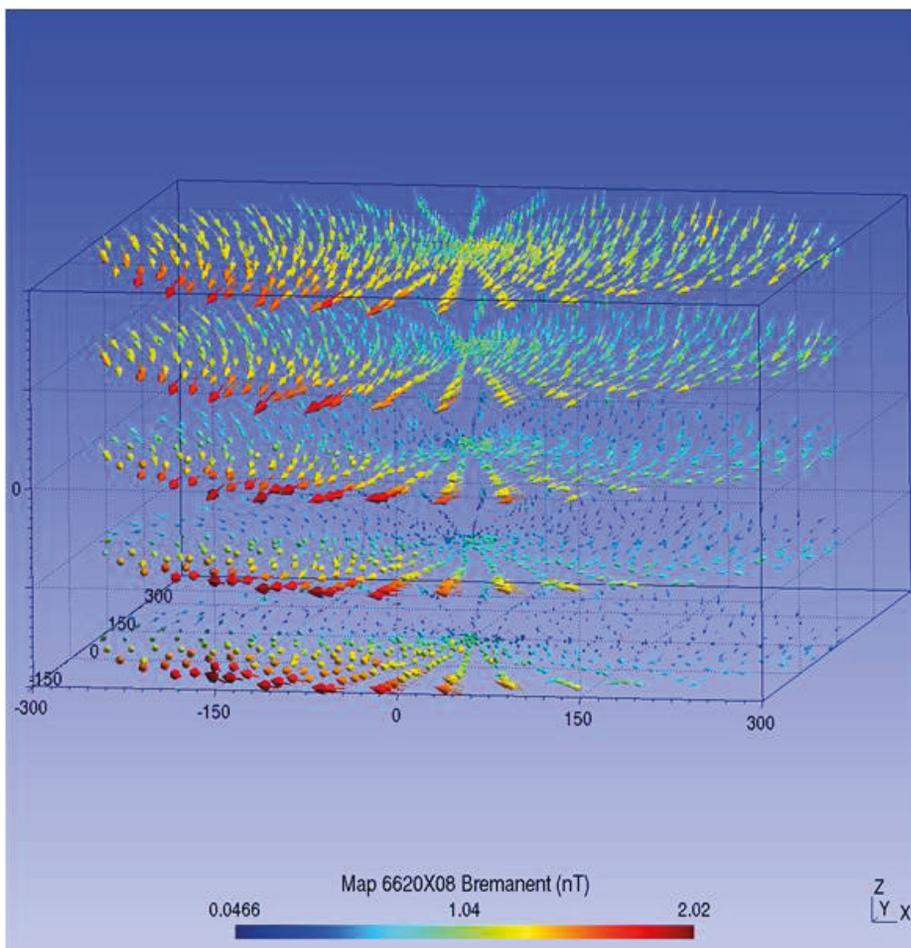
Experimente zur Kernspinpräzession von Edelgasen sind in den letzten Jahren in den Fokus der physikalischen Grundlagenforschung gerückt, da sie zur Klärung aktueller Fragen der Kosmologie und der Elementarteilchenphysik beitragen können. Für diese Untersuchungen bietet der magnetische Abschirmraum BMSR-2 der PTB eine extrem störungsarme Umgebung, in der die kohärente Kernspinpräzession von Edelgasen in einem schwachen Magnetfeld über eine lange Zeit aufrecht erhalten werden kann. Mit einer hochempfindlichen, SQUID-basierten magnetischen Messtechnik lässt sich dann sehr genau die Larmorfrequenz der Spinpräzession und damit die Zeemanenergie der beiden Kernniveaus bestimmen. Wirkt auf den Kernspin eine zusätzliche, nicht magnetische Wechselwirkung, sollte dies zu einer entsprechenden Modulation der Präzessionsfrequenz führen.

Eine solche Wechselwirkung könnte das in Theorien postulierte Axion vermitteln, ein hypothetisches Teilchen, das auch als möglicher Urheber der dunklen Materie angesehen wird, die über 75 % aller Materie im Universum ausmachen soll. In Zusam-

## Nuclear spin precession measurements for fundamental physics research

In the past few years, precision measurements of the nuclear spin precession of noble gases have moved into the focus of fundamental research in physics as they may help to clarify current questions of cosmology and particle physics. For these investigations, PTB's magnetically shielded room BMSR-2 offers an extremely low-noise environment in which the coherent nuclear spin precession of noble gases in a weak magnetic field can be maintained for a long time. A highly sensitive magnetic measurement technology based on SQUIDS then enables a very precise determination of the Larmor frequency of the spin precession and, thus, the Zeeman energy of the two nuclear levels. If an additional, non-magnetic interaction acts on the nuclear spin, this should lead to a corresponding variation of the precession frequency.

Such an interaction could be mediated by the axion – a hypothetical particle postulated by theories. The axion is also regarded as a possible candidate for the dark matter which is assumed to make up more than 75 % of all matter in the universe. In the past few years, PTB Departments 8.1 and 8.2 have carried



Feldverteilung im magnetisch geschirmten Raum am Paul-Scherrer-Institut: Die Homogenität des Restfeldes wurde durch Entmagnetisierungsmaßnahmen der PTB um eine Größenordnung verringert.

Field distribution inside the magnetically shielded room at the Paul Scherrer Institute: The field homogeneity has been improved by one order of magnitude by demagnetization measures of PTB.

menarbeit mit der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz haben die Fachbereiche 8.1 und 8.2 der PTB in den vergangenen Jahren Experimente durchgeführt und ausgewertet, durch die der bisher für möglich erachtete Existenzbereich von Masse und Lebensdauer des Axions erheblich eingengt wurde.

Ein weiteres Projekt befasst sich mit der Suche nach den elektrischen Dipolmomenten des Neutrons und des Xenonkerns. Die Existenz dieser elektrischen Dipolmomente würde eine fundamentale Symmetrieverletzung implizieren, die die Dominanz der Materie über der Antimaterie in unserer Welt erklären könnte. Die Experimente hierzu finden in Zusammenarbeit mit dem Paul-Scherrer-Institut (PSI) in Villigen (Schweiz) und der TU München statt. Beim Design und Aufbau der magnetischen Abschirmräume an den Neutronenquellen der beiden Forschungseinrichtungen konnte durch die Kooperation mit der PTB die Homogenität des Restfeldes um eine Größenordnung verbessert werden. In der nur 2-lagigen Abschirmkammer der TU München wurde ein Restfeld erreicht, dessen Homogenität sogar fast an die Rekordwerte des BMSR-2 heranreicht. Die Experimente zum Nachweis des vermutlich wesentlich schwächeren Dipolmoments des Xenons werden auch im BMSR-2 der PTB durchgeführt. Die dafür notwendigen Edelgase ( $^{129}\text{Xe}$  und  $^3\text{He}$ ) werden im Fachbereich 8.1 der PTB aufpolarisiert.

out and analyzed experiments in cooperation with the Johannes Gutenberg University, Mainz. The result of these experiments was that the previous upper bounds of the mass and coupling strength of the axion had to be considerably reduced.

Other projects are dealing with the search for the electric dipole moments of the neutron and of the xenon nucleus. The existence of these electric dipole moments would imply a fundamental symmetry violation which could explain the dominance of matter over antimatter in our world. The respective experiments are being carried out in cooperation with the Paul Scherrer Institute (PSI) in Villigen (Switzerland) and with the Technical University of Munich. When the magnetic shielding at the neutron sources of the two research institutes was constructed and redesigned, the homogeneity of the residual magnetic field could be improved by one order of magnitude through the participation of PTB. In the shielded room of TU Munich, with only 2 layers of Mu-metal, a residual magnetic field was obtained whose homogeneity even approximates the record values of BMSR-2. The experiments to search for the considerably weaker dipole moment of the xenon nucleus are also performed at PTB's BMSR-2. The polarization of the noble gases required for this purpose ( $^{129}\text{Xe}$  and  $^3\text{He}$ ) is realized at PTB's Department 8.1.

### Stabilität der Supraleitung in Mischungen von Bose-Einstein-Kondensaten

Wie ultrakaltes Helium zeigen auch Bose-Einstein-kondensierte Atome ein Fließen ohne Reibung. Supraflüssigkeit ist wie die Supraleitung ein makroskopisches Quantenphänomen, das sich nur im Rahmen der Quantenmechanik verstehen und beschreiben lässt. Es wird angewendet in Wissenschaft, Technik und Metrologie, z. B. bei der hochpräzisen Messung von Magnetfeldern mithilfe sogenannter SQUIDs oder bei der Messung der Spannung mithilfe des Josephson-Effektes.

Aus diesem Grund wird seit einiger Zeit auch die Supraflüssigkeit in atomaren Bose-Einstein-Kondensaten untersucht, besonders auch im Hinblick auf mögliche Anwendungen für Präzisionsmessungen. Es gibt zahlreiche neue Experimente, bei denen kondensierte Atome in einer ringförmigen optischen Falle gefangen werden. Dann wird ein Suprafluss durch einen geeigneten Laserpuls angeregt, d. h. die Atome werden in der optischen Falle zum Rotieren gebracht. Man spricht auch von der Anregung eines Wirbels. Der mit dem Wirbel verbundene Bahn-Drehimpuls ist wegen der Quantennatur des Kondensates quantisiert und kann auch nur in quantisierten Schritten wieder abgegeben werden.

In einem solchen Experiment einer Gruppe der Universität Cambridge [1] wurde festgestellt, dass der Suprafluss einer Mischung aus Rubidium-Atomen mit unterschiedlichem Spin je nach Mischungsverhältnis oberhalb einer kritischen Schwelle stabil ist (d. h. das atomare Kondensat rotiert über lange Zeit reibungsfrei), aber unterhalb dieser Schwelle ziemlich abrupt zum Stillstand kommt. Dabei wurde die quantisierte Abgabe des Drehimpulses aus dem Wirbel direkt beobachtet.

Innerhalb eines Projektes der Arbeitsgruppe „Theorie wechselwirkender Quantensysteme“ und in Zusammenarbeit mit Physikern aus der Ukraine und gefördert vom Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) wurde ein Vorschlag gemacht

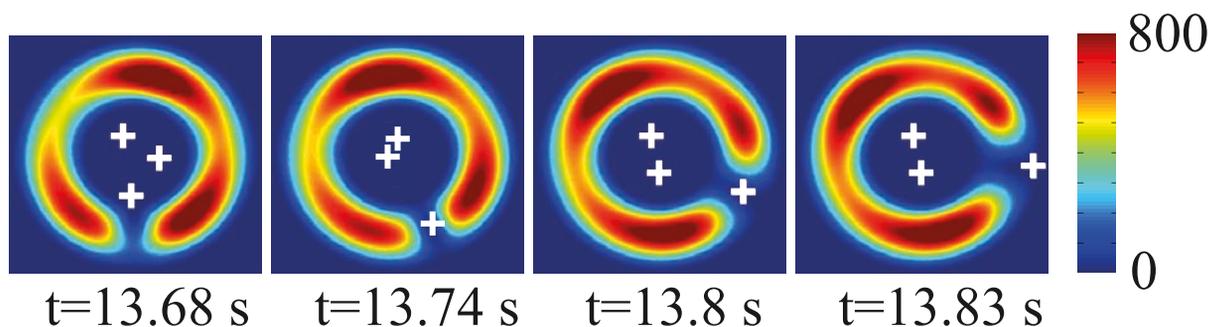
### Stability of the superfluidity in mixtures of Bose-Einstein condensates

Like ultra-cold helium, Bose-Einstein-condensed atoms also exhibit flowing without friction: superfluidity. Like superconductivity, superfluidity is a macroscopic quantum phenomenon which can only be understood and described within the framework of quantum mechanics. It is used in science and technology as well as in metrology, e.g. for high-precision measurements of magnetic fields with the aid of so-called SQUIDs or for voltage measurements on the basis of the Josephson effect.

For this reason, the superfluidity of atomic Bose-Einstein condensates has been investigated recently, in particular also with respect to possible applications for precision measurements. In a large number of new experiments, condensed atoms are trapped in a ring-shaped optical trap. Then, a superflow is excited by a suitable laser pulse, i.e. the atoms in the optical trap are caused to rotate. This is also called “excitation of a vortex”. Due to the quantum nature of the condensate, the angular momentum connected with a vortex is quantized and can only be changed in quantized steps.

In such an experiment, which was performed by a group from Cambridge University [1], it was found out that the superflow of a mixture of rubidium atoms in different spin states is – depending on the mixing ratio – stable above a critical threshold (i.e. for a long time, the atomic condensate rotates without friction), but rotation stops rather abruptly below this threshold. Thereby, the quantized loss of angular momentum in the vortex was directly observed.

Within the scope of a project of the working group “Theory of Interacting Quantum Systems”, and in cooperation with physicists from the Ukraine and funded by the *German Academic Exchange Service (Deutscher Akademischer Austauschdienst, DAAD)*, a proposal [2] was made as to how this behavior can be understood. To this end, the experiment [1] was



[2], wie man dieses Verhalten verstehen kann. Dazu wurde das Experiment [1] möglichst genau im Rahmen einer Molekularfeld-Näherung auf dem Computer simuliert. Damit wird es möglich, das Verhalten des atomaren Kondensates auf Zeit- und Längenskalen, die dem Experiment nicht direkt zugänglich sind, genau zu „beobachten“, um festzustellen, wie sich die Atom-Flüssigkeit beim Zerfall genau verhält.

Die Simulation startet mit einer homogenen Verteilung der Atome auf zwei Spinkomponenten, hier bezeichnet mit „+“ und „0“, die mit drei Drehimpulseinheiten rotieren. (Eine für Rubidium theoretisch mögliche „-“ Komponente wird experimentell wie auch in der Simulation herausgefiltert.) Die Abbildung zeigt in einer farbkodierten Darstellung die Dichte des Kondensates der Spinkomponente „+“ nach etwa 13 Zeiteinheiten. Man sieht deutlich den Ring, in dem das Kondensat „eingesperrt“ ist und rotiert, aber zu diesem Zeitpunkt ist die Dichte schon ziemlich inhomogen, es gibt sogar schon fast ein Loch (dunkelblauer Bereich) in dem ringförmigen Kondensat. Dieses Dichteminimum in einer Komponente ist mit Atomen der anderen Komponente gefüllt. Je nach anfänglichem Mischungsverhältnis der Atome auf die einzelnen Spinkomponenten tritt eine solche lokale Phasenseparation in einzelne Spinkomponenten auf. Der ursprüngliche Wirbel hat sich zu diesem Zeitpunkt schon in mehrere aufgeteilt, deren Rotationszentren durch die weißen „+“ Zeichen gekennzeichnet sind. Im weiteren Verlauf gelingt es einem der entstandenen Wirbel, durch das Dichteminimum zu entweichen, und damit verliert das supraflüssige Gas eine Drehimpulseinheit. In weiteren Schritten verliert die Atomflüssigkeit dann völlig ihren wirbelförmigen Suprafluss. In den Zusatzmaterialien der Originalveröffentlichung [1] findet man einen kleinen Film, der den Zerfall des supraflüssigen Wirbels genau zeigt.

Es ist zu erwarten, dass die Spin- und Atomtronik, wie sie in unserer Simulation untersucht wird, in der Zukunft eine ähnlich wichtige Rolle in Technik und Metrologie spielen wird wie heute die Elektronik.

simulated as closely as possible within the scope of a mean field approximation on the computer. This allows the behavior of the atomic condensate to be exactly “observed” on time and length scales which are not directly accessible to the experiment, to find out how the atomic liquid exactly behaves in the decay.

The simulation starts with a homogeneous distribution of the atoms on two spin components – here designated with “+” and “0” – which rotate with three angular momentum units. (A “-” component which is theoretically possible for rubidium is filtered out both in the experiment and in the simulation.) The figure shows the density of the condensate of the spin component “+” after approx. 13 time units in a color-coded presentation. The ring, in which the condensate is “locked” and rotating, is clearly visible. At this moment, the density is, however, already rather inhomogeneous and there is even almost a hole (dark blue area) in the ring-shaped condensate. This density minimum in one component is filled with atoms of the other component. Such a local phase separation into single spin components occurs as a function of the initial mixing of spin components of the atoms. At this point in time, the original vortex has already separated into several vortices whose rotation centres are characterized by the white + marks in the figure. After that, one of the vortices that have developed succeeds in escaping through the density minimum and, thereby, the superfluid gas loses one angular momentum unit. In further steps, the atomic liquid then completely loses its vorticity. The supplemental material of the original publication [1] includes a short movie which shows the decay of the superfluid vortex in some detail.

It may be expected that spintronics and atomtronics, which have been investigated in our simulation, will in the future play a similarly important role in technology and metrology to electronics today.

[1] S. Battie, S. Moulder, R. J. Fletcher, Z. Hadzibabic, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 025301.

[2] A. I. Yakimenko, K. O. Isaeva, S. I. Vilchinskii, M. Weyrauch, Phys. Rev. A88 (2013) 051602(R)

### Die 64. Sitzung des Kuratoriums der PTB

Die turnusmäßige Sitzung des Kuratoriums der PTB fand in diesem Jahr am 25. und 26. April in Braunschweig statt. Die Kuratoren und Gäste wurden vom Präsidenten der PTB, Prof. Dr. Joachim Ullrich, begrüßt. Danach wurde den Kuratoren Gelegenheit gegeben, sich über aktuelle Forschungs- und Dienstleistungsprojekte der PTB an ausgewählten Stationen zu informieren. Die Themenauswahl reichte dabei von Grundlagenforschung zu optischen Uhren über Antennencharakterisierung im Gigahertzbereich bis zur Prüfung von druckfesten Gehäusen im Explosionsschutz. Im Anschluss fand im Hörsaal der PTB ein öffentliches Kolloquium statt, bei dem drei Nachwuchswissenschaftlerinnen der PTB über ihre Forschungsarbeiten berichteten. Den Auftakt dazu gab Christine Brauckmann mit ihrem Vortrag über die Entwicklung von primären Messverfahren für „prioritäre gefährliche Stoffe“ der EU-Wasserrahmenrichtlinie, gefolgt von Dr. Tanja Mehlstäubler mit einem Thema zur Grundlagenforschung „Kristalldefekte in lasergekühlten Ionenkristallen – von der Kosmologie zur Festkörperphysik“ und schlussendlich Dr. Katy Klauenberg mit ihrem Vortrag über ein neues statistisches Verfahren zur Analyse von Immunoassays. Die verbleibende Zeit des ersten Veranstaltungstages nutzten die Kuratoren zu intensiven Gesprächen in den Fachabteilungen.

Die Sitzung des Kuratoriums am 26. April wurde vom Präsidenten des Kuratoriums, Dr. Sven Halldorn, eröffnet. In seiner anschließenden Rede ging er auf die aktuelle wirtschaftliche Lage in Deutschland ein, die Innovationspolitik der Bundesregierung, auf die Förderprogramme des BMWi, auf das europäische Forschungsprogramm Horizont 2020, auf die Qualitätsinfrastruktur in Bezug auf Messwesen, Akkreditierung und Normung sowie auf die Rahmenbedingungen der Ressortforschung im Zusammenhang mit der Wissenschaftsfreiheitsinitiative. Er betonte, dass die PTB eine wichtige Funktion habe, um die Technologie-Akzeptanz in der Wirtschaft und beim Verbraucher zu erhöhen. Grundlage hierfür seien genaue und rückführbare Messungen, die eine essenzielle Basis für verlässliche sowie qualitätsgesicherte Produktionsprozesse seien. Der technische Fortschritt erfordere ständig erweiterte Messmöglichkeiten, weshalb trotz enormer Konsolidierungsanstrengungen der öffentlichen Haushalte, Forschung, Entwicklung und Innovation eine hohe Priorität für die Bundesregierung haben.

### The 64<sup>th</sup> meeting of the *Kuratorium (Advisory Board)* of PTB

The annual meeting of the Kuratorium of PTB was held this year on 25 and 26 April in Braunschweig. The members of the Kuratorium and guests were welcomed by the President of PTB, Prof. Dr. Joachim Ullrich. Next, the members of the Kuratorium were given the opportunity to gain an insight into ongoing research and PTB service projects at selected stations. The choice of subjects thereby ranged from fundamental research to optical clocks, from antenna characterization in the gigahertz range to the testing of compression-proof housing in Explosion Protection. Following this, an open colloquium was held in PTB's auditorium, at which three young PTB scientists reported on their research work. Christine Brauckmann was first with her speech on the development of primary measuring methods for “priority hazardous materials” of the EU Water Framework Directive, followed by Dr. Tanja Mehlstäubler with a topic from fundamental research, “Crystal defects in laser-cooled ion crystals – from cosmology to solid state physics” and finally, Dr. Katy Klauenberg with her speech on a novel statistical method for analyzing immunoassays. The members of the Kuratorium used the remaining time on the first day of the meeting for intensive talks in the technical divisions.

The meeting of the Kuratorium on 26 April was opened by the President of the Kuratorium, Dr. Sven Halldorn. In his subsequent speech, he addressed the issues of the current economic situation in Germany, the innovation policy of the German federal government, the support programmes of the BMWi, the European research programme *Horizont 2020 (Horizon 2020)*, the quality infrastructure in reference to metrology, accreditation and standardization as well as the framework conditions for the departmental research in connection with the “Scientific Freedom Initiative”. He pointed out that PTB has an important function – that of increasing the acceptance of technology in the economy and by the consumer. The basic concept here is to have accurate and traceable measurements that are an essential basis for reliable and quality-assured production processes. Technical progress requires continually expanding measurement capabilities, which is why in spite of enormous efforts towards consolidation of public budgets, research, development and innovation have a high priority for the German federal government.



Gruppenbild der Teilnehmer an der 64. Tagung des Kuratoriums der PTB 2013.

Group photo of the participants of the 64<sup>th</sup> meeting of the PTB Kuratorium in 2013.

Im Anschluss daran gab Prof. Ullrich einen Überblick über die wesentlichen Arbeiten der PTB im vergangenen Jahr. Im ersten Teil seines Vortrages ging er auf den Stand und die Fortschritte bei der Weiterentwicklung des Internationalen Einheitensystems (SI) ein. Im Mittelpunkt standen hierbei das Avogadro-Projekt, die Definition des Ampere mit Einzelelektronenschaltungen sowie die Forschung an optischen Atomuhren. Im Anschluss präsentierte er Highlights aus den Dienstleistungsbereichen wie z. B. die geplante Erweiterung der Kraftskala auf 30 MN oder die Anwendung von Profilsclannern zur Untersuchung von Mikrostrukturen. Es folgte eine Bilanz des europäischen Metrologie-Forschungsprogramms EMRP und ein Ausblick auf das Nachfolgeprogramm EMPIR. Zum Schluss des Vortrages erwähnte er das neue Doktoranden-Konzept, die Maßnahmen zur Vereinbarkeit von Beruf und Familie und berichtete über die Ausbildung in der PTB.

Following this, Prof. Ullrich gave an overview of the most important work performed by PTB in the past year. In the first part of his speech, he went into the state of and the progress made in the further development of the International System of Units (SI). In the focus here were the Avogadro Project, the definition of the ampere with single-electron circuits as well as the research on optical atomic clocks. Then he presented highlights from the service fields such as, e.g., the planned extension of the force scale to 30 MN or the use of profile scanners for the investigation of microstructures. Stock was taken of the European metrology research programme EMRP, and the future prospects of the subsequent programme EMPIR followed. At the conclusion of his speech, he mentioned the new mentoring concept for doctoral candidates, the measures for the compatibility of career and family (work-life balance), and reported on the training programmes at PTB.

### Verleihung des EPS „Historic Site Award“ an die PTB

Am 8. Oktober 2013 wurde der PTB in Berlin von der Europäischen Physikalischen Gesellschaft (EPS) der „Historic Site Award“ verliehen. Mit diesem Preis werden Orte ausgezeichnet, die für die Entwicklung der Physik von großer Bedeutung waren und sind. Mit der Ernennung der PTB wurden die bahnbrechenden wissenschaftlichen und technischen Leistungen, die zu Beginn des 20. Jahrhunderts an der damaligen Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) u. a. von Hermann von Helmholtz, Walter Nernst, Willy Wien und anderen vollbracht wurden, gewürdigt.

### Presentation of the EPS Historic Site Award to PTB

On 8 October 2013, PTB in Berlin was presented with the Historic Site Award of the European Physical Society (EPS). This award honours sites that were and still are of great importance in the development of physics. With PTB's nomination, the groundbreaking scientific and technical achievements made by Hermann von Helmholtz, Walter Nernst, Willy Wien and others at the – then – *Physikalisch-Technische Reichsanstalt (Imperial Physical Technical Institute – PTR)* at the start of the 20<sup>th</sup> century were honoured.



Die Redner anlässlich der Verleihung des „Historic Site Award“ am 8.10.2013 in der PTB Berlin (von links nach rechts): Prof. Dr. Hans Koch (Leiter des Instituts Berlin der PTB), Prof. Dr. Wolfgang Ketterle (Nobelpreisträger 2001 und Kurator der PTB), Cornelia Quennet-Thielen (Staatssekretärin im BMBF), Prof. Dr. John Dudley (EPS-Präsident), Prof. Dr. Joachim Ullrich (PTB Präsident), Prof. Dr. Johanna Stachel (DPG-Präsidentin), Anne Ruth Herkes (Staatssekretärin im BMWi)

The speakers at the ceremony marking the presentation of the Historic Site Award at PTB Berlin on 8.10.2013 (from left to right): Prof. Hans Koch (Head of PTB's Berlin Institute), Prof. Wolfgang Ketterle (Nobel Prize winner 2001 and PTB *Kuratorium* member), Cornelia Quennet-Thielen (State Secretary of the BMBF), Prof. John Dudley (EPS President), Prof. Joachim Ullrich (PTB President), Prof. Johanna Stachel (DPG President), Anne Ruth Herkes (State Secretary of the BMWi)

**European Physical Society – EPS Historic Site**  
**PTB, formerly PTR – the National Metrology Institute**

PTB, the "Physikalisch-Technische Bundesanstalt" (formerly PTR, the "Physikalisch-Technische Reichsanstalt") was founded in 1887 on the basis of the ideas and on the joint initiative of Werner von Siemens and Hermann von Helmholtz. PTB contributed to the history of physics through many renowned scientists working here. Groundbreaking discoveries of laws and effects like Wien's radiation law, the Einstein-de Haas effect and the Meissner-Ochsenfeld effect took place at PTB. The precision measurements at PTB on black-body radiation led to the principle of energy quantization introduced by Max Planck. Also, widely used measuring instruments, such as the Geiger counter, have been developed at PTB.

**Historische Stätte der Europäischen Physikalischen Gesellschaft – EPS**  
**PTB, vormalig: PTR – das Nationale Metrologie-Institut**

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (vormalig: PTR, die Physikalisch-Technische Reichsanstalt) ist 1887 nach Ideen und aufgrund einer gemeinsamen Initiative von Werner von Siemens und Hermann von Helmholtz gegründet worden. Zahlreiche renommierte Wissenschaftler haben an der PTB zur Geschichte der Physik beigetragen. Grundlegende physikalische Gesetze und Effekte wie das Wien'sche Strahlungsgesetz, der Einstein-de-Haas-Effekt und der Meißner-Ochsenfeld-Effekt sind hier entdeckt worden. Die an der PTB unternommenen Präzisionsmessungen der Schwarzkörperstrahlung haben Max Planck zum Prinzip der quantisierten Energie geführt. Auch gängige Messinstrumente, wie der Geigerzähler, sind hier entwickelt worden.

Berlin, den 8. Oktober 2013



Motiv der Plakette „EPS Historic Site“: Ihren Platz hat die Plakette für die PTB am sogenannten Kaisereingang des Siemens-Baus im Institut Berlin gefunden.

Design of the EPS Historic Site memorial plaque. The PTB's plaque is located at the so-called Emperor's Entrance (*Kaisereingang*) to the Siemens Building at the Berlin Institute.

Zu dieser Veranstaltung waren ca. 100 geladene Gäste aus Industrie und Wissenschaft gekommen, u. a. die Präsidentin der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG), Prof. Johanna Stachel, der Präsident des Kuratoriums der PTB, Dr. Sven Halldorn, und Ruprecht von Siemens, Urenkel des Firmengründers und auch von Hermann von Helmholtz. Den musikalischen Rahmen zu dieser Veranstaltung gestalteten junge Preisträger vom musikalischen Förderprojekt „Jugend musiziert“ aus Berlin.

Around 100 invited guests from the fields of industry and science came to this ceremony, including the President of the *Deutsche Physikalische Gesellschaft* (DPG), Prof. Johanna Stachel, the President of PTB's *Kuratorium* (Advisory Board), Dr. Sven Halldorn, and Ruprecht von Siemens, the great-grandson of the founder of the Siemens company and also of Hermann von Helmholtz. The musical accompaniment to this event was provided by young prizewinners of *Jugend musiziert* – a German project supporting young musicians – from Berlin.

Die Staatssekretärinnen, Anne Ruth Herkes vom BMWi und Cornelia Quennet-Thielen vom BMBF, entrichteten Grußworte, in denen sie die Bedeutung der historischen wissenschaftlichen Leistungen für Wirtschaft und Wissenschaft unterstrichen.

The State Secretaries Anne Ruth Herkes from the German Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) and Cornelia Quennet-Thielen from the German Ministry of Education and Research (BMBF) delivered welcoming speeches in which they underlined the importance of the historic scientific achievements for the economy and science.

Die eigentliche Verleihung wurde durch den Präsidenten der EPS, Prof. Dr. John Dudley, vorgenommen.

The award was actually presented by the President of the EPS, Prof. John Dudley.

Den wissenschaftlichen Höhepunkt der Veranstaltung bildeten die Vorträge des Nobelpreisträgers und neuen Kurators der PTB, Prof. Wolfgang Ketterle, über Quantenmaterie am absoluten Nullpunkt und von Prof. Hans Koch über die Entdeckung der Quantennatur des Lichtes.

The scientific highlights of the ceremony were formed by the talks given by the Nobel Prize winner and new member of PTB's *Kuratorium*, Prof. Wolfgang Ketterle, on quantum matter at absolute zero temperature, and by Prof. Hans Koch on the discovery of the quantum nature of light.

### 100 Jahre Helmholtz-Fonds e. V.

Als die Vorgängerinstitution der PTB, die Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR), ein Vierteljahrhundert alt war, beschlossen namhafte Wissenschaftler des PTR-Kuratoriums, einen Fonds zur Förderung und Unterstützung der Reichsanstalt zu gründen. Der Helmholtz-Fonds e. V., so benannt nach dem ersten PTR-Präsidenten, steht seitdem der metrologischen Forschung und Entwicklung überaus hilfreich zur Seite. Im Jahr 2013 feierte der Fonds sein 100-jähriges Jubiläum mit einem Festkolloquium am 20. September 2013 im Hörsaal der PTB in Braunschweig.

Nach einem Grußwort von Dr. Sven Halldorn, Leiter der Abteilung Technologiepolitik im BMWi, sprachen Dipl.-Ing. Ruprecht von Siemens (ehemaliger Schatzmeister des Helmholtz-Fonds) und Prof. Dr. Ernst O. Göbel (ehemaliger PTB-Präsident) zur Geschichte und Bedeutung des Fonds. Im Anschluss hielten Prof. Dr. Günter Werth, Dr. Fritz Riehle und Prof. Dr. Thomas Klar – drei Wissenschaftler, deren Arbeiten in der Vergangenheit mit dem Helmholtz-Preis ausgezeichnet wurden – je einen Kurzvortrag aus dem Umfeld ihrer preisgekrönten Arbeit. Im Anschluss an dieses Kolloquium fand ein Empfang im Foyer des Hörsaals statt.

Teilnehmer der Mitgliederversammlung des Helmholtz-Fonds am 20. September 2013 (v. l. n. r.):  
Participants of the general meeting of the Helmholtz Fund on September 20<sup>th</sup>, 2013 (from left to right)

### 100 years of *Helmholtz-Fonds e. V.*

When PTB's preceding institute, the PTR, was a quarter of a century old, renowned scientists of the PTR Kuratorium decided to establish a fund for promoting and supporting the PTR. The *Helmholtz-Fonds e. V.* (*Helmholtz Fund*), named after the first PTR president, has since then been extremely supportive of metrological research and development. In 2013, the Helmholtz-Fonds celebrated its 100th anniversary with a ceremonial colloquium on 20 September 2013 in the PTB auditorium in Braunschweig.

After the short welcoming speech by Dr. Sven Halldorn, Head of the "Technology Policy" Department at the BMWi, Mr. Dipl.-Ing. Ruprecht von Siemens (former treasurer of the Helmholtz-Fonds) and Prof. Dr. Ernst O. Göbel (former PTB president) spoke about the history and the importance of the Helmholtz-Fonds. Next, Prof. Dr. Günter Werth, Dr. Fritz Riehle and Prof. Dr. Thomas Klar – three scientists whose work has been distinguished with the Helmholtz Prize in the past – each gave a brief speech on the field of their award-winning work. Following this colloquium, there was a reception in the foyer of the auditorium.

Dr. Augustin Siegel, Dr. Nathalie v. Siemens, Horst Mischke (GTM Gassmann), Prof. Dr. Manfred Peters, Dr. Anke Günther (Hexagon), Dr. Johannes Lagois (Dräger), Prof. Dr. Joachim Ullrich, Malte Kurtiss (Yxlon), Ruprecht v. Siemens, Daniel Schwind (GTM Gassmann), Veronika Martens, Dr. Alfred Hauff, Dr. Frederike Weritz (BMW), Dr. Klaus Rudolf Wurster



## Eröffnung der Kindergartengruppe

Am 6. Juni 2013 wurden die neuen Räume des PTB-Kindergartens offiziell eröffnet. Die 25 Kinder, die schon seit September des Vorjahres die neugegründete Kindergartengruppe „Die kleinen Schmetterlinge“ besuchen, können sich seitdem über große freundliche Räume und einen großzügigen Bewegungsraum zum Austoben freuen. Für die Kindergartengruppe wurde das alte Gästehaus der PTB umgebaut und an die bestehenden Krippenräume angeschlossen. Träger der Kindergartengruppe ist die Johanniter-Unfallhilfe, die bereits die Kita auf dem PTB-Gelände betreibt. Im Gegensatz zur Kita, die von ein- bis dreijährigen Kindern von PTB-Mitarbeitern besucht wird, sind „Die kleinen Schmetterlinge“ eine öffentliche Kindergartengruppe, in der jeder Braunschweiger seine Kinder anmelden kann.

„Für uns ist es wichtig, dass unsere Mitarbeiter die Möglichkeit haben, ihre Kinder vor Ort betreuen zu lassen, und dass ein enger Kontakt zu den Erzieherinnen besteht“, erklärte die PTB-Gleichstellungsbeauftragte Birgit Behrens, die zu jedem Zeitpunkt die treibende Kraft sowohl hinter der Einrichtung der PTB-eigenen Kita als auch des Kindergartens war. „Wir hatten jederzeit die Unterstützung des PTB-Präsidiums und freuen uns sehr, mit den Johannitern einen passenden Partner für dieses tolle Projekt gefunden zu haben“, zog sie während der Eröffnungsfeier Bilanz.

Mit dem Kindergarten ist nun zwischen Zentralgebäude und Paschen-Bau ein ganzes Gebäude-Ensemble für Kinder entstanden. Denn neben den Räumen und Außenanlagen von Kita und Kindergarten wurde auch das neue WissensForscher-Labor für Grundschüler gebaut. Insgesamt hat die PTB 1,1 Millionen Euro in die Baumaßnahmen investiert.



## Kindergarten opens

On Thursday, 6 June 2013 the new rooms of PTB's kindergarten were officially opened. The 25 children who have attended the newly founded kindergarten called "The Little Butterflies" (*Die kleinen Schmetterlinge*) since September of the previous year, can now enjoy the large friendly rooms with a generously sized playroom especially for active play and encouraging movement. PTB's old Guest House was rebuilt for the kindergarten group and it was also connected to the existing day care centre. The charity *Johanniter-Unfallhilfe* supports the kindergarten group as well as running the day care facilities which have already been set up on the PTB site. In contrast to the day care centre which takes children aged between one and three years if their parents work at PTB, "The Little Butterflies" is a kindergarten which is open to the general public. Anyone from Braunschweig is allowed to register their children at the kindergarten.

"It is important to us that our staff are able to have their children looked after on site, while having close contact with the nursery teachers," explained PTB's Equal Opportunity Commissioner, Birgit Behrens, who has constantly been the driving force behind setting up PTB's own day nursery as well as the kindergarten. "We have had the support of PTB's Presidential Board the whole time and are very pleased to have found just the right partner for this great project in the *Johanniter-Unfallhilfe*," she said while taking stock during the opening ceremony.

With the kindergarten, a whole ensemble of buildings for children has now been created between the Central Building and the Paschen Building. Besides the indoor and outdoor facilities of the day care centre and the kindergarten, the new *WissensForscher-Labor* (*KnowledgeSearchers Lab*) for primary school children has also been built. In total, PTB has invested 1.1 million euros in these building measures.

### Anerkennung von Eichscheinen

In Deutschland ist die PTB nach § 6 Absatz 2 des Einheiten- und Zeitgesetzes (EinhZeitG) für die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der Einheiten zuständig. Darüber hinaus hat sie die gesetzliche Aufgabe, die Einheitlichkeit des Messwesens in Deutschland zu sichern, ggf. zusammen mit Dritten. Dies gilt zum Beispiel bei der Zusammenarbeit mit den deutschen Eichbehörden. Zur Sicherung der Einheitlichkeit gehört insbesondere die Begutachtung der messtechnischen Rückführung durch die PTB. Mit Inkrafttreten des neuen Mess- und Eichgesetz (MessEG) ab dem 1. Januar 2015 wird diese Aufgabe in § 47 des MessEG bekräftigt und präzisiert.

Unter Mitwirkung der PTB wurde im August 2011 das Merkblatt 71 SD 0 005 zur messtechnischen Rückführung durch die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) veröffentlicht. Dadurch erkennt die DAkkS Ergebnisberichte einer Eichbehörde als Rückführungsnachweise an, sofern diese das Begutachtungsverfahren durch die PTB für die jeweilige Messgeräteart erfolgreich abgeschlossen hat. Voraussetzung für diese Begutachtung durch die PTB ist eine Eigenerklärung der jeweiligen Eichbehörde, in der die Eichbehörde bestätigt, dass die Anforderungen eines an die aktuellen Entwicklungen angepassten und wirksamen Qualitätsmanagementsystems erfüllt werden. Diese Eigenerklärungen sind in vielen Fällen auf den Internetseiten der Eichbehörden einsehbar.

In 10 der insgesamt 13 Eichbehörden wurde diese Begutachtung durch die PTB bisher erfolgreich durchgeführt. Alle Bundesländer sind in das Begutachtungsverfahren einbezogen. Die Ergebnisse der Begutachtungen und die betroffenen Messgerätearten sind auf der Internetseite der PTB veröffentlicht. Darüber hinaus bauen die Eichbehörden unter Beteiligung der PTB ein System von Peer Reviews auf, um die dauerhafte Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen nachzuweisen.

Die Bestätigung der technischen Kompetenz der Eichbehörden durch die PTB hinsichtlich der messtechnischen Rückführung wird den Kompetenznachweis gegenüber der Europäischen Kommission und den übrigen Mitgliedsstaaten der Europäischen Union erleichtern sowie eine Doppelbelastung der Wirtschaftsteilnehmer durch Eichung und eine zusätzliche Kalibrierung durch akkreditierte Kalibrierlaboratorien vermeiden.

### Recognition of verification certificates

According to section 6, subsection 2 of the German *Units and Time Act*, PTB is responsible for realizing, maintaining and disseminating the units in Germany. Furthermore, PTB has the legal task of ensuring the uniformity of metrology in Germany – if applicable, together with third parties. This applies, e.g., to the cooperation with the German verification authorities. Ensuring the uniformity includes, in particular, the assessment of the metrological traceability by PTB. After the new *Measures and Verification Act (Mess- und Eichgesetz (MessEG))* will have come into force as of 1 January 2015, this task will be confirmed and specified in section 47 of the *MessEG*.

In cooperation with PTB, the technical note 71 SD 0 005 on metrological traceability was published in August 2011 by DAkkS. In this way, DAkkS recognizes certificates of a verification authority as traceability proofs if this verification authority has successfully completed the assessment procedure by PTB for the respective measuring instrument category. The precondition for this assessment by PTB is a self-declaration of the corresponding verification authority, in which the verification authority confirms that the requirements of an effective quality system adapted to the current developments will be fulfilled. In many cases, these self-declarations are available on the Internet pages of the verification authorities.

In 10 of the, in total, 13 verification authorities, this assessment by PTB has so far been successfully carried out. All German federal states are involved in the assessment procedure. The results of the assessments and the measuring instrument categories in question have been published on PTB's Internet page. Furthermore, the verification authorities are setting up – with the participation of PTB – a system of peer reviews to be able to prove the permanent compliance with the legal requirements.

The confirmation of the technical competence of the verification authorities by PTB concerning the metrological traceability will simplify the proof of competence required for the European Commission and the other Member States of the European Union and will avoid a double burden (through verification and, in addition, through calibration by accredited calibration laboratories) for the economic stakeholders.

## Breitere Bekanntmachung der Technologie-transferangebote der PTB

Ihrem gesetzlichen Auftrag folgend, den Wissens- und Technologietransfer zu fördern, hat die PTB in ihren Print- und Internetmedien mittlerweile eigene Rubriken zum Thema Technologietransfer eingerichtet. Ob Pressemitteilungen zu Industriemessen, Beiträge im Nachrichtenblatt PTB-News oder im Fachjournal PTB-Mitteilungen – in den unterschiedlichen Formaten werden Technologieangebote vorgestellt, die Firmen die Möglichkeit bieten, Lizenzen zu erwerben oder gemeinsam mit der PTB Funktionsmuster zu entwickeln.

Im europäischen Rahmen hat mit der Deklaration der „Innovation Union 2020“ durch die Europäische Gemeinschaft die Verwertung von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen für die europäischen Volkswirtschaften – mit dem Stichwort „impact“ bezeichnet – eine wesentlich stärkere Bedeutung gewonnen. Die PTB ist hier mit derzeit 64 Projekten im Bereich „European Metrology Research Programme“ (EMRP) und dem in der Antragsphase befindlichen Folgeprojekt „European Metrology Programme for Innovation and Research“ (EMPIR) prominent vertreten. In engen Berichtszeiträumen werden hier im Arbeitspaket „impact“ neueste Ergebnisse durch Fachmessen und in PTB-Publikationen veröffentlicht und dadurch die wirtschaftlichen Akteure gezielt angesprochen.

Die Technologieangebote werden in enger Abstimmung zwischen der jeweiligen Fachabteilung und der Arbeitsgruppe Technologietransfer entwickelt und dann gemeinsam mit der Pressestelle einem gezielt ausgesuchten, aber breiten Multiplikatorkreis zur Verfügung gestellt, etwa in Branchenzeitschriften oder auf Internet-Technologieplattformen. Bei den sich ergebenden neuen Kundenkontakten wird dann oft gemeinsam mit der Fachabteilung ein industrienahes Projekt unter Nutzung der Fördermöglichkeiten für kleine und mittlere Betriebe begonnen und im Anschluss eine Lizenz durch die PTB zu marktüblichen Konditionen vergeben.

Die PTB betrachtet dies als einen Beitrag zu dem ambitionierten Ziel „Europa zur innovativsten Volkswirtschaft weltweit“ zu entwickeln, wie in der „Innovation Union 2020“ vorgeschlagen.

## Broader publication of PTB's technology transfer offers

According to its legal mission to promote the transfer of knowledge and technology, PTB has meanwhile set up its own sections on the subject of technology transfer in its print and internet media. Whether press releases about industrial fairs, contributions to PTB's scientific newsletter "PTB News" or to the specialist journal "PTB-Mitteilungen": in various formats, technology offers are presented which enable the companies to purchase licenses or to develop functional models together with PTB.

Within the European scope, the exploitation of research and development results for the European national economies – designated by the keyword "impact" – has gained considerably greater importance following the declaration of the "Innovation Union 2020" by the European Union. Here, PTB is prominently represented with currently 64 projects in the field of *European Metrology Research Projects* (EMRP) and the follow-up project *European Metrology Programme for Innovation and Research* (EMPIR) which is in its application phase. In tight periods under report, the latest results are published here in the work package "impact" by trade fairs and in PTB publications, and thus the economic stakeholders are addressed in a targeted way.

The technology offers are developed by the Technology Transfer Working Group in close coordination with the respective division and are then made available – in cooperation with the Press and Information Office – to a selected, but broad multiplier circle, e.g. in specialized journals or at internet technology platforms. Within the scope of the resulting new customer contacts, a project close to industry is frequently launched – together with the Division – by using the promotion possibilities for small and medium-sized enterprises, and at the end, a licence is allocated by PTB at conditions which are customary in the market.

PTB regards this as a contribution to the ambitious goal of developing "Europe into the most innovative national economy worldwide", as has been proposed in the "Innovation Union 2020".

### Neugestaltung des gesetzlichen Messwesens

2013 ist mit dem neuen Mess- und Eichgesetz die Neugestaltung des gesetzlichen Messwesens in Deutschland zum erfolgreichen Abschluss gebracht worden. Das Mess- und Eichgesetz weist zusammen mit dem Einheiten- und Zeitgesetz der PTB eine wichtige Rolle im Messwesen zu. Ziel ist es, auch weiterhin das bestehende Vertrauen in amtliche und geschäftliche Messungen sowie für Messungen im öffentlichen Interesse sicherzustellen.

Ab dem 1. Januar 2015 benötigen alle Messgeräte, die im Anwendungsbereich des Mess- und Eichgesetzes verwendet werden sollen, eine erfolgreich durchgeführte Konformitätsbewertung, um in den Verkehr gebracht werden zu dürfen. Im Allgemeinen prüft dabei eine Konformitätsbewertungsstelle, ob die wesentlichen Anforderungen, die an das Messgerät gestellt werden, erfüllt sind.

Nach dem Inverkehrbringen dürfen Messgeräte für die Dauer der Eichfrist verwendet werden. Um die Messgeräte für eine weitere Eichfrist verwenden zu können, müssen die Messgeräte am Ende der Eichfrist geeicht werden. Die Durchführung der Eichung obliegt den nach Landesrecht zuständigen Behörden.

Regeln und technische Spezifikationen für national geregelte Messgeräte sowie Regeln und Erkenntnisse über Verfahren der Konformitätsbewertung ermittelt der Regelermittlungsausschuss. Darüber hinaus ermittelt dieser Ausschuss auch Regeln und Erkenntnisse für die Verwendung von Messgeräten oder Messwerten. Dem Regelermittlungsausschuss gehören sachverständige Institutionen und Verbände an. Dazu gehören die PTB, die zuständigen Behörden der Länder, Konformitätsbewertungsstellen, anerkannte Prüfstellen, Wirtschaftsverbände und Verbraucherverbände. Den Vorsitz und die Geschäftsstelle des Regelermittlungsausschusses führt die PTB.

Einen wichtigen Beitrag zur einheitlichen Arbeitsweise von Konformitätsbewertungsstellen leistet zukünftig der Ausschuss für Konformitätsbewertungsstellen, dessen Leitung von der PTB gestellt wird und in dem Konformitätsbewertungsstellen mitwirken.

Für die Verwendung von neuen oder erneuerten Messgeräten wird künftig gefordert, dass diese Messgeräte spätestens sechs Wochen nach der Inbe-

### Reorganization of legal metrology

With the new *Measures and Verification Act*, the reorganization of legal metrology was successfully completed in Germany in 2013. Together with the new *Units and Time Act*, the *Measures and Verification Act* assigns an important role to PTB in the field of metrology. Also in future, the aim will be to safeguard the existing confidence in official and commercial measurements as well as in measurements which are of public interest.

As of 1 January 2015, all those measuring instruments which are to be used within the scope of the *Measures and Verification Act* must have successfully undergone conformity assessment in order to be allowed to be placed on the market. In general, a conformity assessment body examines whether the essential requirements made on the measuring instrument have been met.

After they have been placed on the market, measuring instruments may be used until the verification period has expired. To be able to use the measuring instruments for a further verification period, the measuring instruments must be verified after the verification period has expired. Verification is carried out by the authorities which are in charge of this task under federal state law.

Rules and technical specifications for measuring instruments which are regulated at the national level as well as rules and findings on conformity assessment procedures are determined by the so-called *Regelermittlungsausschuss (Rule Determination Committee)*. In addition, this committee also determines rules and findings for the use of measuring instruments or measurement values. The *Regelermittlungsausschuss* is composed of expert institutions and associations. These include PTB, the respective authorities of the federal states, conformity assessment bodies, state-accredited inspecting authorities, trade associations and consumer associations. PTB presides over the *Regelermittlungsausschuss* and houses its executive office.

In future, the committee for conformity assessment bodies, which will be presided over by PTB and in which conformity assessment bodies will participate, will make an important contribution to uniform working procedures of conformity assessment bodies.

For the use of new or renewed measuring instruments it will be required in future that these will be

triebnahme der nach dem Landesrecht zuständigen Behörde angezeigt werden.

Zu den gesetzlichen Aufgaben der PTB gemäß Mess- und Eichgesetz gehört auch, die für die Durchführung des Gesetzes zuständigen Landesbehörden zu beraten, wissenschaftliche Forschung auf diesem Gebiet zu betreiben und die Normung und Standardisierung auf diesem Gebiet zu unterstützen. Darüber hinaus stellt die PTB auch die metrologische Rückführung der Normalgeräte und Prüfungshilfsmittel der Konformitätsbewertungsstellen, der zuständigen Behörden sowie der staatlich anerkannten Prüfstellen sicher.

Die Überwachung der in Verkehr gebrachten Messgeräte (Marktüberwachung) obliegt den nach Landesrecht zuständigen Behörden. Dabei kontrollieren die Marktüberwachungsbehörden anhand angemessener Stichproben, ob Messgeräte die gesetzlichen Anforderungen erfüllen, und treffen die erforderlichen Maßnahmen, wenn sie den begründeten Verdacht haben, dass dies nicht der Fall ist. Im Rahmen der Verwendungsüberwachung überprüfen die zuständigen Behörden, ob Messgeräte und Messwerte die Anforderungen des Mess- und Eichgesetzes an deren Verwendung erfüllen.

reported to the authority which is in charge of this task under federal state law six weeks after their putting into operation, at the latest.

According to the *Measures and Verification Act*, PTB's legal tasks also include advising the federal state authorities which are in charge of implementing the act, to perform scientific research in this field, and to support standardization in this field. In addition, PTB also ensures the metrological traceability of the standard devices and of the test facilities of the conformity assessment bodies, of the respective authorities and of the state-accredited inspecting authorities.

Monitoring of the measuring instruments that have been placed on the market (market surveillance) is the task of those authorities which are in charge of it under federal state law. By means of suitable random samples, the market surveillance authorities carry out checks in order to find out whether measuring instruments comply with the legal requirements, and they take the necessary measures if they have reasonable suspicion that this is not the case. Within the scope of application monitoring, the authorities in charge verify whether the measuring instruments and the measurement values comply with the requirements which are specified in the *Measures and Verification Act* for their use.

### Quality for Africa

Die Technische Zusammenarbeit der PTB mit dem afrikanischen Kontinent beruht auf einem nunmehr 45-jährigen Erfahrungshintergrund. Zum einen wurde erkannt, dass die einseitige Förderung der Metrologie in Afrika wenig Sinn hat und nur ein konzertiertes Zusammenspiel aller Elemente der Qualitätsinfrastruktur im developmentpolitischen Sinne Erfolg verspricht. Zum anderen wurde aber auch deutlich, dass ein Kontinent, welcher 33 von 45 der am wenigsten entwickelten Länder (least developed countries) beheimatet, neue konzeptionelle Vorgehensweisen erforderlich macht, um eine effiziente Nutzung der äußerst beschränkten finanziellen und personellen Ressourcen zu gewährleisten. Diesen Gedanken Rechnung tragend, entwickelte die PTB sehr frühzeitig eine eigenständige, ganzheitliche pan-afrikanische Strategie für die Förderung der Qualitätsinfrastruktur. „Quality for Africa“ umfasst vier Handlungsfelder: regionale Maßnahmen, nationale Interventionen, strategische Allianzen und pan-afrikanische Institutionenförderung.

Das Quality-for-Africa-Konzept ist ambitiös. Es berücksichtigt nicht nur die developmentpolitischen Vorgaben des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, sondern auch jene der Afrikanischen Union. Bereits im Gründungsvertrag der „African Economic Community“ (Abuja Treaty, 1991) finden sich gezielte Hinweise zu einheitlichen Normen und Verfahren der Qualitätssicherung. In den Folgejahren entstanden unzählige weitere Dokumente, die zum Abbau der inner-afrikanischen Handelshemmnisse auffordern. Die Lage ist prekär: Der afrikanische Anteil am Welthandel liegt bei unter 3 %, und der inner-afrikanische Handel macht nur 0,5 % des Gesamtwelthandels aus.

1984 begann die PTB mit der organisatorischen und institutionellen Beratung der African Organisation for Standards (ARSO). Zwanzig Jahre später war die Zeit reif für eine pan-afrikanische Metrologievereinigung. Nachdem auch die letzten Unklarheiten beseitigt waren und eindeutig geklärt werden konnte, dass Metrologen weder für das Wetter noch für den U-Bahnbau zuständig sind, wurde im März 2006 das Intra-Africa Metrology System (AFRIMETS) in Midrand, Südafrika, unter großer internationaler Beteiligung ins Leben gerufen. Sowohl vor als auch nach dieser Veranstaltung leistete die PTB wesentliche Beiträge zur Ausgestaltung von AFRIMETS. Durch die positiven Erfahrungen bestärkt, wurde mit einem dreijährigen Vorlauf die Gründung

### Quality for Africa

PTB's Technical Cooperation with the African continent looks back on 45 years of experience. On the one hand, we have come to realize that promoting solely metrology in Africa does not make much sense; only a concerted interaction of all elements of the quality infrastructure as an instrument of development policy is a promising approach. On the other hand, it, however, also turned out that a continent home to 33 of the 45 least developed countries (LDCs) requires new conceptual approaches in order to ensure the efficient use of the extremely limited financial and human resources. Taking all this into consideration, PTB developed its own integrated pan-African strategy at a very early stage in order to promote the quality infrastructure. „Quality for Africa“ encompasses four fields of action: regional measures, national interventions, strategic alliances, and the promotion of institutions at the pan-African level.

The „Quality for Africa“ concept is ambitious. It not only takes the requirements with regard to development policy prescribed by the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ) into account, but also those of the African Union. As early as in the founding treaty of the African Economic Community (AEC, Abuja Treaty, 1991), harmonized standards and procedures of quality assurance are mentioned. In the following years, innumerable other documents for the reduction of the barriers to trade within Africa were elaborated. The situation is precarious: the African share in world trade lies below 3 %, and trade within Africa only represents 0.5 % of total world trade.

In 1984, PTB began the organizational and institutional consultation of the African Organisation for Standards (ARSO). Twenty years later, the time had come for a pan-African metrology association to be established. After sorting out the last problematic issues and after clarifying what a metrologist deals with – namely neither with the weather forecast, nor with building underground train lines – the Intra-Africa Metrology System (AFRIMETS) was launched in Midrand, South Africa, in March 2006 with numerous international participants. Both before and after this milestone, PTB contributed significantly to shaping AFRIMETS. Strengthened by the positive experience, the creation of the African Accreditation Cooperation (AFRAC) was tackled with a run-in period of 3 years; its foundation ceremony and first general assembly took place in Cairo, Egypt, in September 2010. The last pillar of African



Internationale und pan-afrikanische Qualitätsinfrastruktur (PAQI)

International and pan-African Quality Infrastructure (PAQI)

der African Accreditation Cooperation (AFRAC) in Angriff genommen, deren Gründungsfeier und erste Generalversammlung im September 2010 in Kairo, Ägypten, abgehalten wurde. Die letzte Säule der afrikanischen Institutionen der Qualitätsinfrastruktur bildet die im Februar 2008 gegründete African Electrotechnical Standardisation Commission (AFSEC), eine nachgeordnete Organisation der African Energy Commission (AFREC).

QI institutions is the African Electrotechnical Standardisation Commission (AFSEC) – a subordinate organization of the African Energy Commission (AFREC) – which was founded in February 2008.

Was jedoch noch fehlte, war eine „Anerkennung“ durch die African Union Commission (AUC). Ab 2011 moderierte die PTB mehrere „stakeholder meetings“, um ein gemeinsames Werben und Handeln zu erreichen. Hieraus entstand das Austauschforum für die pan-afrikanische Qualitätsinfrastruktur

What was still missing, though, was “recognition” by the African Union Commission (AUC). From 2011 on, PTB moderated several so-called “stakeholder meetings” in order to attain joint canvassing and proceeding. This gave birth to the exchange forum for the pan-African quality infrastructure (PAQI). In a declaration made at the Conference of African Ministers of Industry (June 2013), the ministers recognized PAQI “as the continental platform for all matters related to standardization, metrology, accreditation and conformity assessment”. In



Die Präsidenten der vier pan-afrikanischen Organisationen für Qualitätsinfrastruktur bei der Unterzeichnung des Memorandum of Understanding am 30. August 2013 in Nairobi, Kenia.

The presidents of the four pan-African organizations of quality infrastructure on the occasion of the signing of the Memorandum of Understanding on 30 August 2013 in Nairobi, Kenya.

tur (PAQI). In einer Deklaration der Conference of African Ministers of Industry (Juni 2013) erkannten die Minister „the Pan African Quality Infrastructure (PAQI) as the continental platform for all matters related to standardization, metrology, accreditation and conformity assessment“ an. Im August 2013 unterzeichneten die Vertreter von AFRAC, AFRI-METS, AFSEC und ARSO ein Memorandum of Understanding, welches PAQI als ein gemeinsames Forum ausweist, das die Möglichkeit bietet, im Bereich der Qualitätsinfrastruktur einen Beitrag zu den sozio-ökonomischen Zielen Afrikas zu leisten. Wichtigstes Organ von PAQI ist das Joint Committee, welches als Liaison Office zur AUC dient. Die Direktorin für Handel und Industrie der AUC übernahm nicht nur die offizielle Eröffnungsrede, sondern wohnte auch der ersten Sitzung des Joint Committee bei.

Deutschland ist der größte bilaterale Geber im Bereich der Qualitätsinfrastruktur in Afrika. Der größte Teil der technischen Beratung wird über die PTB abgewickelt. Mit den Maßnahmen zur Organisationsentwicklung hat die PTB nicht nur Mut und einen langen Atem bewiesen, sondern sich einen Namen als „honest broker“ der afrikanischen Idee gemacht. Der afrikanische Kontinent hat den Zugang zur Bühne der internationalen Qualitätsinfrastruktur gefunden. Das Netzwerk der Zusammenarbeit ist tragfähig. Quality for Africa ist noch nicht erreicht, aber der Grundstein ist erfolgreich gelegt.

August 2013, the representatives of AFRAC, AFRI-METS, AFSEC and ARSO signed a Memorandum of Understanding (MoU) which designated PAQI as a joint forum allowing the possibility of contributing to Africa's socioeconomic objectives in the field of quality infrastructure. PAQI's most important organ is the Joint Committee which serves as the liaison office with AUC. AUC's Director of Trade and Industry not only held the official opening speech, but also attended the first session of the Joint Committee.

Germany is the largest bilateral donor in the field of quality infrastructure in Africa. The major part of the technical consultation is processed by PTB. With the measures for organizational development, PTB has not only proven to be courageous and tenacious, but has also established itself as an “honest broker” of the African conception. The African continent has made its way onto the stage of international quality infrastructure. The cooperation network is self-supporting. The objective of “Quality for Africa” has not yet been achieved, but the cornerstone has been successfully laid.

## „maßstäbe“ widmen sich Meilensteinen der Metrologie

Die markantesten Gipfel aus 125 Jahren metrologischer Forschung sind das Thema der diesjährigen „maßstäbe“-Ausgabe (Heft 12: „Meilensteine“). Das wissenschaftsjournalistische Magazin der PTB widmet sich damit zum ersten Mal nicht einem einzigen, sondern einer ganzen Reihe physikalischer Themen – eben jenen, die in der Geschichte der PTR und PTB ganz besonders leuchten.

Das erste der insgesamt sieben Kapitel („Das Körnige“) behandelt die Untersuchung an Schwarzen Körpern, die Max Planck zur bahnbrechenden Erkenntnis führte, dass Energie nur portionsweise auftritt. Sie markiert den Startpunkt der Quantenphysik. Bis heute nutzt die PTB Schwarze Körper für Präzisionsmessungen.

Eine ähnliche Kontinuität findet sich bei der Untersuchung der Supraleitung, der sich das nächste Kapitel („Das Kalte“), widmet. Hier führt ein direkter Weg vom Meißner-Ochsenfeld-Effekt bis zur heutigen Nutzung der Supraleitung – beispielsweise in den SQUIDs, bei deren Erforschung die PTB heute zur Weltspitze gehört. Und so lässt sich die Reihe fortsetzen: die Entwicklung des Geigerzählers, das Boltzmann- und das Avogadro-Projekt, optische Atomuhren, nanometergenaue Messungen oder die spannende Forschung rund ums Zählen einzelner Elektronen – all dies sind Beispiele für Erkenntnisse aus PTR und PTB, die dauerhafte Bedeutung erlangt haben. Dabei gehen die „maßstäbe“ nicht wie ein Geschichtsbuch vor, sondern setzen an der Gegenwart an: am heutigen Einsatz der Erkenntnisse in Physik und Technik. So entsteht ein lebendiges Bild einer jung gebliebenen, höchst vielseitigen Forschungseinrichtung.

## Scientific journal *maßstäbe* focuses on the milestones of metrology



The most outstanding highlights from 125 years of metrological research are the subject of this year's edition of *maßstäbe* (issue 12: *Milestones*). Thus, PTB's scientific-journalistic journal focuses, for the first time, not on a single, but rather on a whole series of physical subjects – precisely those that shine the brightest in the history of the PTR and PTB.

The first of seven chapters in total (*Das Körnige* (*The granular*)) deals with the investigation of black bodies which led Max Planck to the groundbreaking finding that energy only occurs portionwise. This marks the starting point of quantum physics.

Even today, PTB uses black bodies for precision measurements.

A similar continuity is to be found in the investigation of superconductivity, which is the focus of the next chapter (*Das Kalte* (*The cold*)). A direct path leads here from the Meissner-Ochsenfeld effect to today's use of superconductivity – for example, in the case of SQUIDs, in whose research PTB is today a world leader. And the series can be continued in this fashion: the invention of the Geiger counter, the Boltzmann Project and the Avogadro Project, optical atomic clocks, measurements accurate to the nanometer, or the exciting research surrounding the counting of single electrons – these are all examples of the PTR and PTB findings that have attained permanent importance. Thereby, the *maßstäbe* does not read like a history book, but rather starts in the present day: today's application of the findings in physics and technology. Thus the picture is created of a research institute that is young at heart and highly versatile.



# Akademische Abschlüsse • Academic Degrees

## Promotionen 2013 • Doctorates in 2013

Name	Organisationseinheit	Thema
Oliver Witzel	3.2	In-situ Laserabsorptionsspektroskopie zur $\mu$ sec schnellen Bestimmung von Spezieskonzentrationen und Gastemperaturen in Verbrennungsmotoren
Julia Hornig	3.5	Permeable Werkstoffe zur zünddurchschlagsicheren Explosionsdruckentlastung – Gestaltung und Anwendungsmöglichkeiten
Tim Langer	3.5	Zündung von Wasserstoff/Luft-Gemischen durch repetierende Teilentladungen
Christian Hagemann	4.3	Ultra-stable laser based on a cryogenic single-crystal silicon cavity
Thomas Middelman	4.3	Bestimmung des Einflusses thermischer Strahlung auf eine optische Gitteruhr
Karsten Pyka	QUEST-2	High-precision ion trap for spectroscopy of Coulomb crystals
Tobias Klein	4.2	Rückgeführte, hochgenaue Größenmessung von Nanopartikeln im Transmissionsmodus eines Rasterelektronenmikroskops
Jun Guan	5.2	Interferometric Encoders for Linear Displacement Metrology
Dominic Gnieser	5.2	Monte-Carlo-Programm für die Bildentstehung im Rasterelektronenmikroskop
Diana Linzmaier	6.1	Entwicklung einer Low-Level-Radon-Referenzkammer
Peter Sievers	6.3	Time-resolved and position-resolved X-ray spectrometry with a pixelated detector
Gudrun Gleber	7.1	Traceable determination of the size of nanoparticles using Small-Angle X-ray Scattering
Thomas Eichler	7.5	Vergleich der Stereo Particle Image Velocimetry (SPIV) mit rückgeführten Messverfahren und Untersuchungen gezielt geströmter Strömungszustände in geschlossenen Rohrleitungen
Karsten Tawackolian	7.5	Metrologische Charakterisierung von Ultraschall-Durchflussmessgeräten
Ingo Hilschenz	8.2	Design of a Low Field Magnetic Resonance Imaging Measurement system working below one Kilohertz
Florian Kohl	8.4	Blind Separation of Dependent Source Signals for MEG Sensory Stimulation Experiments
Mark-Alexander Henn	8.4	Statistical Approaches to the Inverse Problem of Scatterometry
Markus Radszuweit	8.4	An Active Poroelastic Model for Cytoplasm and Pattern Formation in Protoplasmic Droplets of Physarum Polycephalum

**Diplom- und Masterarbeiten 2013 • (Master) Theses in 2013**

Name	Organisationseinheit	Thema
Jannis Klaus	1.6	Erprobung abgestimmter Resonanzabsorber zur Minderung von Raummoden
Holger Schramm	1.7	Grundlagenuntersuchungen für die interferometrische Druckmessung unter Nutzung der Druckabhängigkeit des Brechungsindex
Michael Seckelmann	2.3	Entwicklung eines Messsystems zur Überprüfung von Energie- und Leistungsmesssystemen im Bereich der Elektromobilität an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Matthias Kruskopf	2.5	Optimization of growth parameters and characterization of epitaxial gaphene on 6H-SiC
Anna-Lisa Hauswaldt	3.1	Evaluation of measurement data in analytical chemistry
Claudia Frank	3.1	Entwicklung von primären Referenzverfahren zur Quantifizierung und Bestimmung des Beladungsgrades von Transferrin
Jens Ensminger	3.5	Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf die Zünddurchschlagsichere Explosionsdruckentlastung
Lennart Meyer	3.7	Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von Ultraschall an der Phasengrenze
Matthias Pfeifer	3.7	Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von metallischen Reibkontakten in Dampf-Luft-Gemischen
Paul Lange	3.7	Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung von heißen Oberflächen in Reibkontakten in Abhängigkeit der Konstruktionswerkstoffe
Matthias Weber	3.7	Untersuchung von Messverfahren zur Trennung der Verluste in Permanentmagneteregten Synchronmaschinen
Björn Beckmann	3.7	Erstellung eines Steuerungsprogrammes zur Strom- und Spannungsvorgabe für einen Motorschutzgeräteprüfstand mit Zeit- und Strommessung
Thomas Walzak	4.1	Untersuchung des Einflusses der Einstrahlungsbedingungen auf das Ergebnis von PV-Outdoorkalibrierungen
Malte Niemann	QUEST-3	Konzeption eines Quantenlogikdetektors für Tests diskreter Symmetrien mit (Anti-)Protonen
Christian Krause	7.2	Untersuchung des Stromrauschens von Chopper-Verstärkern
Jan-Hendrik Storm	7.2	Untersuchung der magnetischen Feldempfindlichkeit eines dc-SQUID Magnetometers

## Bachelorarbeiten 2013 • Bachelor Theses in 2013

Name	Organisationseinheit	Thema
Geske Linnéa Eberlei	1.6	Schallschutzschirme für Musiker – Untersuchungen zur Formgebung unter Berücksichtigung der Akzeptanz durch Musiker
Jonas Daniel Lochner	1.6	Hörschwellenmessungen zur Tieftonwirkung und Hörbarkeit harmonischer Tonkomplexe mit Grundfrequenz im Infrashallbereich
Robert Müller-Rhein	1.7	Verwendung von Eckpositionen bei bauakustischen Messungen
Simon Weihe	1.7	Inbetriebnahme eines Messplatzes zur Reziprozitätskalibrierung von Messmikrofonen im Diffusfeld
Stefanie Moritz	3.5	Flammenausbreitung nach Zündung durch Hochspannungskondensatorentladungen nahe der Mindestzündenergie
Robert Hankers	3.7	Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von Ultraschall bei einer Frequenz von 20 kHz in kavitierenden Flüssigkeiten
Christian Pescher	3.7	Impedanzmessung an permanentmagnet-erregten Synchronmaschinen zur Vorausberechnung der Oberschwingungsverluste
Eugen Ermisch	3.7	Optimierung und Inbetriebnahme einer vorhandenen Motorschutzgeräteprüfeinrichtung
Luis Mosquera	3.7	Untersuchung des Einflusses der Versorgungsspannung auf den Wirkungsgrad elektrischer Asynchronmaschinen
Dominic Roth	3.7	Aufbau und Test einer über das TCP/IP-Protokoll steuerbaren Spannungsregelung für einen Stelltransformator zur Prüfung von elektrischen Antrieben
Viola Koch	7.5	LDA-Messungen zur Durchflussbestimmung in einem konditionierten Rechteckquerschnitt

# Zahlen und Fakten • Figures and Facts

## Personal: Entwicklung • Staff: development

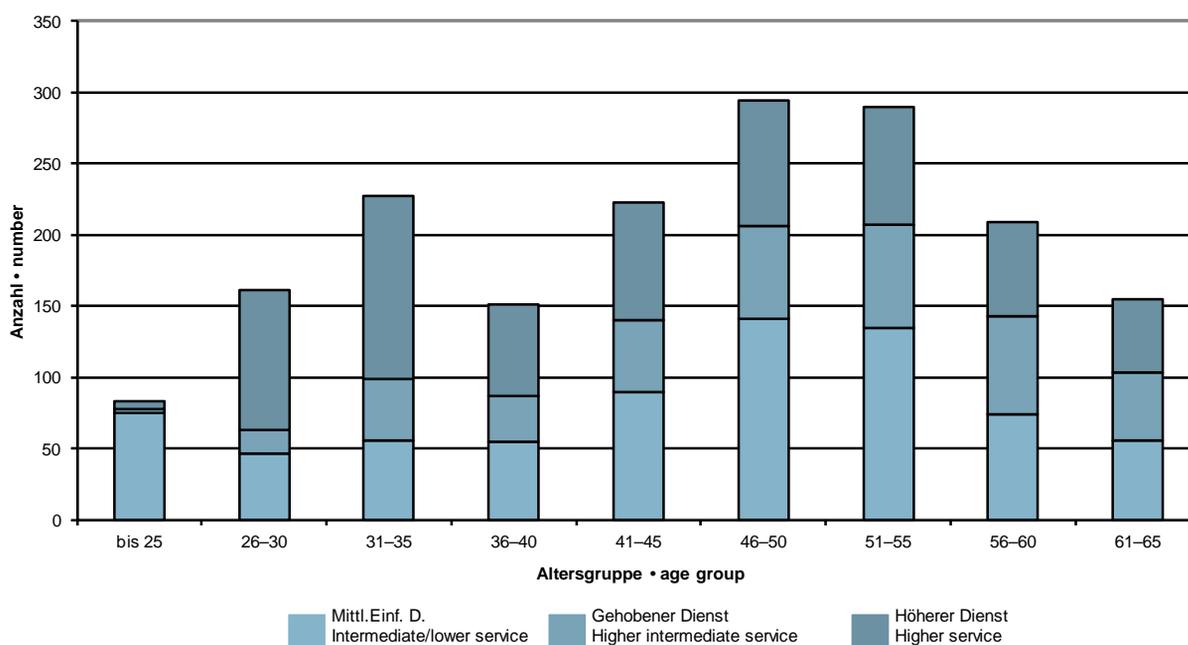
Personelle Entwicklung von 2004 bis 2013 (Stand: 31. Dezember 2013) • Development of staff  
 a) unbefristet • unlimited in time b) zeitlich befristet • limited in time

Beschäftigungsverhältnis	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
a)										
Beamte • civil servants	508	510	515	523	517	513	537	535	550	540
Angestellte • employees	727	692	863	833	830	831	795	779	752	778
Arbeiter • workers	207	193	196	--*	--	--	--	--	--	--
gesamt • total	1428	1398	1378	1356	1347	1344	1332	1314	1302	1258

b)										
Auszubildende • trainees	158	159	150	136	134	135	134	131	135	140
befristet Beschäftigte • temporary staff	61	69	66	98	110	175	230	264	209	234
Drittmittelpersonal • staff members financed by third parties	105	109	169	162	172	185	194	216	286	303
Mitarbeiter gesamt • staff members in total	1752	1735	1763	1752	1763	1839	1890	1925	1932	1935

\* Seit In-Kraft-Treten des TVöD am 1.10.2005 werden Angestellte und Arbeiter als „Beschäftigte“ zusammengefasst./Since the coming into force of the TVÖD (Collective Agreement for the Public Service) on 1 October 2005, salaried employees and wage earners have been consolidated as “employees”.

## Personal: Altersstruktur • Staff: age structure



Altersstruktur der Mitarbeiter/innen, unterschieden nach Laufbahngruppen (ohne Auszubildende)

Age structure of staff, distinguished by civil service groups (not including trainees)

**Ausbildung • Training (31. Dezember 2013)**

	BS	Berlin	
Duales Studium Elektrotechnik im Praxisverbund	13 (3)	--	Dual studies in electrical engineering in a practice union
IT-Systemelektroniker	18 (6)	--	information and telecommunication technologists
Elektroniker/in für Geräte und Systeme	27 (7)	--	electronics technicians for devices and systems
Physiklaboranten	18 (6)	--	laboratory technicians, physics
Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik	12 (3)	--	electronics engineers for electrical and building services engineering
Feinwerkmechaniker Fachrichtung Feinmechanik	16 (5)	5 (2)	precision instrument makers speciality: precision mechanics
Fotografen	4 (1)	--	photographers
Mediengestalter	3 (2)	--	media designers
Tischler	--	4 (1)	joiners
Elektroniker/in für Informations- und Systemtechnik	--	11 (4)	electronics technicians for information and systems technology
Verwaltungsfachangestellte	--	9 (3)	public administration employees
<b>gesamt</b>	<b>111 (33)</b>	<b>29 (10)</b>	<b>total</b>

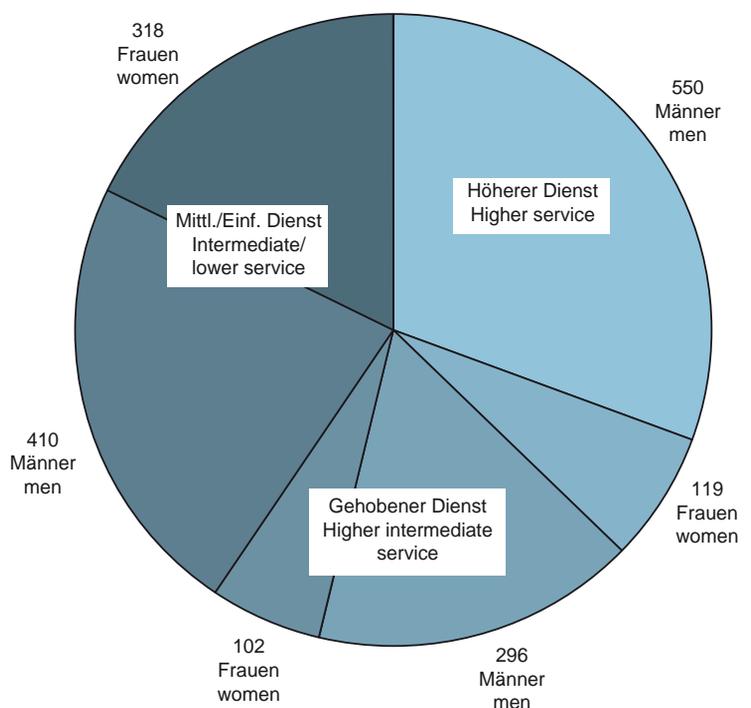
Die PTB gehört zu den größten Ausbildungsbetrieben in der Region Braunschweig. Gegenwärtig sind 140 Auszubildende bei der PTB angestellt. In Klammern sind die Neueinstellungen im Berichtsjahr angegeben.

The PTB is among the most important institutions in the region of Braunschweig which provide training. 140 trainees are at present employed by PTB. The figures in parentheses indicate fresh engagements in the year under review.

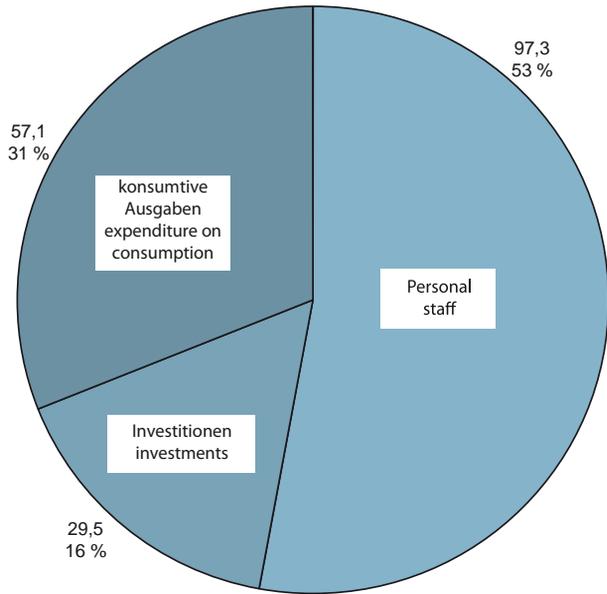
**Personal: Laufbahn Staff • civil service career**

Anzahl der Mitarbeiter/innen, unterschieden nach Laufbahn und Geschlecht (ohne Auszubildende)

Number of staff members distinguished by civil service career and sex (not including trainees)



Haushalt: Ausgabenverteilung • Budget: break-down of expenditure



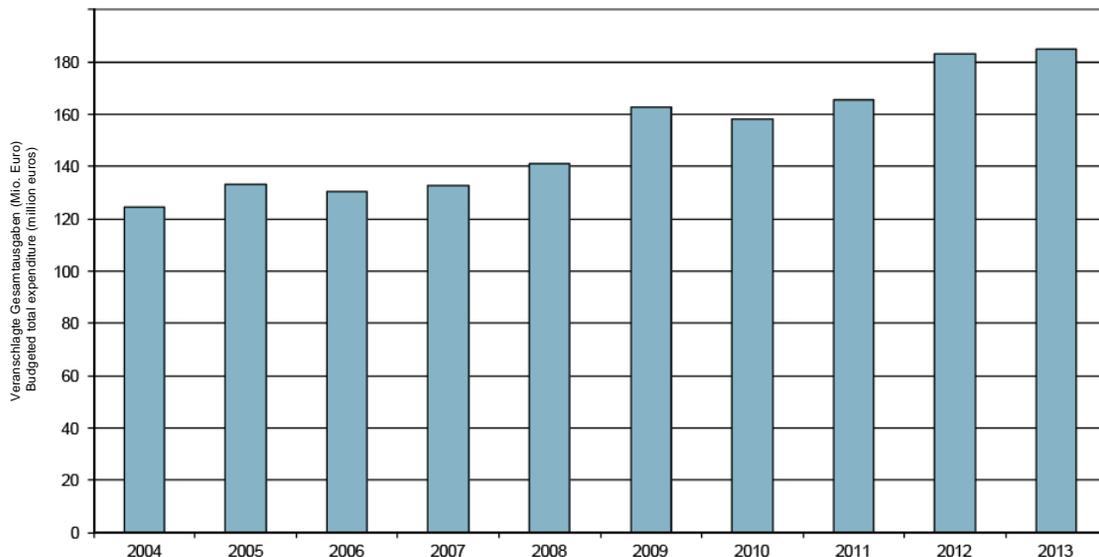
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. Euro). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

The chart shows the break-down of the budgeted expenditure (in million euros) in the year under review. For comparison, the table indicates the figures of the past years.

Ausgaben der PTB (in Mio. Euro) • Expenditure of PTB (in million euros)

Haushaltsmittel	2011	2012	2013	budgetary means
Personalausgaben	90,8	93,9	97,3	staff costs
Investitionen (Bau und Geräte)	38,5	34,2	29,5	investments (building activities and instruments)
Zuweisungen und Zuschüsse	2,2	2,6	1,2	allocations and grants
konsumtive Ausgaben	34,3	52,4	57,1	expenditure on consumption
gesamt	165,8	183,1	185,1	total

Haushalt: Entwicklung • Budget: development

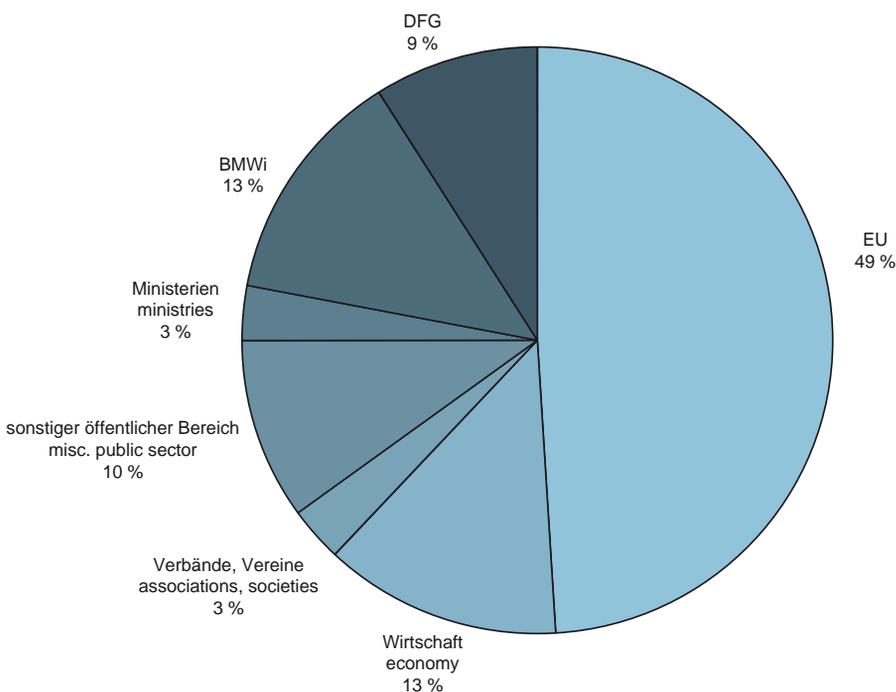


Entwicklung der Gesamtausgaben im PTB-Haushalt in den letzten zehn Jahren  
Development of the total expenditure of the PTB budget in the past ten years

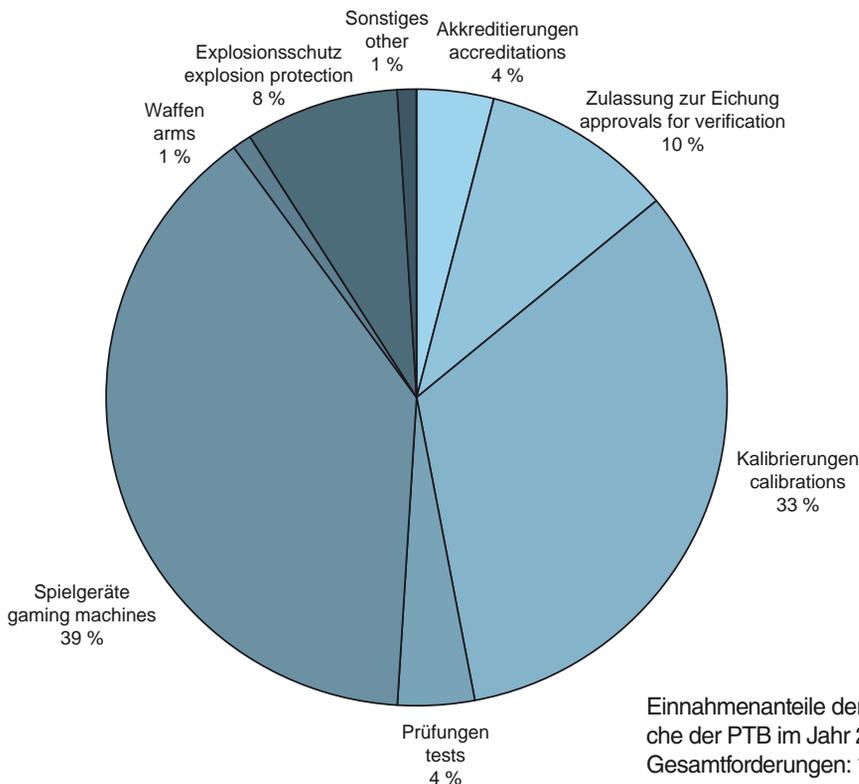
**Drittmittel: Forschungsprojekte • Third-party funds: research projects**

Die Drittmittel für Forschungsvorhaben summieren sich 2013 auf 17,6 Mio. Euro. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Insgesamt wurden im Berichtsjahr 28,6 Mio. Euro für 584 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) verwendet (davon 3,5 Mio. Euro für 76 Projekte in Berlin).

In 2013, the third-party funds for research projects added up to a total of 17.6 million euros. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources. In the year under review, a total of 28.6 million euros were used for 584 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 3.5 million euros of these for 76 projects in Berlin.



**Einnahmenanteile der Dienstleistungsbereiche • Income shares of the service centers**



Einnahmenanteile der verschiedenen Dienstleistungsbereiche der PTB im Jahr 2013.  
Gesamtforderungen: 15,05 Millionen Euro

Income distribution of 2013 among the various service sectors of PTB.  
Total receivables: 15.05 million euros

### Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures

Die Bundesanstalt verbrauchte bzw. es fielen an ... • The Bundesanstalt consumed ...

<b>... in Braunschweig</b>		2011	2012	2013	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	27 100	28 200	27 800	electrical energy
Wärme	MWh	24 700	25 700	24 400	heat
Gas	m <sup>3</sup>	32 300	29 900	28 500	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	80 400	90 800	91 100	water
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	84	82	87	refuse-like
recycelt	t	227	223	194	recycled
zur Beseitigung	t	21	19	15	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	80 300	66 900	78 500	waste disposal costs (approx.)

<b>... in Berlin</b>		2011	2012	2013	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	8 100	8 050	8 000	electrical energy
Gas	m <sup>3</sup>	18 900	17 000	11 000	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	32 700	28 900	32 400	water
Helium, flüssig	l	49 800	47 600	48 000	helium, liquid
Stickstoff, flüssig	l	43 800	39 500	44 000	nitrogen, liquid
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	46	47	43	refuse-like
recycelt	t	51	70	63	recycled
zur Beseitigung	t	6	2	3	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	15 700	16 100	15 800	waste disposal costs (approx.)

**PTB-Seminare im Jahr 2013 • PTB seminars in 2013**

Berechnung der Messunsicherheit – Empfehlung für die Praxis  
 Leitung: Dr. S. Mieke (8.4)  
 März 2013

Optische Bildverarbeitung – Standardisierung von Performanzanalyse  
 Leitung: Dr. F. Härtig (5.3)  
 Oktober 2013

Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich  
 Leitung: Dr. J. Melcher, Dr. T. Schrader (2.1/2.2)  
 Mai 2013

Vakuultraviolette und extremultraviolette Metrologie  
 Leitung: Dr. F. Scholze, Dr. A. Gottwald (7.1)  
 November 2013

Temperatur 2013 – Verfahren und Geräte in der Temperatur- und Feuchtemesstechnik  
 Leitung: Dr. J. Hollandt, Dr. S. Rudtsch (7.3/7.4)  
 Juni 2013

Strahlenschutzdosimetrie in gepulsten Photonen-Strahlungsfeldern  
 Leitung: Dr. O. Hupe (6.3)  
 November 2013

13. BAM/PTB Kolloquium zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik  
 Leitung: Dr. T. Stolz (3.7)  
 Juni 2013

**Veröffentlichungen und Vorträge • Publications and Lectures**

Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 2010 bis 2013 (vgl. Datenbank „PTB-Publica“ im Internet) und Anzahl der auswärtigen Vorträge, die PTB-Mitarbeiter/innen in diesen Jahren gehalten haben

Number of publications by PTB staff members (in scientific journals, books, conference digests, etc.) between 2010 and 2013 (cf. database “PTB-Publica” on the web) and number of lectures held by PTB staff members outside PTB in these years.

	2010*	2011*	2012*	2013
Veröffentlichungen	672	670	706	610
Vorträge	1013	962	911	919

\* Die Daten aus den vergangenen Jahren (vgl. die entsprechenden Jahresberichte) wurden aktualisiert, da die Angaben lediglich den Stand der Datenbank zum Redaktionsschluss des Jahresberichts wiedergeben. Nachträge in der Datenbank führen zu einer deutlichen Erhöhung der ursprünglich genannten Zahlen.

\* The data from previous years (compare the respective annual reports) were updated, since the information only gives an account of the state of the database at the time the annual report went to press. Subsequent entries in the database lead to distinctly higher numbers.

**Gastwissenschaftler, Gäste und Besucher**

Im letzten Jahr kamen rund 14 000 Besucher aus aller Welt in die PTB (Standort Braunschweig). Den größten Anteil bildeten die metrologischen Fachbesucher aus Wissenschaft und Wirtschaft (7708) sowie die Teilnehmer an unterschiedlichsten Seminaren, Tagungen und Kolloquien (4685). Auch der allgemeine Besucherdienst der PTB im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit fand wie gewohnt regen Zuspruch (74 Besuchergruppen). Hinzu kamen zahlreiche Grundschulklassen, die im WissensForscher-Labor der PTB physikalische Experimente selbst durchführten. Insgesamt fanden so rund 1645 „Besucher in Gruppen“ den Weg in die PTB.

**Guest scientists, guests and visitors**

Last year, approx. 14,000 people from all over the world visited PTB (Braunschweig site). They were largely metrology specialists from science and the economy (7708) as well as participants in various seminars, conferences and colloquia (4685). Visits to PTB by the general public within the scope of public relations work were also very popular as usual (74 groups of visitors). Furthermore, numerous primary school classes came and conducted their own physics experiments in the PTB “WissensForscher” (KnowledgeSearchers) laboratory. Thus, altogether, approx. 1645 “visitors in groups” found their way to PTB.

Projektpartner der PTB

PTB's project partners



**Internationale Zusammenarbeit**

Die Qualitätsinfrastruktur-Projekte des Fachbereichs *Technische Zusammenarbeit* verbessern die Situation von Entwicklungs- und Schwellenländern. Die mit Flaggen und Logos markierten Länder und Regionen werden befähigt, am internationalen Handel teilzunehmen; der Verbraucher-, Umwelt- und Gesundheitsschutz wird sichergestellt. Die Mitarbeiter und Experten des Fachbereichs beraten Regierungen und Ministerien, Institutionen der Qualitätsinfrastruktur sowie kleine und mittlere Unternehmen.

Das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, die Europäische Union und die Weltbank finanzieren die Projekte.

**Volumen 2013**

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung	16,05 Mio €
Europäische Union	0,11 Mio €
<b>Gesamt</b>	<b>16,16 Mio €</b>

**International Cooperation**

The quality infrastructure projects of PTB's Department of "Technical Cooperation" (TC): These projects help improve the situation in developing countries and countries in transition and enable the countries and regions marked with flags or logos to take part in international trade; the protection of the consumers, of the environment and of health is ensured. The employees and experts of the TC Department advise governments, ministries, QI institutions as well as SMEs.

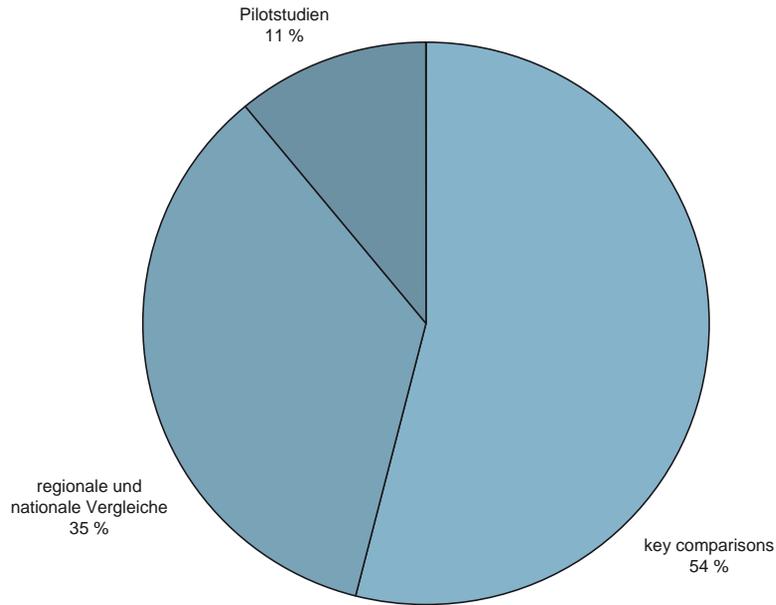
The projects are funded by the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ), the European Union and the World Bank.

**Funding volume 2013**

Federal Ministry for Economic Cooperation and Development	16.05 million €
European Union	0.11 million €
<b>Total</b>	<b>16.16 million €</b>

**Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements**

Die PTB nahm im Berichtsjahr an 65 Vergleichsmessungen teil, und zwar an 35 Schlüsselvergleichen, 23 regionalen/nationalen Vergleichen und 7 Pilotstudien. 82 % der Vergleichsmessungen waren von direkter Relevanz für die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB im Rahmen des CIPM-MRA. An 28 Vergleichsmessungen nahm die PTB als Pilotlabor teil.



In the year under report, PTB took part in 65 comparable measurements, namely 35 key comparisons, 23 regional/national comparisons and 7 pilot studies. 82 % of the comparable measurements were of direct relevance to the calibration and measurement capabilities of PTB within the scope of the CIPM MRA. PTB participated in 28 comparable measurements as a pilot lab.

**Nationale Normungsvorhaben • National standardization projects**

Die PTB engagierte sich im Jahr 2013 in 515 nationalen Gremien, darunter in 226 Normungsgremien. Insgesamt hat sie dabei 82-mal die Leitung inne.

PTB participates in 515 national bodies, among these 226 in the field of standardization. PTB heads a total of 82 of these bodies.

**Internationale Normungsvorhaben • International standardization projects**

Die PTB engagierte sich im Jahr 2013 in 531 internationalen Gremien, darunter in 201 Normungsgremien. Insgesamt hat sie dabei 84-mal die Leitung inne.

PTB participates in 531 international bodies, among these 201 in the field of standardization. PTB heads a total of 84 of these bodies.



# Abteilung 1

## Mechanik und Akustik



## 1. Mechanik und Akustik

Die Arbeiten der Abteilung 1 können den drei Themenbereichen *Masse und abgeleitete Größen*, *Durchfluss* sowie *Akustik*, *Ultraschall*, *Beschleunigung* zugeordnet werden. Nachfolgend werden wichtige Arbeiten und Schwerpunkte sowie aktuelle Entwicklungen auf diesen Gebieten vorgestellt.

### 1.1 Masse und abgeleitete Größen

Im Themenbereich *Masse und abgeleitete Größen* wird in den Fachbereichen 1.1, 1.2, 1.3 und 1.7 – basierend auf dem Einheiten-, Eich- und Beschussgesetz sowie der Einheitenverordnung und der Eichordnung – an der Darstellung und Weitergabe der mechanischen Einheiten für die Masse, die Kraft, das Drehmoment und den dynamischen Druck gearbeitet.

Zu den Kernaufgaben des Fachbereichs 1.1 gehören in der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* die Darstellung und Weitergabe der SI-Basiseinheit Kilogramm im Bereich von 1 mg bis 5000 kg sowie in den Arbeitsgruppen *Waagen*, *Dynamisches Wägen* und *IT-Wägetechnik* die Prüfung von nichtselbsttätigen und selbsttätigen Waagen sowie Waagenmodulen.

Ein Schwerpunkt der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* ist die Diskussion um die Neudefinition des Kilogramms mit allen daraus resultierenden Forschungs- und Gremienaktivitäten. Auf der diesjährigen Sitzung des beratenden Komitees für Masse und abgeleitete Größen (CCM) wurde eine neue Empfehlung, die CCM-Recommendation G 1 (2013) „On a new definition of the kilogram“ verabschiedet, die inzwischen vom Internationalen Komitee für Maß und Gewicht (CIPM) bestätigt wurde und als Basis für eine „Roadmap“ zur möglichen Neudefinition des Kilogramms im Jahr 2018 dient. Die Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* war darüber hinaus wesentlich an der Gestaltung des aktuellen Vorschlags für eine „mise en pratique“ für das neudefinierte Kilogramm, an Forschungsaktivitäten im Rahmen der EMRP-Projekte SIB03 „kNOW“ und SIB05 „NewKILO“ sowie an den internationalen Vergleichsmessungen CCM.M-K7 und

COOMET.M.M K8 beteiligt. Auf nationaler Ebene wird die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) und der Fachausschuss „Masse“ des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) bei der fachlichen Begutachtung von Kalibrierlaboratorien und der Ausführung von Vergleichsmessungen unterstützt.

Die Arbeitsgruppe *Waagen* organisierte gemeinsam mit dem METAS (Schweiz) im September 2013 die ersten Begutachtungen („Peer assessments“) von Hersteller-Prüflaboratorien im Rahmen des OIML Mutual Acceptance Arrangements (MAA). Die Gutachter aus Frankreich und Südafrika legten besonderen Wert auf die Überprüfung der Unabhängigkeit und Unparteilichkeit dieser Prüflaboratorien sowie das Zusammenspiel mit den verantwortlichen „OIML Issuing Participants“, PTB und METAS. Die Berichte der Gutachter lassen erwarten, dass die drei beteiligten Hersteller-Prüflaboratorien bei der nächsten Sitzung des CPR (Committee on Participation Review) akzeptiert und offiziell in die „Declaration of Mutual Confidence“ (DoMC) für nichtselbsttätige Waagen (OIML R 76) aufgenommen werden.

Nach der Ratifizierung des WELMEC-Leitfadens 8.8 über ein freiwilliges, modulares Bewertungssystem zur Konformitätsbewertung von nichtselbsttätigen Waagen und Messgeräten nach MID im Jahr 2012 wird in Unterarbeitsgruppen der WELMEC-Arbeitsgruppe 2 zurzeit an entsprechenden Anpassungen der WELMEC-Leitfäden 2.2 „Kassensysteme“ und 2.4 „Wägezellen“ gearbeitet. Die Diskussionen, an denen auch Vertreter des VDMA, Hersteller von Waagen sowie Produzenten von Wägezellen beteiligt sind, sind noch nicht abgeschlossen.

Im Fachbereich 1.2 *Festkörpermechanik* werden mit Kraft-Normalmesseinrichtungen Kräfte von 0,5 N bis 16,5 MN und mit Drehmoment-Normalmesseinrichtungen Drehmomente von 1 mN · m bis 1,1 MN · m realisiert.

Im Zusammenhang mit der Etablierung erneuerbarer Energien, insbesondere der Windkraft, verzeichnet der Fachbereich eine deutlich steigende Nachfrage nach rückgeführten Kalibrierungen für sehr große Kräfte und Drehmomente. Die Arbeitsgruppe *Darstellung Kraft* hat darauf bereits im letzten Jahr mit der Beschaffung eines 30-MN-Build-Up-Systems reagiert, welches inzwischen auf 50 MN erweitert werden konnte (Bild 1). Nach entsprechender Validierung kann damit der Kraftmessbereich von bisher 16,5 MN auf 50 MN erweitert werden. In diesem Zusammenhang steht auch

Titelbild:

Neuentwickelter Schallschutzschirm zur Reduzierung der Schallbelastung von Orchestermusikern



Bild 1: 50-MN- Build-Up-System zur rückgeführten Messung sehr großer Kräfte

das im Juli 2013 gestartete EMRP-Projekt SIB63 „Force Metrology“, das vom Fachbereich 1.2 *Festkörpermechanik* koordiniert wird und an dem sich zehn führende europäische Metrologieinstitute, die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) sowie verschiedene europäische Hersteller und industrielle Anwender beteiligen. Mit dem Projekt sollen die relevanten Einflussgrößen auf Built-Up-Systeme für große Kräfte wissenschaftlich untersucht und Modelle zu deren Berücksichtigung im Messunsicherheitsbudget entwickelt werden.



Bild 2: 1,1-MN · m-Drehmoment-Kalibriereinrichtung nach der Umsetzung

Die Arbeitsgruppe *Darstellung Drehmoment* deckt den Bereich von  $1 \text{ mN} \cdot \text{m}$  bis  $1,1 \text{ MN} \cdot \text{m}$  ab, wobei die  $1,1\text{-MN} \cdot \text{m}$ -Drehmoment-Kalibriereinrichtung die weltweit größte und einzige Anlage dieser Art ist (Bild 2). Die seit etwa 10 Jahren in Betrieb befindliche, stets gut ausgelastete Anlage wurde 2013 in eine Nachbarhalle desselben Gebäudes umgesetzt, wobei die erforderliche Demontage dazu genutzt wurde, mehrere konstruktive Verbesserungen vorzunehmen und die Hebellänge mit einem mobilen Koordinatenmesssystems neu zu bestimmen.

Zwischen der kleinsten Messeinrichtung ( $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ) und der nächstgrößeren ( $1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ) ist der Überlappungsbereich bisher recht klein, sodass Drehmomentenaufnehmer mit einem Messbereich zwischen  $2 \text{ N} \cdot \text{m}$  und  $10 \text{ N} \cdot \text{m}$  nicht hinreichend gut kalibriert werden konnten. Diese Lücke soll zukünftig mit einer neu beschafften  $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ -Drehmoment-Normalmesseinrichtung geschlossen werden, die einen automatischen, effektiven Kalibrierbetrieb ermöglichen wird.

Die abteilungsübergreifenden Arbeiten am EMRP-Forschungsprojekt IND09 „Dynamisches Messen mechanischer Größen“, die von der Arbeitsgruppe 1.73 *Stoßdynamik* koordiniert werden, wurden im Jahr 2013 fortgesetzt. So führte die Arbeitsgruppe *Periodische Kräfte* erstmals bilaterale Vergleichsmessungen an einem piezoelektrischen Kraftaufnehmer mit dem spanischen Partnerinstitut CEM im Frequenzbereich bis  $2000 \text{ Hz}$  durch. Die ersten Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der von PTB und dem CEM gemessenen dynamischen Sensitivitäten des piezoelektrischen Aufnehmers (Bild 3). Die Ergebnisse bestätigen auch die von der PTB im QMH-Leistungsverzeichnis angegebenen Unsicherheiten für die dynamische Kalibrierung von Kraftaufnehmern.

In der Arbeitsgruppe 1.73 *Stoßdynamik* wurden im Rahmen desselben EMRP-Projekts (IND09) an der modernisierten  $20\text{-kN}$ -Kraftstoß-Normalmesseinrichtung (Bild 4) Messreihen mit verschiedenen Aufnehmern durchgeführt, mit denen eine neue Methodik zur Parameteridentifikation entwickelt werden soll. Weitergeführt wurden auch die bereits im letzten Jahr begonnenen Messungen an verschiedenen Kraftaufnehmern, mit denen der Einfluss verschiedener Montagebedingungen auf das dynamische Verhalten bei der Stoßkalibrierung untersucht wird.

Auch die dynamische Drehmomentkalibrierung hat weitere Fortschritte gemacht. So wurde eine Mess-

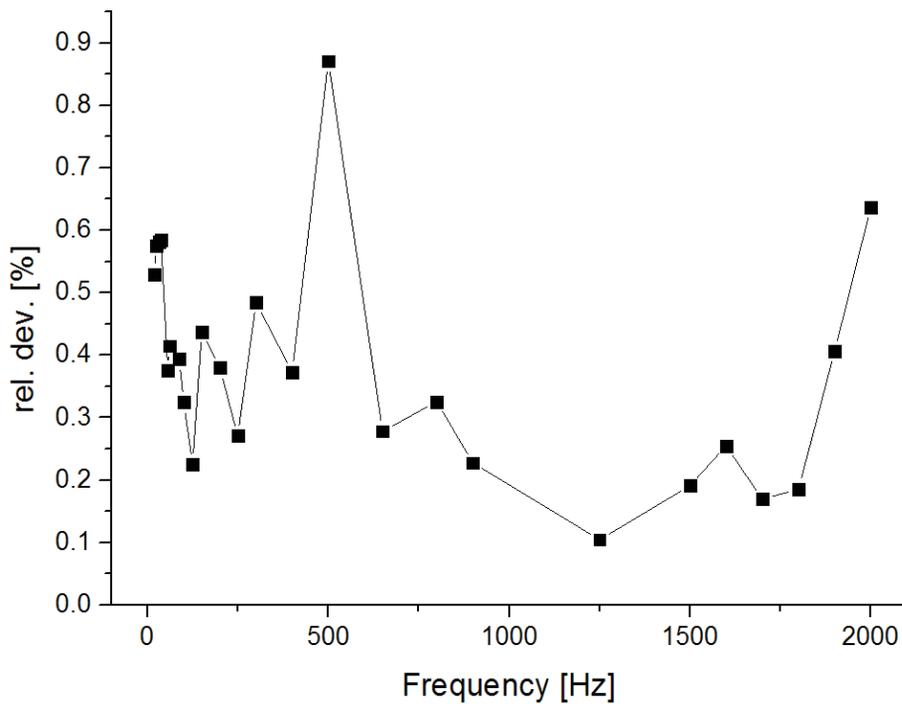


Bild 3: Relative Abweichung der von PTB und CEM bestimmten Sensitivitäten eines piezoelektrischen Kraftaufnehmers im Frequenzbereich bis etwa 2000 Hz

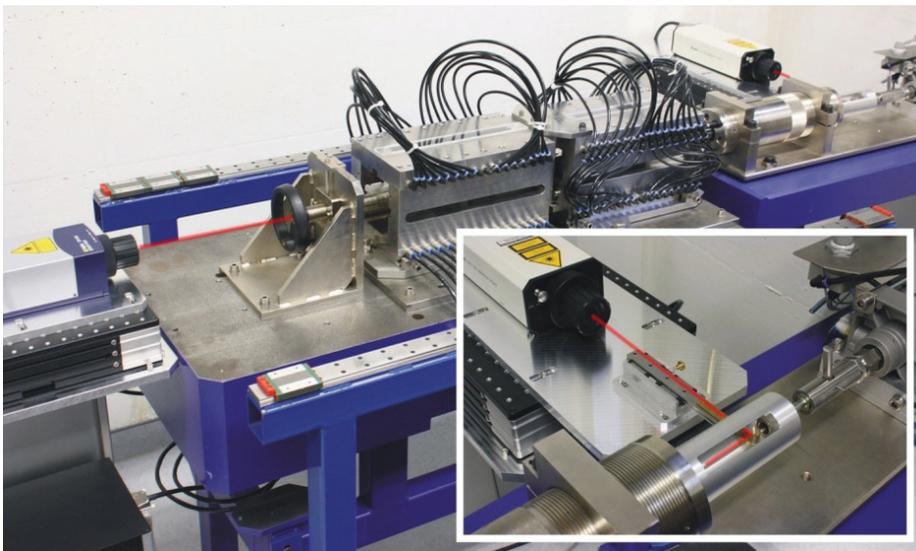


Bild 4: Ansicht der modernisierten 20 kN-Kraftstoß-Normalmess-einrichtung mit coaxialer interferometrischer Beschleunigungsmessung



Bild 5: Ansicht der neuen dynamischen Drehmoment-Normalmeseinrichtung der PTB bis 20 N · m und 1 kHz

einrichtung für kleine sinusförmige Drehmomente bis maximal  $20 \text{ N} \cdot \text{m}$  im Frequenzbereich bis  $1 \text{ kHz}$  fertiggestellt und erste Testmessungen durchgeführt (Bild 5). Beteiligte Projektpartner sind hier die PTB-Arbeitsgruppe 8.42 *Datenanalyse und Messunsicherheit* sowie das französische Partnerinstitut LNE.

Nicht zuletzt wurde ebenfalls im Rahmen des EMRP-Projektes IND09 in der Arbeitsgruppe 1.33 *Dynamischer Druck* ein neues Verfahren zur dynamischen Kalibrierung von Drucksensoren entwickelt. In einem ersten Schritt konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass das Verfahren der interferometrischen Druckmessung für statische Drücke bis zu  $500 \text{ MPa}$  geeignet ist. Damit ist der Grundstein für weitere Untersuchungen mit einer neuen Versuchseinrichtung gelegt, mit denen gezeigt werden soll, dass das interferometrische Verfahren auch zur Rückführung von kurzzeitigen, halbsinusförmigen Gasdruckimpulsen bzw. hydraulischen Druckimpulsen bis zu  $800 \text{ MPa}$  geeignet ist, wie sie beispielsweise bei Einspritzpumpen für Kraftstoffe auftreten.

## 1.2 Durchfluss

Auf der Basis des Einheitengesetzes befassen sich die Fachbereiche 1.4 *Gase* und 1.5 *Flüssigkeiten* mit der Darstellung und Weitergabe der Einheiten für die Strömungsmessgrößen Menge, Durchfluss und Strömungsgeschwindigkeit von Gasen und Flüssigkeiten.

In der Arbeitsgruppe *Strömungsmesstechnik* des Fachbereiches 1.4 *Gase* wurden weiterführende Untersuchungen zu unterschiedlichen Verfahren für die Rückführung von Laser-Doppler-Anemometern im Hinblick auf ihre Verwendung als Bezugsnormale durchgeführt. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass eine Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse unabhängig von den betrachteten Vorgehensweisen zur Bestimmung der LDA-Kalibrierkonstante im Bereich von  $U = 0,2 \%$  gegeben ist. LDA-Kalibrierungen mit erweiterten Unsicherheiten von  $U < 0,1 \%$  sind zwar denkbar, erfordern jedoch eine Vereinheitlichung genau zu spezifizierender Verfahren.

Der von PTB und LNE-Cetiat (Frankreich) als Pilot-Laboratorien mit Unterstützung des INRiM (Italien) vorbereitete, erstmals auch mit einem Laser-Doppler-Anemometer als TransfERNormal ausgestattete CCM Key Comparison KC3 „Air Speed“ mit insgesamt zehn Teilnehmern aus vier regionalen Metrologieorganisationen (APMP, COOMET, EU-

RAMET, SIM) wurde im Sommer 2013 gestartet. Die Messungen der europäischen Teilnehmer konnten bereits weitestgehend abgeschlossen werden.

Im zurückliegenden Jahr wurden im „Transfer-Wind-LIDAR“-Projekt weitere Tests an neuentwickelten Teilkomponenten erfolgreich durchgeführt sowie die grundlegenden Anforderungen aus den verschiedenen Applikationsfeldern festgelegt. Der Einsatz des Systems zur Messung von Windgeschwindigkeiten soll nach der einschlägigen Norm IEC 61400-12-1 zunächst im ebenen Gelände und später im komplexen Terrain erfolgen. Vergleichsmessungen zur System-Verifikation wurden mit Partnern aus der Windenergiebranche erörtert und flossen sowohl in ein aktuell gestartetes MNPQ-Projekt als auch in ein mit führenden europäischen Windparkbetreibern beantragtes EMRP-Projekt ein.

In der Arbeitsgruppe *Gasmessgeräte* wurde ein Prüfstand zur Untersuchung von Gaszählern bei Gastemperaturen bis  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  in Betrieb genommen und dem PTB-Kuratorium vorgestellt (Bild 6). Im Rahmen der Validierung des Prüfstandes wurde die angestrebte Unsicherheit von  $U = 0,2 \%$  für den Gasdurchfluss am Prüfling erreicht. Laufende Untersuchungen konzentrieren sich insbesondere auf die optimale Temperaturerfassung im Gasstrom. Die im Rahmen des Verbundprojektes „MONA“ zur Untersuchung des Methanschlupfes bei Biogasanlagen mit Einspeisung in das Erdgasnetz konzipierte und gebaute mobile Messeinheit wurde an mehreren Biogasanlagen erstmals eingesetzt. Die nach konstruktiven Vorgaben der PTB hergestellte Ultraschall-Messvorrichtung für die Volumenstrombestimmung zeigte die erforderliche messtechnische Qualität und die erforderliche Flexibilität, um die unterschiedlichen Begebenheiten vor Ort berücksichtigen zu können. Die Übertragung der Mess-



Bild 6: Im Rahmen der Kuratoriumstagung 2013 wurde den Teilnehmern auch der neue Hochtemperatur-Gasdurchflussprüfstand vorgestellt

daten mittels Mobilfunktechnik ermöglicht eine ständige Fernüberwachung, sodass sich die Messkampagnen weitgehend automatisch durchführen lassen.

Die im Luftprüfstand zur Kalibrierung von Gaszählern bis 5600 m<sup>3</sup>/h im Staffelverfahren eingesetzten kritisch betriebenen Venturidüsen wurden nach fünf Jahren turnusmäßig rekali­briert. Im Ergebnis wurde eine sehr gute Übereinstimmung mit den Kalibrierwerten der letzten Kalibrierrunde erreicht und die gute Reproduzierbarkeit der Venturidüsen bestätigt. Für Durchflüsse unter  $Q = 0,6$  L/h wurde ein neues Normal auf Basis eines aktiv angetriebenen Doppelkolbens konzipiert, beschafft und erstmals erprobt. Die konstruktiven Merkmale des Normals gewährleisten eine Minimierung des Totvolumens und damit auch das Erreichen kleiner Werte für die Messunsicherheit.

Mit zunehmender Anzahl wurden Konformitätsbewertungen und Zulassungen für Gasmessgeräte vorwiegend für inländische Kunden durchgeführt. So wurde u. a. auch ein Gaszähler, der im Gewerbe- und Leichtindustriebereich in einem Gastemperaturbereich von  $-40$  °C bis  $70$  °C und damit im gesamten von der Europäischen Messgeräte­richtlinie MID vorgesehenen Temperaturbereich erstmalig konformitätsbewertet. Die Prüfungen wurden auf dem für diese Zwecke in Europa einzigartigen Prüfstand der Arbeitsgruppe durchgeführt.

Die Arbeitsgruppe *Hochdruck-Gas* war federführend bei der Eröffnung eines neuen Kapitels im Bereich der Darstellung und Weitergabe der Einheit für das Volumen von HD-Gas. Am 23. September 2013 unterzeichneten die Vertreter der metrologischen Institute aus Deutschland, Frankreich, den Niederlanden und Dänemark in Paris ein Memorandum of Understanding (MoU) zur Zusammenarbeit unter dem Namen „**E**uropean **R**eference for **G**as metering“ (EUREGA). Dieses MoU ersetzt den bisherigen Vertrag über die Harmonisierung des Kubikmeters für Hochdruck-Gas aus den Jahren 1999/2004. Der Vertragstext wurde in wesentlichen Teilen aktualisiert und den mittlerweile stark veränderten technischen sowie organisatorischen Randbedingungen der beteiligten Partner angepasst. Hervorzuheben ist auch, dass neue Partner – wie das FORCE aus Dänemark – in Erfüllung explizit genannter Randbedingungen dem MoU beitreten können.

Die Fortführung der Harmonisierung innerhalb der neuen EUREGA-Gruppe mit nunmehr vier

Partnern sichert auch weiterhin die messtechnische Basis für einen einheitlichen Referenzwert im ökonomisch wichtigen Bereich des internationalen Erdgashandels auf höchstem metrologischen Niveau. So wurde u. a. auch der Nachweis erbracht und auf der FLOMEKO 2013 vorgestellt, dass in den Jahren 2005 bis 2011 dieser Referenzwert mit einer hervorragenden Reproduzierbarkeit von  $0,11$  % weitergegeben werden konnte.

Für 2014 steht die nächste Bestimmung des harmonisierten Kubikmeters auf der Grundlage eines ausführlichen Ringvergleiches innerhalb der EUREGA-Gruppe auf der Tagesordnung, wofür bereits 2013 in den jeweiligen nationalen Rückführungsketten die technischen Voraussetzungen geschaffen und Rekalibrierungen durchgeführt wurden.

Der Fachbereich 1.5 *Flüssigkeiten* bearbeitet ein breites Aufgabenspektrum im Bereich der Mengen- und Durchflussmessung sowohl strömender wie auch ruhender Flüssigkeiten.

Für die Arbeitsgruppe *Rückführung Flüssigkeitsmessung* standen im vergangenen Jahr umfangreiche Arbeiten zur Vorbereitung und Durchführung internationaler Vergleichsmessungen im Mittelpunkt. So konnte der COOMET-Vergleich der Primärnormalprüfstände für Wasser im Durchflussbereich von  $0,5$  m<sup>3</sup>/h bis  $100$  m<sup>3</sup>/h endgültig mit der Erstellung des entsprechenden Draft-B-Berichtes abgeschlossen werden. Auch konnten die Vergleichsnormale des BIPM-Schlüsselvergleichs CCM.FF-K1, für den die PTB als Pilotlabor fungieren wird, im Rahmen eines bilateralen Vorvergleichs mit dem Primärnormal-Prüfstand des NEL in Glasgow bei Durchflüssen zwischen  $30$  m<sup>3</sup>/h bis  $220$  m<sup>3</sup>/h eingehend untersucht und für den Schlüsselvergleich qualifiziert werden.

Schwerpunkt der Arbeitsgruppe *Flüssigkeitsprüfstände* war die weitere Verbesserung der Messunsicherheit der Normalmessanlagen für Flüssigkeiten außer Wasser. Ein wesentliches Ergebnis umfangreicher Untersuchungen war, dass die erweiterten Messunsicherheiten von  $U = 0,05$  % für den Mineralölzählerprüfstand ( $0,6$  m<sup>3</sup>/h bis  $250$  m<sup>3</sup>/h) auch im dynamischen Betrieb mit sogenanntem fliegenden Start-Stopp und  $U = 0,1$  % für den Kleinstmengenprüfstand ( $0,1$  L/h bis  $300$  L/h) nachgewiesen werden konnten.

Das Tätigkeitsfeld der Arbeitsgruppe *Flüssigkeitsmessgeräte* liegt im Bereich der Zulassung und Zertifizierung von Flüssigkeitsmessgeräten im Rahmen

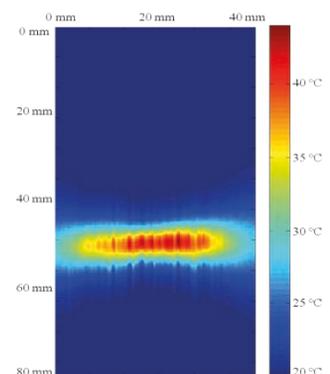
des Eichgesetzes und der aktiven Mitarbeit in den zugehörigen nationalen und internationalen Normungs- und Vorschriftengremien. Dringend erforderliche Verbesserungen in den existierenden Vorschriften des gesetzlichen Messwesens werden dabei auch durch entsprechende gemeinsame Forschungsaktivitäten mit Eichbehörden und der Industrie unterstützt. So konnten beispielsweise durch das Kooperationsvorhaben „Temperaturverteilung in großen Lagertanks“ erstmalig wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse für die Erarbeitung realistischer Verfahren zur Umwertung des in einem Tank befindlichen Flüssigkeitsvolumens auf die entsprechende Referenz- bzw. Verrechnungstemperatur gewonnen werden.

### 1.3 Akustik, Ultraschall und Beschleunigung

Im Themenbereich *Akustik, Ultraschall und Beschleunigung* werden von den Fachbereichen 1.6 *Schall*, 1.7 *Akustik und Dynamik* sowie 1.3 *Geschwindigkeit* metrologische Fragestellungen bearbeitet, die die Darstellung und Weitergabe akustischer und dynamischer, mechanischer Einheiten zum Inhalt haben. Ausgehend von Forderungen des Einheiten-, Eich- und Medizinproduktegesetzes werden vielfältige wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt, und es erfolgen zahlreiche für Gesellschaft und Wirtschaft wichtige Dienstleistungen mit höchster Genauigkeit und Verlässlichkeit.

Im Fachbereich 1.6 *Schall* wird ein sehr breites Spektrum an Fragestellungen zur akustischen Messtechnik, der Zulassung von Schallpegelmessern und -kalibratoren, dem Gehör und dem Ultraschall bearbeitet.

Bild 7: Ultraschalldiagnostikgerät (links), eingesetzt zur nicht-invasiven Temperaturmessung in einem Gewebephantom, in das von rechts therapeutischer Ultraschall eingekoppelt wird (Mitte), und gemessene Temperaturverteilung im Fokalbereich in Schallausbreitungsrichtung (rechts)



Die Arbeitsgruppe *Hörschall* liefert die Schalldruckeinheit Pascal als Basis für die Rückführbarkeit akustischer Messungen und unterstützt durch Gutachtertätigkeit die DAkkS bei der fachlichen Akkreditierung der für die Weitergabe der Einheit verantwortlichen Kalibrierlaboratorien. Im Rahmen des EMRP-Projekts „EARS“ werden in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich *Biosignale* Messungen zur Hirnaktivierung durch Infraschallsignale vorbereitet. Dazu wurden in der Arbeitsgruppe spezielle kalibrierbare, MRT-taugliche Infraschall-Generatoren entwickelt, getestet und bei Untersuchungen zur Wahrnehmbarkeitsschwelle von Infraschall bereits eingesetzt.

Um die Verständlichkeit von Lautsprecherdurchsagen im Sinne der Barrierefreiheit für Hörbehinderte zu verbessern, wird in der Arbeitsgruppe in einem Projekt der Innovationsförderung für den Mittelstand (ZIM) der Zusammenhang zwischen der technischen Übertragungsqualität von Beschallungsanlagen und dem tatsächlichen Sprachverstehen bestimmt.

Als Basis für die Metrologie des hochintensiven therapeutischen Ultraschalls (HITU), der zum Beispiel zur Tumorablation bereits klinisch eingesetzt wird, wurde in der Arbeitsgruppe *Ultraschall* ein Referenzschallquellensystem aufgebaut. Mithilfe einer Rückkopplungsregelung können langzeitstabil besonders genau definierte therapeutische Ultraschallfelder unterschiedlicher Leistung für Kalibrierzwecke erzeugt werden.

Im Rahmen des EMRP-Projektes „DUTy“ wurde in der Arbeitsgruppe eine nichtinvasive Methode zur Temperaturmessung in Gewebephantomen bei Beschallung mit therapeutischem Ultraschall realisiert. Ein modifiziertes diagnostisches Ultraschallgerät (Bild 7) liefert Echo-Rohdaten, aus denen mithilfe von speziell entwickelten Kreuzkorrelationsrech-

nungen Temperaturverteilungen im Innern des Gewebephantoms bestimmt werden. Die Technik soll zukünftig zur Dosisbestimmung, z. B. im Rahmen der Therapieplanung, und für die regelmäßige Kontrolle von klinischen therapeutischen Geräten eingesetzt werden.

In einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützten Projekt wurden mögliche Risiken bei der Phakoemulsifikation untersucht. Es konnte der Einfluss thermischer Effekte klar ausgeschlossen werden, woraus sich verschiedene Hinweise für die Operationsstrategien von Ärzten ergeben.

Die Arbeitsgruppe *Geräuschmesstechnik* baute im Rahmen des EMRP-Projekts „EARS“ neue Messplätze auf, die der Charakterisierung von Luftultraschall dienen und bisher in keinem Messlabor verfügbar sind. Für die messtechnische Erfassung der räumlichen Schallfeldverteilung von Schallquellen wurde ein System aufgebaut, mit dem dreidimensionale frequenzselektive Richtcharakteristiken für Quellen bis 100 kHz bestimmt werden können. Weiterhin wurde erstmalig ein Messplatz zur Kalibrierung von Mikrofonen im Ultraschallfrequenzbereich bis 100 kHz eingerichtet. Damit konnten erstmals rückgeführte Messungen der Ausgangsgrößen von Luftultraschallquellen durchgeführt werden.

Zum Fachbereich 1.7 *Akustik und Dynamik* gehören die Arbeitsgruppen *Darstellung Beschleunigung*, *Angewandte Akustik und Stoßdynamik*.

Schwerpunkt der Arbeiten der Arbeitsgruppe *Darstellung Beschleunigung* ist die Kalibrierung von Referenzbeschleunigungsaufnehmern für akkreditierte Laboratorien in Deutschland, aber auch für internationale Kunden und ausländische Metrologieinstitute.

Zur Realisierung von Primärkalibrierungen von Schwingungssensoren bei sehr tiefen Frequenzen hat die Arbeitsgruppe *Darstellung Beschleunigung* eine neue Kalibriereinrichtung aufgebaut (Bild 8). Der dazu als Schwingerreger dienende, luftgelagerte Linearantrieb ermöglicht einen Gesamtschwingweg von 1500 mm (bisher 1000 mm).

Damit sollen zukünftig Kalibrierungen bis herab zu 0,1 Hz mit ähnlich geringen Messunsicherheiten wie für höherfrequente Bereiche möglich sein. Solche tieffrequenten Schwingungen spielen in der Bauwerksüberwachung und bei der Auslegung und

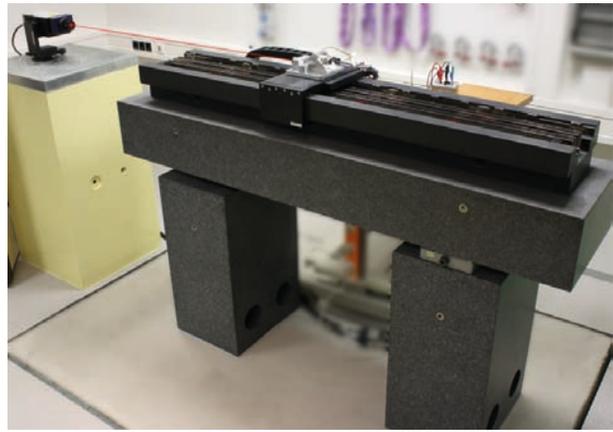


Bild 8: Ansicht der neuen Tiefstfrequenz-Beschleunigungs-Normalmesseinrichtung der PTB mit 1500 mm Schwingweg

Überwachung von Windkraftanlagen eine zunehmende Rolle.

Für die Messung der Beschleunigung mittels Laser-Doppler-Vibrometer kommt an der neuen Normalmesseinrichtung ein neuartiges Verfahren zum Einsatz, das es ermöglicht, die momentane Dopplerverschiebung des Laser-Messstrahls mittels Frequenzzähler bei Abtastraten von bis zu 50 kS/s zu bestimmen.

Ein Schwerpunkt der Aktivitäten der Arbeitsgruppe *Angewandte Akustik* war im letzten Jahr die Qualitätssicherung für bauakustische Prüfstellen. Dazu wurde innerhalb einer Kooperation mit dem Verband der Materialprüfungsanstalten (VMPA e.V.) und der Materialprüfanstalt für das Bauwesen der TU Braunschweig (MPA) ein neues Konzept für die ca. 90 VMPA-anerkannten Schallschutzprüfstellen entwickelt. Kern der Qualitätssicherung ist eine Vergleichsmessung an der MPA in Braunschweig, an der alle Prüfstellen innerhalb von drei Jahren teilnehmen müssen. Durchzuführen sind Luft- und Trittschalldämmungsmessungen sowie eine Installationsgeräuschmessung. Bei der Auswahl der Messaufgaben wurde großer Wert darauf gelegt, dass es sich um realistische Bausituationen handelt und dass neue Messverfahren enthalten sind. Dadurch hat die Veranstaltung auch den Charakter einer Weiterbildung. Die zulässigen Toleranzbereiche, in denen die Ergebnisse der Prüfstellen liegen sollten, wurden durch sechs unabhängige PTB-Messungen ermittelt. Die ersten 13 Prüfstellen haben die Messungen bereits absolviert, und es zeigte sich, dass das neue System der Qualitätssicherung auf große Akzeptanz bei den Prüfstellen stößt. Ein zusätzlicher Vorteil besteht darin, dass die PTB Zugang zu den Messdaten hat, sodass wertvolle Informationen

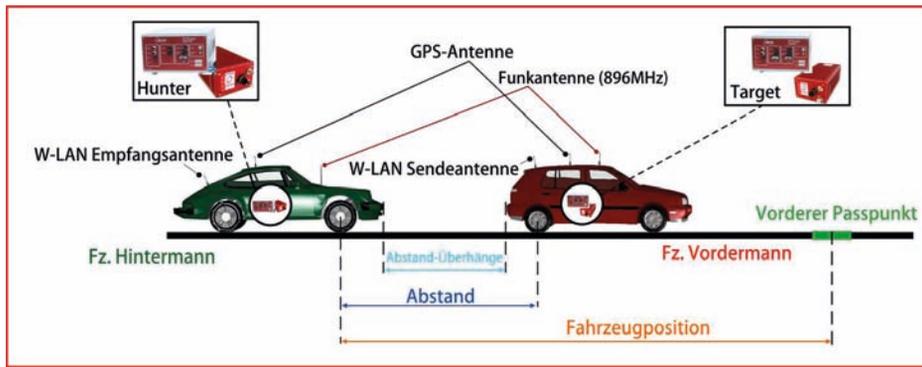


Bild 9a: Aufbau des Referenzsystems mit zwei DGPS-Inertialsystemen zur genauen Abstandsmessung zwischen zwei Versuchsfahrzeugen im laufenden Straßenverkehr

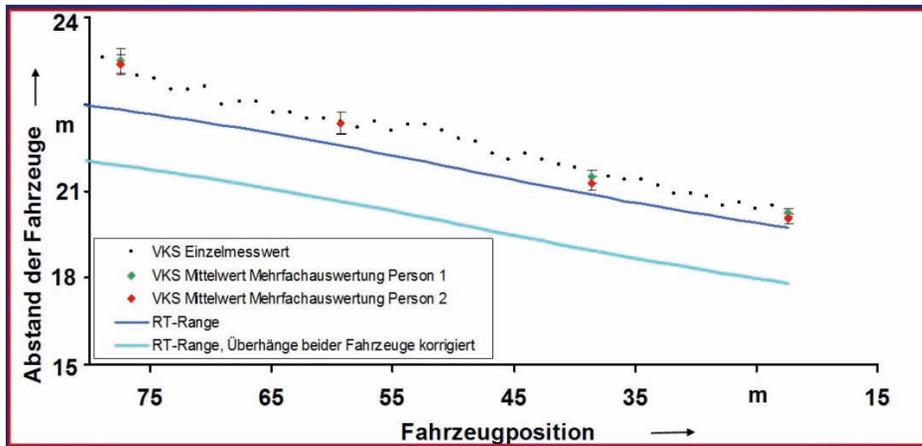


Bild 9b: Ergebnisse des Vergleichs der mit einem zugelassenen Verkehrs-Kontrollsystem (VKS) ermittelten Abstandswerte (oben, gepunktete Kurve) mit den vom DGPS-Inertialsystem gelieferten Referenzdaten (Mitte, durchgezogene Kurve); die untere Kurve zeigt die um den Überhang korrigierten, verkehrsrechtlich relevanten Abstandswerte.

über die bei realen Baumeasuren auftretenden Unsicherheiten gesammelt werden können.

Ein weiterer großer Erfolg des letzten Jahres war der Start eines europäischen Projekts zur Darstellung, Weitergabe und Anwendung der Einheit Watt im Luftschall. Dieses von der PTB initiierte und koordinierte Projekt wird erhebliche Auswirkungen auf die gesamte Messtechnik in der angewandten Akustik haben, da erstmalig eine Rückführbarkeit für die zentrale Messgröße Schalleistung möglich wird.

In der Arbeitsgruppe *Geschwindigkeitsmessgeräte* des Fachbereiches 1.3 *Geschwindigkeit* wurde die bestehende Bauartzulassung eines bereits seit vielen Jahren im Einsatz befindlichen Verkehrs-Kontrollsystems (VKS) erweitert, sodass jetzt auch videobasierte Geschwindigkeits- und Abstandsmessungen an besonderen Fahrbahnabschnitten, z. B. in kurvigen oder hügeligen Bereichen, erfolgen können. Darüber hinaus wurden im Rahmen einer Gemeinschaftskooperation mit zwei industriellen Partnern weitergehende Untersuchungen am VKS durchgeführt mit dem Ziel, die Richtigkeit amtlicher Abstandsmessungen unter Realbedingungen und mithilfe moderner Messverfahren zu bestätigen. Hierzu wurden umfangreiche Messreihen mit zwei speziell ausgestatteten Versuchsfahrzeugen im normalen Straßenverkehr durchgeführt, wobei die zeitabhängigen Positionen und damit der Abstand beider

Fahrzeuge mit hoher Auflösung mit zwei hochwertigen DGPS-Inertialsystemen registriert und ausgewertet wurden (Bild 9a). Die Referenzabstände beider Fahrzeuge wurden durch gezielte Abbrems- und Beschleunigungsmanöver variiert und konnten mit einer Messunsicherheit von 3 cm ermittelt werden. Im Ergebnis zeigte sich, dass das VKS den verkehrsrechtlich relevanten Fahrzeugabstand (= „Abstand-Überhänge“ im Bild 9a) im gesamten Messbereich stets großzügig zugunsten des Betroffenen ermittelt (Bild 9b).

Die Arbeitsgruppe *Dynamische Druckmessung* erteilt auf Antrag hin das „F im Fünfeck“  $\text{⬡F}$  für zivile Schusswaffen, die beispielsweise mit kalten Gasen oder Federdruck betrieben werden. Hauptprüfkriterium ist hierbei die kinetische Energieabgabe an die Geschosse, die 7,5 J nicht überschreiten darf, um erhebliche Verletzungen zu vermeiden. Werden diese und weitere Kriterien eingehalten, wird eine „Anzeigebescheinigung“ nach dem deutschen Beschussgesetz §9 Abs. 2 Nr.1 erteilt und die Waffen dürfen frei verwendet werden. Diese Prüfungen werden mit jeweils genau definierten Standardgeschossen durchgeführt, wobei neben der Geschossform auch deren Masse und Geschwindigkeit entscheidend sind (Bild 10 unten). Eine Untersuchung der Arbeitsgruppe *Dynamische Druckmessung* in enger Kooperation mit der Universitätsmedizin Greifswald ergab, dass mit einigen speziellen, aber

handelsüblichen Kunststoffmantelgeschossen für Druckluftwaffen (Bild 10 oben) deutlich höhere kinetische Energien als der oben genannte Grenzwert erzielt werden können, was die Gefahr von ernsthaften Verletzungen von Mensch und Tier birgt. Als Konsequenz wird zur Zeit geprüft, inwieweit die aktuellen technischen und gesetzlichen Vorgaben für zivil genutzte Waffen und Geschosse noch dem aktuellen Stand der Technik entsprechen.

Daneben ist die Arbeitsgruppe *Dynamische Druckmessung* u. a. für Serienprüfungen von pulverbetriebenen Viehbetäubungsapparaten (VBA) nach Maschinenrichtlinie 2006/42/EG zuständig, die ausschließlich den Arbeitsschutz für Viehbetäuber zum Ziel hat. Aufgrund medial thematisierter hoher Fehlbetäubungsraten solcher VBA zur Rinderschlachtung wird nun auch dem Tierschutz Rechnung getragen, insbesondere durch die neue Verordnung 1099/2009, die zum 1.1.2013 in Deutschland in Kraft trat. Die PTB unterstützt in diesem Zusammenhang laufende wissenschaftliche Forschungsprojekte, die eine weitere Verbesserung des Tierschutzes zum Ziel haben, durch Messungen der kinetischen Bolzenaufschlagsenergie von bestimmten Viehbetäuern. Fazit der Untersuchungen ist, dass die gleichzeitige Einhaltung von Arbeitsschutzanforderungen für das Schlachtpersonal und Tierschutzanforderungen eine Gratwanderung ist und nur gelingen kann, wenn alle wesentlichen Parameter wie Ansatzstelle, Schlagrichtung, Schlaggeschwindigkeit, Austrittslänge und Durchmesser des Bolzens in Abhängigkeit von der Tierart und -größe optimal definiert und in der Praxis eingehalten werden.

Aus arbeitsschutzrechtlichen Gründen wurde in diesem Jahr mit der Sanierung aller Schießkanäle und Prüfräume der Arbeitsgruppe begonnen, sodass bis zum Abschluss der Renovierungsarbeiten, der für August 2014 geplant ist, mit erheblichen Einschränkungen im Prüfbetrieb gerechnet werden muss.

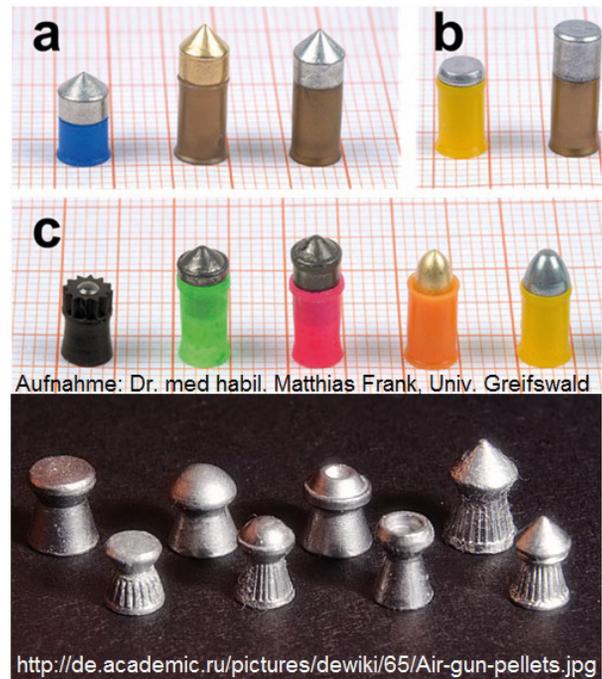


Bild 10: Handelsübliche Kunststoffmantelgeschosse für Druckluftwaffen (a, b, c, oben) im Vergleich zu Standardgeschossen, wie sie zur Energiemessung verwendet werden (unten).

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de))

### Grundlagen der Metrologie

#### Metrologische Bewertung der 1-N·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung abgeschlossen

In der Arbeitsgruppe *Drehmoment* wird seit einiger Zeit eine Drehmoment-Normalmesseinrichtung für statische Drehmomente mit einem Messbereich von 1 mN·m bis 1 N·m im Probetrieb eingesetzt. Die Untersuchung der metrologischen Eigenschaften dieser Anlage wurde jetzt abgeschlossen und ergab, dass die kleinste erreichbare Messunsicherheit im unteren Bereich bei 0,1 % (von 1 mN·m bis 10 mN·m) liegt und ansonsten 0,02 % bzw. sogar 0,01 % (von 0,1 N·m bis 1 N·m) erreicht werden. Wie erwartet, ergab die Lagerung des Hebels den dominierenden Einfluss bei den kleinsten Drehmomenten, im oberen Bereich war es – wie bei anderen Anlagen – die Hebelarmlänge. (D. Röske, FB 1.2, [dirk.roeske@ptb.de](mailto:dirk.roeske@ptb.de))

#### Gravimetrische Messungen zum Einfluss der Oxidbildung auf die Massestabilität von Siliziumkugeln

Erste Ergebnisse gravimetrischer Messungen des Oxidwachstums auf Siliziumkugeln bestätigen den theoretischen Verlauf und ermöglichen es, den Einfluss der Oxidbildung auf die Massestabilität von Siliziumkugeln abzuschätzen. (M. Borys, FB 1.1, [michael.borys@ptb.de](mailto:michael.borys@ptb.de))

#### Quantifizierung des dynamischen Verhaltens von Durchflussmessgeräten

Im Rahmen der Vorbereitung des internationalen BIPM-Schlüsselvergleichs CCM.FF-K1.2012 für den Durchfluss von Wasser, bei dem die PTB als Pilotlabor fungieren wird, wurde eine Reihe von Messgeräten bezüglich ihrer Eignung als Transfernormal untersucht. Dazu gehörten u. a. auch ein Coriolis-Durchflussmessgerät und eine Messturbinen, die insbesondere hinsichtlich ihres Verhaltens unter dynamischen Bedingungen, d. h. bei zeitlich schwankenden Durchflüssen, betrachtet wurden. Dabei konnte gezeigt werden, dass bei der in der Durchflussmessung üblicherweise praktizierten Signalerfassung und -auswertung von Frequenzsignalen (sowohl bei Impulzzählung als auch bei der Integration von Frequenzsignalen über die Messzeit) dynamische Effekte größtenteils unerkannt bleiben. In solchen Fällen fehlen entsprechende Beiträge zum Messunsicherheitsbudget, und mögliche systematische Einflüsse auf das Messergebnis wer-

den nicht berücksichtigt. (R. Engel, FB 1.5, [rainer.engel@ptb.de](mailto:rainer.engel@ptb.de))

#### Kalibriereinrichtung für Vorwärtsstreu-LDA-Systeme

Unter Nutzung gedruckter Streuteilchen auf den Seitenflächen eines rotierenden Glaszylinders können in Zukunft auch Vorwärtsstreu-LDAs wie z. B. Streustrahl-Referenzstrahlensysteme kalibriert werden. (V. Strunck, FB 1.4, [volker.strunck@ptb.de](mailto:volker.strunck@ptb.de))

#### Kleine Quellen, großer Lärm

Im Rahmen des EU-weiten EARS-Projekts ([www.ears-project.eu](http://www.ears-project.eu)), das im European Metrology Research Programme (EMRP) gefördert wird, wurden verschiedene Luftultraschallquellen untersucht, die im privaten und im Arbeitsumfeld häufig anzutreffen sind. Da im Projekt erstmalig eine Rückführung des Schalldrucks für Frequenzen jenseits des Hörbereichs etabliert wurde, konnten der Schalldruck bis 100 kHz metrologisch gesichert gemessen und verschiedene Beurteilungsgrößen quantitativ ermittelt werden. (C. Kling, FB 1.6, [christoph.kling@ptb.de](mailto:christoph.kling@ptb.de))

#### Forschungsprojekt zur Rückführbarkeit für die Messgröße Schalleistung gestartet

Im Juni 2013 begann ein europäisches Projekt zur Rückführbarkeit der Messgröße Schalleistung. Die wesentlichen Schwerpunkte sind der Darstellung und Weitergabe der Schalleistung sowie den Anwendungen in der Maschinenakustik gewidmet. Das Projekt hat eine Laufzeit von drei Jahren und wird von der PTB koordiniert. (V. Wittstock, FB 1.7, [volker.wittstock@ptb.de](mailto:volker.wittstock@ptb.de))

#### Reziprozitätskalibrierungen von Messmikrofonen im Diffusfeld

Messmikrofone werden mit der Reziprozitätstechnik primär kalibriert. Dabei werden die Mikrofone sowohl als Sender als auch als Empfänger eingesetzt. Das Verhältnis zwischen akustischen und elektrischen Kenngrößen ist in beide Richtungen identisch. Das Übertragungsmaß von Mikrofonen kann daher ermittelt werden, indem der Eingangsstrom in das sendende Mikrofon und die Ausgangsspannung aus dem empfangenden Mikrofon gemessen wird. In der PTB ist es gelungen, Primärkalibrierungen von Diffusfeldmikrofonen in einem Modellhallraum durchzuführen. (V. Wittstock, FB 1.7, [volker.wittstock@ptb.de](mailto:volker.wittstock@ptb.de))

### **Untersuchung des dynamischen Verhaltens der 250-kN-Kraftstoß-Normalmesseinrichtung**

Zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens einer 250-kN-Kraftstoß-Normalmesseinrichtung wurden experimentelle Messungen mit montiertem Kraftaufnehmer durchgeführt und die stärksten Eigenschwingungen identifiziert. Für das Beispiel eines 25 kg schweren Aufnehmers wurde das beobachtete Schwingverhalten mittels Finite-Elemente-Modellierung bestätigt. Weitere Experimente belegen, dass die Koppelresonanz des montierten Kraftaufnehmers stark von der mechanischen Adaption und den Anziehdrehmomenten abhängt. (M. Kobusch, FB 1.7, michael.kobusch@ptb.de)

### **Prüfung exponentieller Sweep-Signale mithilfe der Hilbert-Transformation**

Die Norm IEC 61260 empfiehlt als Prüfsignal zur Echtzeitprüfung von Filterbänken konstanter relativer Bandbreite die Verwendung eines Sweep-Signals mit exponentiell steigender Frequenz. Das hier vorgestellte Verfahren erlaubt die Prüfung solcher Testsignale und kann z. B. einen linearisierten Frequenzanstieg erkennen. Solch fehlerhafte Prüfsignale führen zur Fehlbewertung echtzeitfähiger Filter. (I. Bork, FB 1.6, ingolf.bork@ptb.de)

### **Wärmetransport in fluidgefüllten Mikroporen**

Im Jahre 1960 entdeckten die beiden US-Amerikaner Woodside und Messmer, dass ein mit Gas in seinen Poren gesättigter Sandstein die Wärme schlechter transportiert als derselbe mit einer Flüssigkeit gesättigte Stein, selbst wenn beide Füllfluide die gleiche Wärmeleitfähigkeit besitzen. Bisher war man der Ansicht, dass der Knudsen-Effekt dieses Phänomen verursacht. Er tritt auf in Poren, die kleiner sind als die freie Weglänge der Gasmoleküle. Eigene Messungen an Sandstein bestätigten zwar den Woodside-Messmer-Effekt, ließen jedoch Zweifel an seiner bisherigen Deutung aufkommen. Im Rahmen der kinetischen Gastheorie wurde eine neue Hypothese aufgestellt und erfolgreich an Glassieben anstelle von Sandsteinen experimentell validiert. Hierbei fand sich sogar ein bisher noch unbekannter weiterer Wärmetransporteffekt. (U. Hammerschmidt, Abt. 1, ulf.hammerschmidt@ptb.de)

### **Monte-Carlo-Simulationen der Suszeptometermethode zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Gewichtstücken**

Mit einem Suszeptometer lassen sich sowohl die magnetische Volumensuszeptibilität als auch die vertikale Komponente der permanenten magnetischen Polarisation eines Gewichtstücks prüfen. Um im Rahmen von Vergleichsmessungen und Ringver-

gleichen die erweiterten Messunsicherheiten der magnetischen Eigenschaften angeben zu können, wurden Monte-Carlo-Simulationen der Suszeptometermethode durchgeführt. (F. Scholz, FB1.1, frank.scholz@ptb.de)

## **Metrologie für die Wirtschaft**

### **Neuentwickelte mobile Messanlage für Methanschlupf an Biogasaufbereitungsanlagen erfolgreich in Dienst gestellt**

Im Rahmen des Verbundvorhabens „Monitoring des Biomethanaufbereitungsprozesses“ (MONA) wurde eine mobile Messanlage für die Durchfluss- und Methankonzentrationsbestimmung des Abgasstroms von Biogasaufbereitungsanlagen konzipiert, gebaut und erfolgreich in Betrieb genommen. (H.-B. Böckler, FB 1.4, hans-benjamin.boeckler@ptb.de)

### **Hochtemperatur-Gasdurchflussprüfstand erfolgreich in Betrieb genommen**

Die PTB hat einen Hochtemperatur-Gasdurchflussprüfstand ( $T_{\max} = 600 \text{ °C}$ ) für die Prüfung, Kalibrierung und Untersuchung von Gasdurchflussmessgeräten erfolgreich in Betrieb genommen und dem PTB-Kuratorium auf dessen diesjähriger Tagung vorgestellt. (R. Kramer, FB 1.4, rainer.kramer@ptb.de)

### **Ein Sensor zur Bestimmung der Effektivität von Ultraschallreinigungsgärten**

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Ultraschallreinigungsbädern werden je nach Hersteller unterschiedliche Messverfahren genutzt, die meist nur indirekt mit der Reinigungsqualität im Zusammenhang stehen und von erfahrenen Experten ausgewertet werden müssen. In der PTB wurde ein Sensor entwickelt, mit dem objektiv der Partikelabtrag von der Sonden-Oberfläche bestimmt, und damit eine Reinigungswirkung gemessen werden kann. (M. Jüschke, FB 1.6, matthias.jueschke@ptb.de)

### **Wärmetransport von fluidgesättigtem Sander Sandstein**

Sandsteine werden nicht mehr nur zur Restaurierung von Gebäuden (z. B. Reichstag) verwendet, sondern auch wieder für Neubauten, gelten sie doch als natürliches Baumaterial. Aufgrund seiner porösen Struktur leitet der mit Luft gesättigte Sandstein die Wärme relativ schlecht, was Heizenergie einsparen lässt. Doch obwohl Sandstein seit Jahrhunderten benutzt wird, kennt man seinen Wärmetransport nur unzureichend. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen haben zu einem einfachen, aber präzisen

Modell für die Wärmeleitung von Sandstein und anderen porösen Werkstoffen geführt. (U. Hammerschmidt, Abt. 1, ulf.hammerschmidt@ptb.de)

### **Vorschläge für die Überarbeitung der Norm für die Kalibrierung von Drehmomentschlüsseln**

Für die Kalibrierung von handbetätigten Drehmomentschraubwerkzeugen (unter anderem Drehmomentschlüsseln) wird die DIN/EN/ISO 6789 verwendet, die aber einige Schwächen hinsichtlich der untersuchten Einflussfaktoren hat. Eine Messunsicherheitsberechnung fehlt gänzlich. Für die derzeit laufende Überarbeitung hat die PTB zusammen mit dem DKD Vorschläge veröffentlicht. (D. Röske, FB 1.2, dirk.roeske@ptb.de)

### **Bauteilkatalog „Skelettbau“ der DIN 4109 „Schallschutz im Hochbau“ überarbeitet**

Im Rahmen der europäischen Harmonisierung wird zurzeit die Norm DIN 4109 „Schallschutz im Hochbau“ grundlegend überarbeitet. Diese Norm enthält auch einen bauaufsichtlich eingeführten Bauteilkatalog, der für gängige Bauweisen und Bauteile Schalldämmwerte aufführt, die ohne individuelle Prüfung zum Nachweis ausreichenden Schallschutzes verwendet werden dürfen. Ein von der PTB koordiniertes Forschungsprojekt wurde mit einem Vorschlag zur Überarbeitung des DIN 4109 Bauteilkatalogs zur Skelettbauweise erfolgreich abgeschlossen. (H. Bietz, FB 1.7, heinrich.bietz@ptb.de)

## **Metrologie für die Gesellschaft**

### **Untersuchungen der Effektivität von pulverbetriebenen Viehbetäubungsapparaten im Hinblick auf den Tier- und Arbeitsschutz**

In Zusammenarbeit mit dem Max-Rubner-Institut (MRI) in Kulmbach hat die PTB eine Untersuchung zur Effektivität von Viehbetäubungsapparaten durchgeführt. Die Untersuchungen sind vom MRI angestoßen worden, wobei die PTB als technischer Partner bei den Geschwindigkeitsmessungen von Betäubungsbolzen half. Bestimmt wurde die Auftreffenergie der Bolzen, welche neben der Ansatzstelle, Schlagrichtung sowie Austrittslänge und Durchmesser des Bolzens je nach Tiergröße und -art nur ein Kriterium für eine humane Tierbetäubung darstellt. Aufgrund der hohen Fehlbetäubungsraten bei Rindern besteht dringender Handlungsbedarf, die Gründe für mangelnden Tierschutz aufzudecken. Die Verordnung VO (EG) Nr. 1099/2009 ist seit dem 1. Januar 2013 in Kraft und ist zum Schutz von Tieren zum Zeitpunkt der Tötung anzuwenden. Nun sind die Hersteller der Betäubungsapparate nach Artikel 8 aufgefordert, eine möglichst genaue

Mindestaufschlagsenergie, je nach Kartuschenstärke, für jede Tierart vorzugeben. Dabei wäre nicht nur der Energieinhalt der Treibkartuschen relevant, sondern auch die Effektivität bzw. der Wirkungsgrad der eingesetzten Schlachtapparate. Für die Festlegung von Grenzwerten wird die Zusammenarbeit mit dem MRI zum Tierschutz weiter fortgesetzt. (H. C. Schönekeß, FB 1.3, holger.schoenekess@ptb.de)

### **Überarbeitung des WELMEC Leitfadens 2.4 für Wägezellen**

Vertreter des VDMA, der deutschen Waagenindustrie sowie von Produzenten von Wägezellen diskutierten im Juni 2013 gemeinsam mit PTB-Vertretern einen Vorschlag zur Überarbeitung des WELMEC Leitfadens 2.4 „Wägezellen“. (O. Mack, FB 1.1, oliver.mack@ptb.de)

### **Anerkennung von Herstellerprüfergebnissen in OIML-MAA-Zertifikaten**

Im September 2013 fand eine Begutachtung zur Anerkennung von Herstellerprüflaboratorien im Rahmen der OIML-Vereinbarung zur gegenseitigen Anerkennung von Zertifikaten (OIML MAA) auf dem Gebiet der nichtselbsttätigen Waagen statt. (D. Knopf, FB 1.1, dorothea.knopf@ptb.de)

### **Quantitative Fehleranalyse bei videobasierten VKS-Abstandsmessungen mit Präzisions-GPS-Inertialsystem bestätigt korrekte Funktionsweise eindrucksvoll**

Zur videobasierten Abstands- und Geschwindigkeitsmessung von Kraftfahrzeugen kommen von der PTB zugelassene Verkehrs-Kontrollsysteme (VKS) der Firma VIDIT zum Einsatz. Im Rahmen einer Gemeinschaftskooperation mit der Firma VIDIT und der Firma DTC GmbH wurden weitergehende Untersuchungen am VKS zur Stärkung des Vertrauens in amtliche Messungen durchgeführt. Zur Quantifizierung der Messabweichung unter Realbedingungen absolvierten zwei mit speziellen DGPS-Inertialsystemen ausgestattete Versuchsfahrzeuge Fahrmanöver mit Abbrems- und Beschleunigungsphasen. Die Vergleichsmessungen bestätigen eindrucksvoll, dass die VKS-Abstandswerte unter allen Umständen stets großzügig zu Gunsten des Betroffenen ausfallen. (F. Märtens, FB 1.3, frank.maertens@ptb.de)

### **Aktuelle Untersuchungsergebnisse zur Temperaturverteilung in großen Lagertanks**

Mit einem zweitägigen Seminar konnte eine sehr erfolgreiche und effektive Zusammenarbeit zwischen wichtigen, auf dem Gebiet der Flüssigkeitsmessung mittels Lagertanks tätigen Partnern – PTB, Eichbe-

hörden, Messgeräteherstellern, Tanklagerbetreibern und Hochschulen – abgeschlossen werden. Rund 70 Teilnehmer aus 10 Ländern diskutierten über die aktuellen Ergebnisse aus umfangreichen experimentellen Untersuchungen und interessanten mathematischen Simulationen. Einer der Schwerpunkte war dabei die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in das nationale und internationale Regelwerk, insbesondere auch unter den speziellen Gesichtspunkten des gesetzlichen Messwesens. (R. Jost, FB 1.6, [ruediger.jost@ptb.de](mailto:ruediger.jost@ptb.de))

### **Dämpfung akustischer Raummoden durch abstimmbare Helmholtz-Resonatoren**

Die Schallübertragung in kleinen Räumen kann bei tiefen Frequenzen durch Raumresonanzen (Moden) erheblich gestört werden. Mit Helmholtz-Resonatoren, die sowohl in der Resonanzfrequenz als auch in ihrer Dämpfung fein abgestimmt werden können, lassen sich Probleme des Frequenzgangs, störender monofrequenter Geräusche sowie des Ein- und Ausschwingverhaltens deutlich hörbar vermindern. (I. Bork, FB 1.6, [ingolf.bork@ptb.de](mailto:ingolf.bork@ptb.de))

### **Internationale Angelegenheiten**

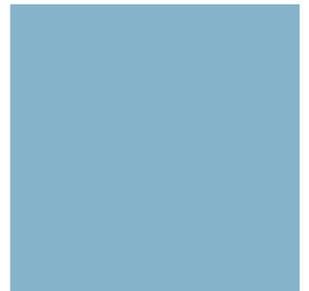
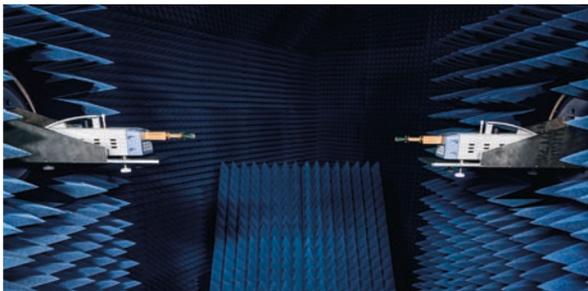
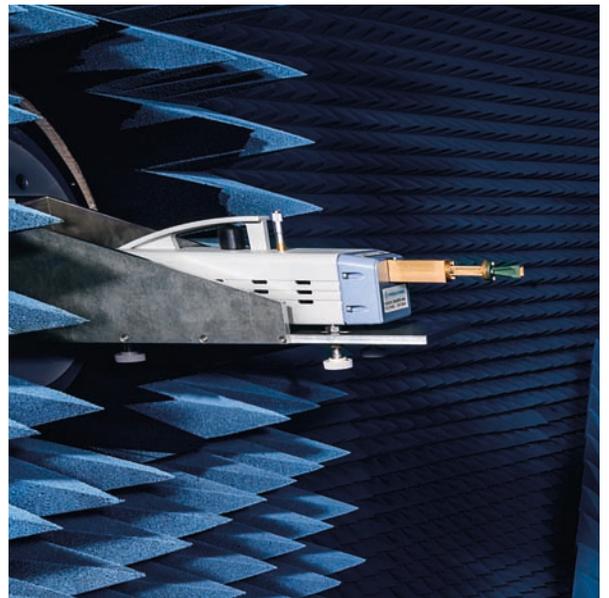
#### **Europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Messung sehr großer Kräfte bis 50 MN**

Im Juli 2013 startete das im Rahmen des EMRP finanziell geförderte Forschungsprojekt SIB63 „Force traceability within the meganewton range“, das vom Fachbereich 1.2 *Festkörpermechanik* koordiniert wird. Beteiligt sind zehn führende europäische Metrologieinstitute, die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), verschiedene europäische Hersteller sowie industrielle Anwender, die auf dem Gebiet der Messung großer Kräfte zusammenarbeiten. Die Teilnehmer trafen sich zum Kick-Off-Meeting am 4. und 5. September 2013 in der PTB. (R. Kumme, FB 1.2, [rolf.kumme@ptb.de](mailto:rolf.kumme@ptb.de))

#### **COOMET-Vergleich der Durchfluss-Primärnormale für Wasser erfolgreich abgeschlossen**

Als Teilnehmer des ersten BIPM-Schlüsselvergleichs CCM.FF-K1 für den Durchfluss von Wasser, der im Jahr 2007 abgeschlossen worden war, hatte die PTB die Rolle des Pilotlabors für den sich daran anschließenden regionalen Vergleich im Rahmen von COOMET übernommen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs, der den Durchflussbereich von 0,5 m<sup>3</sup>/h bis 100 m<sup>3</sup>/h umfasste, bestätigten für alle sieben beteiligten Länder die jeweils angegebenen Messmöglichkeiten mit den zugehörigen Messunsicherheiten. (G. Wendt, FB 1.5, [gudrun.wendt@ptb.de](mailto:gudrun.wendt@ptb.de))

# Abteilung 2 Elektrizität



Die Abteilung Elektrizität bearbeitet alle Aspekte des Themenbereichs *Elektrizität und Magnetismus* und sorgt mit ihren Arbeiten für die Einheitlichkeit, Verlässlichkeit und für den Fortschritt des Messwesens im Bereich Elektrizität. Die Arbeiten umfassen die Untersuchung fundamentaler Prozesse in Festkörper-Nanoschaltungen mit Potenzial für Anwendungen in der Metrologie, die Entwicklung von Herstellungsverfahren für elektrische Quantennormale, die Entwicklung von Primär- und Transfornormalen für die elektrischen Einheiten, Kalibrier- und Prüfdienstleistungen, Beratung, Mitarbeit in Normungs- und sonstigen Gremien sowie Technologietransferaktivitäten zur Unterstützung der deutschen Wirtschaft. Zur Bearbeitung dieses umfangreichen Aufgabenkatalogs ist die Abteilung organisatorisch in die sechs Fachbereiche *Gleichstrom und Niederfrequenz, Hochfrequenz und Felder, Elektrische Energiemesstechnik, Quantenelektronik, Halbleiterphysik und Magnetismus* sowie *Elektrische Quantenmetrologie* gegliedert. Teilweise über Fachbereichsgrenzen hinweg wurden die fünf Schwerpunktthemen *Grundlagen der elektrischen Metrologie, Aufbau von Quanten- und klassischen Skalen für elektrische und magnetische Einheiten, Elektrische Energiemesstechnik, Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie* sowie *Metrologie für magnetische Nanostrukturen* als mittelfristig wichtigste Arbeitsfelder identifiziert.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu den Schwerpunktthemen werden in vielen Fällen in enger Kooperation mit anderen nationalen metrologischen Instituten im Rahmen des von der EU geförderten European Metrology Research Programme (EMRP) durchgeführt. Im Berichtszeitraum sind sieben EMRP-Projekte gestartet, an denen die Abteilung Elektrizität mit maßgeblichen Arbeitspaketen beteiligt ist. Vier dieser sieben europäischen Projekte werden von Mitarbeitern der Abteilung koordiniert. Die Vernetzung mit anderen europäischen Instituten wird auf lokaler Ebene durch eine zunehmend enger werdende Kooperation mit der Technischen Universität (TU) Braunschweig ergänzt. Die Abteilung Elektrizität ist strategischer Partner des im Berichtszeitraum bewilligten Forschungsbaus „Laboratory for Emerging Nanometrology“

Titelbild:

Antennenscanner in der Absorberhalle der PTB, die Messungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder ohne Störungen durch reflektierte Wellen erlaubt. Der Aufbau dient zur Antennenkalibrierung im Rahmen der Darstellung und Weitergabe der elektrischen Feldstärke bei Frequenzen oberhalb von 1 GHz und zur Messung der Abstrahlcharakteristik von Antennen der Hochfrequenztechnik.

(LENA) der TU Braunschweig. Die Ausstattung des Forschungsbaus LENA soll die in der Abteilung vorhandene Fertigungstechnologie für Nanostrukturen und die Präzisionsmesstechnik für deren elektrische und magnetische Charakterisierung durch strukturelle und materialanalytische Charakterisierungsmethoden ergänzen. Die Abteilung erhofft sich von LENA eine Intensivierung der Zusammenarbeit mit der TU Braunschweig in der Forschung und bei der Nachwuchsförderung.

Auch der Dienstleistungsbereich wurde im Berichtsjahr gezielt weiterentwickelt. Der überwiegende Teil der angebotenen Kalibrierdienstleistungen kann mit Verweis auf das „Mutual Recognition Arrangement“ der Meterkonvention (CIPM MRA) erbracht werden, wodurch die internationale Anerkennung der Kalibrierungen gewährleistet wird. Der Verweis auf das CIPM MRA beruht auf sorgfältig überprüften „Calibration and Measurement Capabilities“ (CMC), die in einer Datenbank der Meterkonvention aufgelistet sind. Kunden können sich anhand der Datenbank über Umfang und Qualität des Kalibrierangebots informieren. Im Berichtsjahr hat die Abteilung ihre Liste der CMCs deutlich übersichtlicher gestaltet, um den Kunden die Orientierung zu erleichtern.

Die internationale Vergleichbarkeit von Messungen wird durch Messvergleiche zwischen den nationalen metrologischen Instituten überprüft und sichergestellt. Diese Messkampagnen sind sehr aufwendig. Um bei effizientem Ressourceneinsatz die internationale Vergleichbarkeit von Messungen im Bereich Elektrizität und Magnetismus zu gewährleisten, hat das zuständige Komitee der Meterkonvention (das Consultative Committee for Electricity and Magnetism, CCEM) eine sich über zehn Jahre erstreckende Planung für die Organisation der Vergleiche ausgearbeitet. Die Abteilung hat diese Planung aktiv mitgestaltet und wird zur Umsetzung ihren Beitrag leisten.

Nach diesem allgemeinen Überblick wird im Folgenden über die im Jahr 2013 erzielten Fortschritte in den fünf Schwerpunktgebieten berichtet.

### Grundlagen der elektrischen Metrologie

Die Arbeiten im Schwerpunkt Grundlagen werden durch die von der Meterkonvention geplante Neudefinition des Ampere basierend auf der Festlegung des Wertes der Elementarladung geprägt. Zur direkten Umsetzung der neuen Definition sind Einzelelektronen-Stromquellen erforderlich.

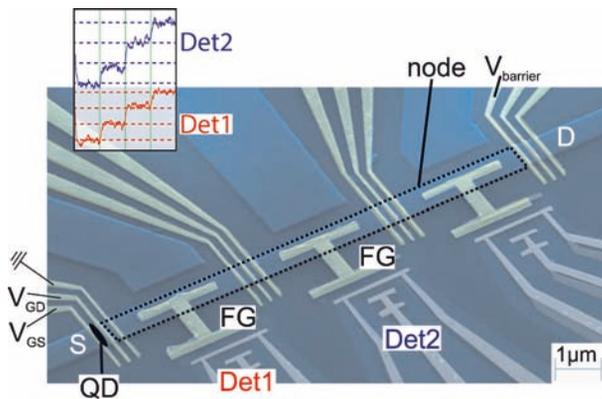


Abbildung 1: Elektronen-Mikroskopie-Aufnahme einer Schaltung mit einer Einzelelektronen-Stromquelle (QD), einer angeschlossenen Ladunginsel (Node) und zwei Einzelelektronen-Detektoren (Det1, Det2). Inset: Signale der zwei Detektoren, aufgenommen während des Transports einzelner Elektronen auf die Ladunginsel. Jede Stufe repräsentiert ein detektiertes Elektron.

Die Abteilung arbeitet intensiv an der Entwicklung solcher Quanten-Stromquellen auf der Basis von Halbleiterstrukturen, in denen mit einer vorgegebenen Frequenz einzelne Elektronen durch einen Leitungskanal transportiert werden. Bei diesem Prozess spielen stochastische quantenmechanische Tunnelprozesse eine Rolle, die die Präzision des quantisierten Stromes begrenzen. Zur Erhöhung der Präzision werden daher die Einzelelektronen-Stromquellen mit Einzelelektronen-Detektoren auf einem Chip integriert (Abbildung 1). Mit den Detektoren lässt sich der Einzelladungstransport überwachen, und mit den dabei gewonnenen Messdaten kann ein genauerer Wert für die Größe des quantisierten Stromes bestimmt werden. Dieses Konzept einer in-situ validierten oder selbstreferenzierten Quanten-Stromquelle wurde an der PTB entwickelt. Im Berichtsjahr hat die PTB beschlossen, die Umsetzung dieses Konzepts mit höchster Priorität als Leuchtturmprojekt zu verfolgen. Dazu werden der Abteilung Elektrizität zusätzliche Ressourcen zur Verfügung gestellt, die dazu dienen sollen, die bis-

her benutzten schmalbandigen Einzelelektronen-Detektoren durch breitbandige Einzelelektronen-Detektoren (RF-SET-Detektoren) zu ersetzen. Die Erhöhung der Detektionsbandbreite bietet das Potenzial, quantisierte Ströme von 100 pA und mehr mit verringerter Unsicherheit (kleiner als 0,1 μA/A) zu erzeugen.

Einzelelektronen-Stromquellen erzeugen Ströme mit Stromstärken bis zu einem Nanoampere. Für einige Anwendungen müssen diese Ströme mit Quantengenauigkeit verstärkt werden. Dazu wurde in Zusammenarbeit mit der Abteilung 7 der PTB ein neuartiges Konzept entwickelt, in dem der Strom mithilfe einer elektronischen Schaltung aus Operationsverstärkern und Widerstandsnetzwerken verstärkt wird. Ein Prototyp dieses Stromverstärkers mit einem Verstärkungsfaktor von 1000 wurde bereits hergestellt und erfolgreich getestet. Die zurzeit entwickelte verbesserte Version soll eine Gesamtunsicherheit von 0,1 μA/A bei einem Eingangsstrom von 100 pA erreichen.

Die Funktion von Einzelelektronen-Schaltungen kann durch die Absorption von Mikrowellen-Photonen beeinträchtigt werden. Daher hat sich das im Berichtsjahr angelaufene EMRP-Projekt „Microphoton“ zum Ziel gesetzt, den Mikrowellenhintergrund in der kryogenen Umgebung von Einzelelektronen-Schaltungen mit einer Auflösung auf Einzelphotonenniveau zu charakterisieren. Darauf aufbauend sollen Methoden zur Unterdrückung von Mikrowellen-Photon-Anregung entwickelt werden. In dem Projekt werden neben Emittlern insbesondere auch Detektoren für einzelne Mikrowellen-Photonen untersucht. Einige Detektionskonzepte nutzen Coulomb-Blockade-Schaltungen, zu deren Realisierung hochohmige Dünnschichtwiderstände benötigt werden. Im Berichtsjahr wurden daher Mikrostreifenwiderstände aus oxidiertem Titan gefertigt und untersucht (Abbildung 2). Es konnte

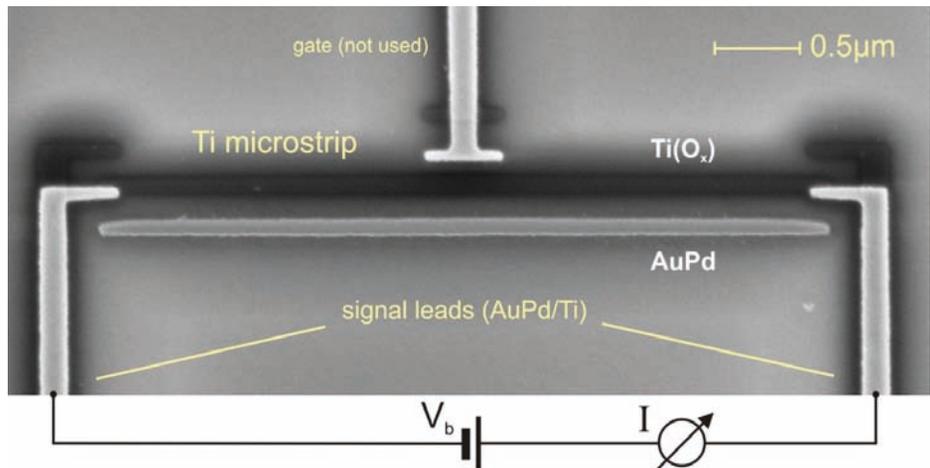


Abbildung 2: Elektronen-Mikroskopie-Aufnahme einer Schaltung zur Untersuchung des Mikrostreifenwiderstandes einer Schicht aus Titan mit einer Dicke von 10 nm.

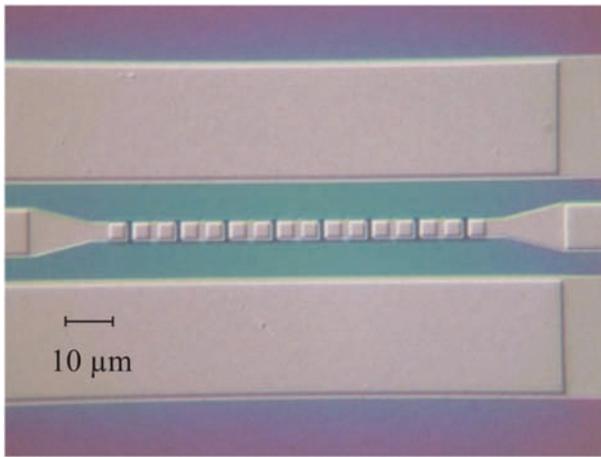


Abbildung 3: Mikrowellenresonator mit einer integrierten Serienschaltung von 16 Josephson-Kontakten mit Abmessungen von  $2,5 \mu\text{m} \times 2,5 \text{mm}$

gezeigt werden, dass Widerstände auf der Basis von Titan insbesondere bei hohen Frequenzen im Bereich von 100 GHz bessere Eigenschaften aufweisen als die bisher verwendeten Chrom-Widerstände.

Die Detektion äußerst kleiner Signale wird in der elektrischen Quantenmetrologie zunehmend wichtiger. Eine hohe Empfindlichkeit kann mithilfe des in nichtlinearen Mikrowellen-Resonanzschaltungen auftretenden Bifurkationseffekts erreicht werden. Zur Realisierung dieses Konzepts wurden supraleitende koplanare Wellenleiter-Resonatoren aus Niob mit integrierten Serienschaltungen aus  $\text{Nb}/\text{AlO}_x/\text{Nb}$  Josephson-Kontakten hergestellt (Abbildung 3). Der Bifurkationseffekt konnte bei einer Temperatur von 4,2 K demonstriert werden. Diese Technologie soll

auch in dem EMRP-Projekt „Microphoton“ eingesetzt werden.

## Aufbau von Quanten- und klassischen Einheitskalen

Die Arbeiten der Abteilung im Schwerpunkt Skalen haben zum Ziel, die elektrischen und magnetischen Einheiten effizient und kostengünstig darzustellen und weiterzugeben. Dabei werden die Werte- und Frequenzbereiche, den Wünschen der Kunden Rechnung tragend, beständig erweitert. Für die Vereinfachung der Widerstandsmetrologie bietet das erst vor wenigen Jahren entdeckte Material Graphen ein großes Potenzial. Graphen ist ein einlagiges Netzwerk aus Kohlenstoffatomen, das den Quanten-Hall-Effekt bei höheren Temperaturen und niedrigeren Magnetfeldern zeigt als die zurzeit für Quanten-Hall-Widerstände verwendeten Ga/Al-Arsenid-Strukturen. Die Forschung der letzten Jahre hat ergeben, dass aus SiC hergestelltes Graphen für metrologische Anwendungen am geeignetsten ist. Daher wurde im Reinraumzentrum der PTB eine Apparatur zur Herstellung von Graphen aus SiC aufgebaut (Abbildung 4). In dieser Apparatur werden die oberen Atomlagen eines SiC-Substrates bei sehr hohen Temperaturen von über  $1600 \text{ }^\circ\text{C}$  aufgebrochen, sodass sich Graphen auf dem SiC-Substrat bilden kann. Mithilfe der Raman-Spektroskopie konnte gezeigt werden, dass es sich bereits bei den ersten hergestellten Kohlenstofffilmen tatsächlich um Graphen handelte. Zurzeit wird an der Optimierung der Graphenschichten, insbesondere an der Kontrolle der Elektronendichte, gearbeitet.

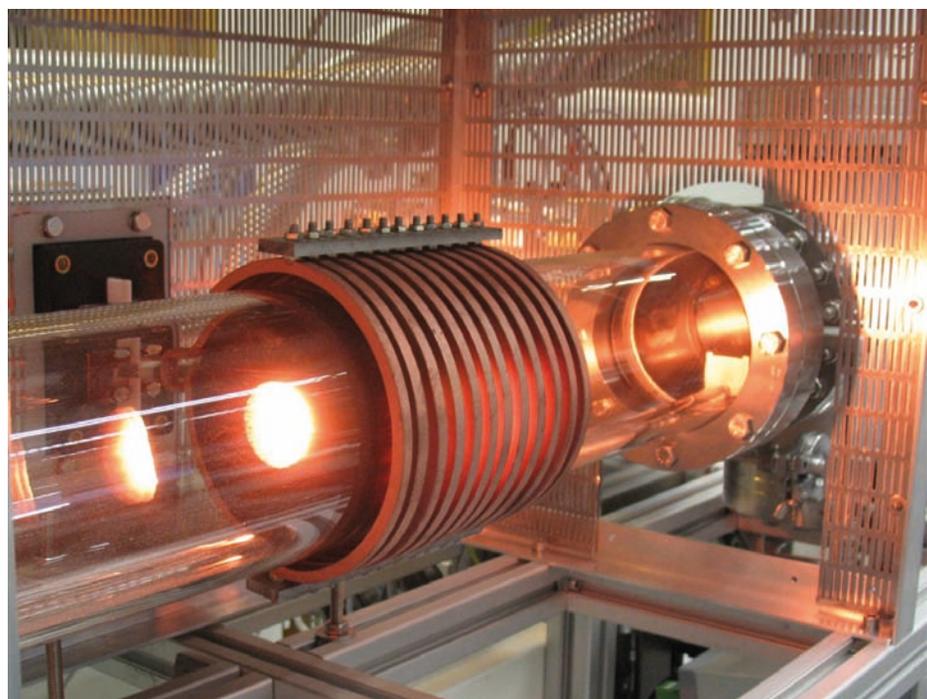


Abbildung 4: Apparatur zur Herstellung von Graphen aus SiC. In dem weißglühenden Hohlraum befindet sich das SiC-Substrat in einem Graphitschiffchen (nicht sichtbar), das induktiv mittels der außenliegenden Kupferspule auf  $1600 \text{ }^\circ\text{C}$  geheizt wird.

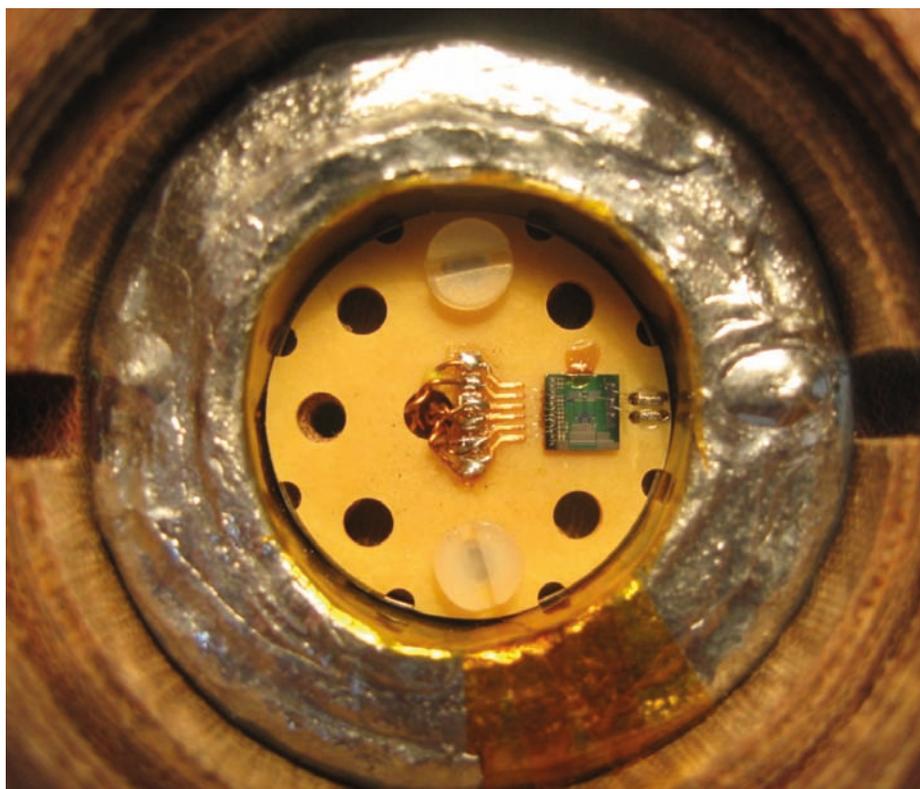


Abbildung 5: Mit Blei ummantelter Torus des Kryostromkomparators (Außendurchmesser ca. 33 mm) und SQUID-Magnetfeldsensor (Chipgröße ca.  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ )

Zum Aufbau der Widerstandsskala dienen Kryostromgeneratoren, mit denen sich Widerstandsverhältnisse mit höchster Präzision bestimmen lassen. Im Berichtsjahr wurde ein 14-Bit-Kryostromkomparator mit insgesamt 17 252 Windungen aufgebaut und erfolgreich für erste Vergleichsmessungen eingesetzt (Abbildung 5). Damit lassen sich Normalwiderstände mit dekadischen Nennwerten von  $1 \Omega$  bis  $100 \text{ M}\Omega$  direkt gegen den Quanten-Hall-Widerstand kalibrieren. Bisher waren für die Kalibrierung von  $100 \text{ M}\Omega$ -Normalwiderständen fünf Vergleichsschritte erforderlich.

Auch die Möglichkeiten zur Weitergabe der Einheit der Stromstärke wurden verbessert. Hier gewinnt das präzise Messen von Gleichstromstärken bis  $100 \text{ A}$  zunehmend an Bedeutung, insbesondere in der Energiemesstechnik für die Photovoltaik. Daher wurde ein Messplatz aufgebaut, mit dem Gleichströme von  $1 \text{ A}$  bis  $100 \text{ A}$  mit einer erweiterten relativen Messunsicherheit von  $3 \mu\text{A}/\text{A}$  gemessen werden können. In dem Aufbau werden anstelle der üblicherweise verwendeten Strommesswiderstände, die aufgrund ihrer Eigenerwärmung und der geringen Messspannung die erreichbare Messunsicherheit auf etwa  $10 \mu\text{A}/\text{A}$  beschränken, Präzisionsgleichstromwandler eingesetzt.

Zur Reproduzierung und Weitergabe des Volt werden Josephson-Spannungsnormale beständig weiterentwickelt. Die Abteilung hat in den letzten Jahren die  $\text{Nb}/\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Nb}$ -Technologie zur Herstel-

lung von SNS-Josephson-Kontakten (S: Supraleiter, N: Normalleiter) erfolgreich im Reinraumzentrum der PTB etabliert. Binäre Josephson-Normale mit Ausgangsspannungen von  $10 \text{ V}$  werden inzwischen routinemäßig hergestellt. Bei dieser Technologie ist jedoch die Frequenz der erzeugten Wechselspannung auf den kHz-Bereich beschränkt. Daher werden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormalen weitergeführt, da diese die Erzeugung von Spannungen mit Frequenzen bis in den MHz-Bereich erlauben. Zur Erhöhung der Ausgangsspannung pulsgetriebener Josephson-Spannungsnormale bedarf es jedoch noch beträchtlicher Anstrengungen. Im Berichtsjahr ist es gelungen, den Effektivwert der Ausgangsspannung auf ca.  $180 \text{ mV}$  zu erhöhen. Dazu wurden zwei einzelne SNS-Josephson-Schaltungen auf einem Chip in Serie geschaltet. In jeder Schaltung sind zwei Lagen von Josephson-Kontakten übereinander angeordnet. Insgesamt wurden so 12 000 Josephson-Kontakte auf dem Chip miteinander verschaltet. Pulsgetriebene Josephson-Spannungsnormale können auch in sogenannte Pulse-Tube-Kleinkühlern betrieben werden, die im Gegensatz zu herkömmlichen Kryostaten nicht mit flüssigem Helium versorgt werden müssen, was die Handhabung der Messeinrichtung beträchtlich vereinfacht (Abbildung 6). Untersuchungen im Berichtsjahr haben gezeigt, dass die Temperaturstabilität und die Kälteleistung von Kleinkühlern ausreichen, um einen stabilen Betrieb pulsgetriebener Josephson-Spannungsnormale zu ermöglichen.



Abbildung 6: Experimenteller Aufbau zum Betrieb eines pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormals in einem Pulse-Tube-Kleinkühler (rechts im Bild)

Ungeachtet ihrer Limitierung auf Frequenzen im kHz-Bereich erlauben binäre Josephson-Spannungsnormale die Entwicklung von Messtechnik, die zahlreiche Anforderungen von Kalibrierlaboratorien erfüllt und direkt in der Industrie eingesetzt werden kann. Die Abteilung arbeitet gemeinsam mit zwei Industriepartnern intensiv am Technologietransfer eines Josephson-basierten Wechselspannungsmesssystems im Rahmen des MNPQ-Transfer-Programms (Messen, Normen, Prüfen, Qualitätssicherung) des Bundeswirtschaftsministeriums. Hier wurden im Berichtsjahr sehr gute Fortschritte erzielt: Ein für den Einsatz in der Industrie entwickelter Prototyp wurde für Wechselspannungsfrequenzen bis 4 kHz erfolgreich getestet (siehe auch die Rubrik „Nachricht des Jahres“).

Auch ein weiteres MNPQ-Projekt im Bereich der magnetischen Messtechnik wurde erfolgreich bearbeitet. In diesem Projekt wurde gemeinsam mit einem Industriepartner eine neuartige digitale Regelung entwickelt, mit deren Hilfe die magnetischen Eigenschaften von Elektroblechen genauer und in einem erweiterten Frequenzbereich gemessen werden können.

### Elektrische Energiemesstechnik

Im Gebiet der elektrischen Energiemesstechnik greift die Abteilung die metrologischen Fragen auf, die sich aus den aktuellen energiepolitischen Weichenstellungen ergeben, z. B. durch die Energiewende und die daraus resultierenden Anforderungen an das Stromnetz oder durch den Ausbau der Elektromobilität. Die elektrische Energiemesstechnik hat

sehr von der ersten Runde des EMRP profitiert, dessen Projekte 2010 angelaufen sind und im Berichtsjahr erfolgreich beendet wurden. Im Rahmen dieser Projekte hat die Abteilung messtechnische Fragen im Zusammenhang mit der Energieübertragung aufgegriffen. So wurde zur metrologischen Unterstützung der Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) gemeinsam mit anderen europäischen metrologischen Instituten ein Spannungsteiler für die Messung von Gleichspannungen bis zu 1 MV entwickelt. Weitere Entwicklungen im Bereich HGÜ betreffen Gleichstrom-Elektrizitätszähler, Messsysteme zur Charakterisierung von Mischspannungen, die aus einem hohen Gleichanteil mit überlagerter Wechselspannung bestehen, und die Rückführung des Wirkungsgrades von Umrichtern, die das HGÜ-Netz an das Wechselstromnetz koppeln.

Nicht nur bei der HGÜ, sondern auch bei der Wechselstromübertragung werden in modernen, zukunftsfähigen Energienetzen heute Spannungen von bis zu 800 kV verwendet. Daher müssen die eingesetzten Betriebsmittel für Spannungen im Megavoltbereich ausgelegt und geprüft werden. Für die Kalibrierung der hierfür notwendigen Messsysteme wurde in der neuesten Version der internationalen Hochspannungsnorm IEC 60060 empfohlen, die Vergleichsmessungen möglichst bis zur Nennspannung durchzuführen. Hierfür wurde die erste Stufe eines 3-stufigen gedämpft-kapazitiven Spannungsteilers für Blitz- und Schaltstoßspannungen bis 1,5 Millionen Volt entwickelt.

Zur Unterstützung der Elektromobilität wurde in Zusammenarbeit mit der Abteilung 8 der PTB eine

mobile Kalibriereinrichtung entwickelt und aufgebaut, mit der nicht nur die in Elektroautos, sondern auch die in Stromtankstellen im öffentlichen Raum zu Abrechnungszwecken eingebauten Elektrizitätszähler kalibriert und geprüft werden können. Das Messsystem erfüllt die Anforderungen an die relative Messunsicherheit für elektrische Leistung von  $10^{-4}$ .

### Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie

Im Schwerpunktgebiet Hochfrequenz werden die Messmöglichkeiten im GHz- und THz-Frequenzbereich systematisch ausgebaut. Zum Ausbau der Antennen- und Feldmesstechnik wurde in der Absorberhalle der PTB ein neuer Messplatz zur Antennencharakterisierung zwischen 3 GHz und 325 GHz in Betrieb genommen (siehe Titelblatt des Berichts der Abteilung 2). Der Antennenscanner erlaubt die Abtastung der Richtcharakteristik einer zu charakterisierenden Antenne auf einer Kugeloberfläche mit Hilfe einer zweiten Messantenne. Der Aufbau wird im Rahmen der Darstellung und Weitergabe der elektrischen Feldstärke und zur Messung der Abstrahlcharakteristik von Antennen der Hochfrequenztechnik verwendet.

Zum Ausbau der Hochfrequenzleistungsmesstechnik entwickelt die Abteilung gemeinsam mit einem Industriepartner ein auf thermoelektrischer Detektion basierendes TransfERNormal für Frequenzen bis 110 GHz. Das TransfERNormal kann in den Mikrokalorimetern der PTB kalibriert werden und soll die bisher für die Weitergabe der Hochfrequenzleistung

verwendeten Thermistor-Sensoren ersetzen, die nicht mehr kommerziell erhältlich sind.

Auch die Entwicklung von Messtechnik für Feldstärkemessungen „vor Ort“ ist gut vorangekommen. Abbildung 7 zeigt einen Oktokopter, der als fliegende Messplattform mit verschiedenen Antennen bestückt werden kann, um die Feldstärke von Sendeanlagen von Instrumentenlandesystemen der Flugsicherung zu messen. Diese Arbeiten erfolgen im Rahmen eines vom Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (BAF) geförderten Projektes. Die Technologie soll auch zur Bearbeitung eines vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderten Verbundvorhabens benutzt werden, in dem die Störwirkung von Windenergieanlagen auf Radarsysteme der Flugsicherung, der Landesverteidigung und der Wetterbeobachtung untersucht wird.

### Metrologie für magnetische Nanostrukturen

Im Berichtsjahr wurde die technologische Basis für die Entwicklung von Messtechnik zur Charakterisierung magnetischer Nanostrukturen erweitert. Dazu wurde im Reinraumzentrum der PTB eine Anlage zum Abscheiden und Ätzen magnetischer Materialien aufgebaut und in Betrieb genommen. Da auch geeignete Lithografiesysteme im Reinraumzentrum vorhanden sind, steht damit die komplette Prozesskette für die Fertigung nanomagnetischer Testobjekte zur Verfügung.

Die Arbeiten im Schwerpunktgebiet *Metrologie für magnetische Nanostrukturen* konzentrieren sich zur-



Abbildung 7: Oktokopter mit Messantennen zur Bestimmung der Feldstärke „vor Ort“, z. B. in der Nähe von Windenergieanlagen

zeit auf Messgrößen der Spin-Kaloritronik, die sich mit thermischen Effekten in der Spin-Elektronik beschäftigt. Zu diesem Thema ist im Berichtsjahr das EMRP-Projekt „SpinCal“ gestartet worden, das von der Abteilung Elektrizität koordiniert wird. Im Rahmen dieses Projektes konnte an der PTB erstmals die Magnetfeldabhängigkeit des thermoelektrischen Wirkungsgrades einer Co/Cu-Multilagenschicht experimentell bestimmt werden (Abbildung 8). Der thermoelektrische Wirkungsgrad gibt an, wie effizient thermische Energie, z. B. die Abwärme eines elektrischen Geräts, in nutzbare elektrische Energie umgewandelt werden kann. Obwohl der Riesen-Magnetowiderstand von Co/Cu-Multilagenschichten sich bei angelegtem Magnetfeld nur um etwa 30 % änderte, wurde eine gleichzeitige Änderung der thermoelektrischen Effizienz von bis zu 50 % nachgewiesen. Derartige Effekte könnten in Zukunft die Entwicklung von thermoelektrischen Generatoren ermöglichen, die durch Magnetfelder schaltbar sind.

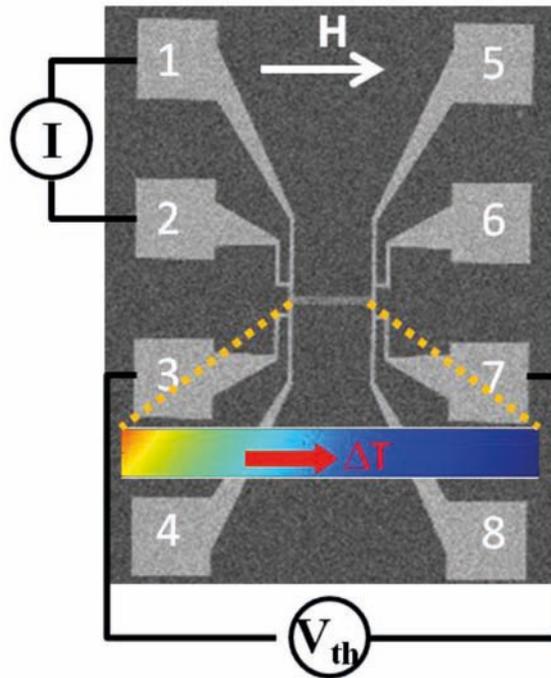


Abbildung 8: Mikrostrukturierte Co/Cu-Multilagenschicht. Die Probe wurde in einen Streifen (Mitte) mit angeschlossenen elektrischen Kontakten (1-8) strukturiert. Durch seitliches Heizen wird eine Temperaturdifferenz über den Streifen erzeugt, so dass die thermoelektrischen Eigenschaften gemessen werden können. Der Farbbalken verdeutlicht die Temperaturverteilung im Streifen.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de))

### Grundlagen der Metrologie

#### Erhöhung der Ausgangsspannung des JAWS-Spannungsnormals durch Stapelung von Josephson-Kontakten in einer Serienschaltung

Die Ausgangsspannung des JAWS-Spannungsnormals konnte durch Verwendung von zweifach gestapelten Josephson-Kontakten in einer Serienschaltung aus zwei Einzelschaltungen, die auf einem Chip supraleitend gekoppelt sind, erhöht werden. Mit insgesamt 12 000 Josephson-Kontakten wurden Ausgangsspannungen von ca.  $180 \text{ mV}_{\text{RMS}}$  bzw.  $520 \text{ mV}_{\text{PP}}$  synthetisiert. (O. Kieler, FB 2.4, [oliver.kieler@ptb.de](mailto:oliver.kieler@ptb.de))

#### Betrieb eines JAWS-Systems im Kleinkühler demonstriert

Das JAWS-System der PTB wurde erstmalig erfolgreich in einem Pulse-Tube-Kleinkühler betrieben. Es zeigte sich, dass die Temperaturstabilität und die Kälteleistung des Kleinkühlers ausreichen, um einen stabilen Betrieb zu ermöglichen. Dabei wurden mit Schaltungen von 4000 Josephson-Kontakten Ausgangsspannungen von  $70 \text{ mV}_{\text{RMS}}$  bzw.  $200 \text{ mV}_{\text{PP}}$  erzielt. (O. Kieler, FB 2.4, [oliver.kieler@ptb.de](mailto:oliver.kieler@ptb.de))

#### Erfolgreicher Einsatz von PTB-Nano-SQUIDs für Raster-SQUID-Mikroskopie

In der PTB hergestellte Nano-SQUIDs wurden in einer Kooperation mit den Universitäten Tübingen und Basel in einen multifunktionalen Sensor integriert. Der Sensor mit dem Nano-SQUID und einem Ni-Nanotube wurde zur Charakterisierung von magnetischen Nanoteilchen verwendet. In Zukunft kann diese Technologie für grundlegende Studien auf dem Gebiet des Nanomagnetismus (z. B. Anwendungen für magnetische Datenspeicher) eingesetzt werden. (O. Kieler, FB 2.4, [oliver.kieler@ptb.de](mailto:oliver.kieler@ptb.de))

#### Ultrahochohmige Mikrostreifenwiderstände aus $\text{TiO}_x$ für den Einsatz in Coulomb-Blockade-Schaltungen

Dünnschicht-Mikrostreifenwiderstände aus teilweise oxidierten Ti-Schichten bilden hochohmige Impedanzen, die quantitativ und qualitativ den bisher eingesetzten Widerständen aus Chrom überlegen sind und bis zu sehr hohen Frequenzen eingesetzt werden können. Diese Widerstände dienen als wichtige Bauelemente in Coulomb-Blockade-Schaltungen auf Basis von Aluminium und schaffen Voraussetzungen für eine höhere Präzision des Einzelladungstransportes. (S. Lotkhov, FB 2.4, [sergey.lotkhov@ptb.de](mailto:sergey.lotkhov@ptb.de))

#### Drucksensor mit Kohlenstoffnanomembran

Mit einer Kohlenstoffnanomembran (CNM) sollen mikroskopische Drucksensoren hergestellt werden. Es wurde ein Auslesekonzept für einen Feldeffekttransistor entwickelt, mit dem die Bewegung der CNM detektierbar ist. (M. Bohrisch, FB 2.4, [martin.bohrisch@ptb.de](mailto:martin.bohrisch@ptb.de))

#### Bifurkationseffekte in supraleitenden Mikrowellenresonatoren mit integrierten Nb-Josephson-Kontakten

Mithilfe von Bifurkationseffekten können sehr schwache elektrische Signale nachgewiesen werden. Dafür wurden supraleitende koplanare Wellenleiter-Resonatoren aus Niob mit integrierten Serienschaltungen aus Nb/ $\text{AlO}_x$ /Nb-Josephson-Kontakten hergestellt. Unter Anwendung eines kontrollierten Gleichstroms durch die Josephson-Kontakt-Serienschaltung konnte der Bifurkationseffekt bei einer Temperatur von 4,2 K demonstriert werden. (M. Khabipov, FB 2.4, [marat.khabipov@ptb.de](mailto:marat.khabipov@ptb.de))

#### Quantenbasierte Erzeugung von Wechselstrom-Wellenformen

Halbleiter-Einzelelektronenpumpen ermöglichten bisher die Erzeugung eines quantisierten Gleichstromes durch kontrollierten Transport einzelner Elektronen. Durch zeitliche Variation des Einzelelektronentransports konnten nun erstmals auch quantisierte Wechselströme mit beliebiger Wellenform realisiert werden. (F. Hohls, FB 2.5, [frank.hohls@ptb.de](mailto:frank.hohls@ptb.de))

#### Herstellung von epitaktischem Graphen in der PTB

Graphen, ein einzigartiges Material aus einer einzelnen Atomlage von auf einem hexagonalen Gitter angeordneten Kohlenstoffatomen, kann mittels einer neu an der PTB aufgebauten Anlage nun auch großflächig für metrologische Anwendungen hergestellt werden. (K. Pierz, FB 2.5, [klaus.pierz@ptb.de](mailto:klaus.pierz@ptb.de))

#### Neuartige Photoströme durch nichtresonante Anregung von Zweiniveausystemen

Die optisch induzierte Kohärenz in Halbleitern kann einen signifikanten Einfluss auf Photoströme ausüben. Bei nichtresonanter Anregung eines Zweiniveausystems führt die zeitliche Frequenzänderung der Kohärenz zu neuen Photoströmen, die nur für gepulste Anregungen entstehen. (M. Bieler, FB 2.5, [mark.bieler@ptb.de](mailto:mark.bieler@ptb.de))

## **Nachgezählt: Charakterisierung einer Halbleiter-Einzelelektronen-Pumpe durch Einzel-Ladungs-Detektion**

Halbleiter-Einzelelektronenpumpen gelten als die vielversprechendsten Kandidaten für ein zukünftiges Quantennormal der elektrischen Basiseinheit Ampere. An der PTB konnten diese Elektronenpumpen nun erstmals mit hoher Genauigkeit durch Einzelladungsdetektion charakterisiert werden. (L. Fricke, FB 2.5, lukas.fricke@ptb.de)

## **Optisch lenkbare Terahertz-Quelle**

Die gezielte optische Anregung von Elektronenflüssen in Halbleitern erlaubt eine kontrollierte räumliche Ausrichtung der dabei ausgesendeten elektromagnetischen Strahlung. (H. Füser, FB 2.5, heiko.fueser@ptb.de)

## **Magnetfeldabhängigkeit des thermoelektrischen Wirkungsgrades von Co/Cu-Multilagen**

Die Magnetisierungsumkehr in magnetischen Multilagen ändert nicht nur den elektrischen Widerstand, sondern auch den thermoelektrischen Wirkungsgrad. (X.Hu, FB 2.5, xiukun.hu@ptb.de)

## **Kontrolle magnetischer Domänenwände in magnetischen Nanodrähten**

An der PTB wurden magnetische Nanodrähte hergestellt, in denen einzelne magnetische Domänenwände gezielt erzeugt und manipuliert werden können. (P. Krzyszczyk, FB 2.5, patryk.krzyszczyk@ptb.de)

## **Zeitliche Dynamik von magneto-optisch induzierten Photoströmen in GaAs**

Untersuchungen der zeitlichen Dynamik von magneto-optisch induzierten Photoströmen in Halbleitern zeigen, dass die Dynamik von der Polarisierung der Anregungspulse abhängt. (C.B. Schmidt, FB 2.5, christian.b.schmidt@ptb.de)

## **Elektrische Charakterisierung von Graphen aus aromatischen Molekülen**

In einer Kooperation mit der Universität Bielefeld wurden die elektronischen Eigenschaften der dort mit einem neuen Verfahren hergestellten Graphenschichten mit elektrischen Magneto-Transportmessungen bei tiefen Temperaturen untersucht. (F. J. Ahlers, FB 2.6, franz.ahlers@ptb.de)

## **Direkt, präzise, flexibel: Neuer Hochwindungs-Kryostromkomparator bietet erweiterte Mess- und Kalibriermöglichkeiten für elektrische Widerstände**

Ein 14-Bit-Kryostromkomparator wurde in kompakter Bauweise realisiert und erfolgreich für erste Vergleichsmessungen an elektrischen Normalwiderständen eingesetzt. (M. Götz, FB 2.6, martin.goetz@ptb.de)

## **Neuartiger Stromverstärker für hochpräzise rückgeführte Messungen kleinster elektrischer Stromstärken**

Im Rahmen des JRP „Qu-Ampere“ wird für hochpräzise und rückgeführte Messungen von Stromstärken im Bereich 100 pA in Zusammenarbeit mit der Abteilung 7 der PTB ein neuartiges Verstärkerkonzept entwickelt. Ein Prototyp dieses „Ultrastable low-noise current amplifier“ (ULCA) wurde bereits hergestellt und erfolgreich getestet. (D. Drung, H. Scherer, FB 7.2, 2.6, dietmar.drung@ptb.de, hansjoerg.scherer@ptb.de)

## **Metrologie für die Wirtschaft**

### **Isotherm betriebener Thermokonverter zur rückführbaren Leistungsmessung nicht-sinusförmiger Signale**

Im Rahmen des 2013 abgeschlossenen EMRP-Projektes „Metrology for Energy Harvesting“ wurde ein neuartiger Leistungssensor auf der Basis eines modifizierten planaren Vielfach-Thermokonverters (PMJTC) entwickelt. Damit ist es möglich, den Energieinhalt des zu messenden Signals in einem bestimmten Zeitraum und damit die mittlere Leistung unabhängig von dessen Kurvenform und Frequenz rückgeführt zu bestimmen. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

### **Halbautomatischer Messplatz zur Kalibrierung von Gleichstromstärken bis 100 A**

Das präzise Messen von Gleichstromstärken bis 100 A gewinnt zunehmend an Bedeutung, insbesondere in der Energiemesstechnik für die Photovoltaik. Es wurde ein Messplatz aufgebaut, mit dem Gleichströme von 1 A bis 100 A mit einer erweiterten relativen Messunsicherheit von  $3 \cdot 10^{-6}$  gemessen werden können. (B. Schumacher, FB 2.1, bernhard.schumacher@ptb.de)

### **Van-der-Pauw-Messplatz zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Metallen und Halbleitern**

Der im Rahmen des EMRP-Projektes „Energy Harvesting“ aufgebaute Messplatz zur Bestimmung von Materialparametern von thermoelektrischen Materialien wurde optimiert und dient als Grundlage für einen Messplatz zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit von Halbleitern. (B. Schumacher, FB 2.1, bernhard.schumacher@ptb.de)

### **Messplatz zur Antennencharakterisierung in Betrieb genommen**

In der Arbeitsgruppe *Elektromagnetische Felder und Antennenmesstechnik* wurde nach Abschluss der Planungs- und Aufbauphase ein neuer Messplatz zur Antennencharakterisierung zwischen 3 GHz und 325 GHz in Betrieb genommen. Der Antennenscanner erlaubt

die Abtastung der Richtcharakteristik einer zu charakterisierenden Antenne auf einer Kugeloberfläche mithilfe einer zweiten Messantenne. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

#### **Entwicklung von Hochfrequenz-Leistungstransferstandards für den Millimeterwellenbereich**

In Kooperation mit einem Hersteller von Hochfrequenzleistungsmessgeräten entwickelt der Fachbereich 2.2 auf thermoelektrischer Detektion basierende Hochfrequenz-Leistungstransferstandards bis 110 GHz, die in Mikrokalorimetern der PTB rückführbar kalibriert werden können. (R. Judaschke, FB 2.2, rolf.judaschke@ptb.de)

#### **Neues 16-Term-Verfahren zur Korrektur des Übersprechens bei On-Wafer-Messungen im Sub-mm-Wellenbereich entwickelt**

In Zusammenarbeit mit dem National Institute of Standards and Technology (NIST) in den USA und dem Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik in Berlin ist ein neues Verfahren zur Korrektur des Übersprechens zwischen den Mikrowellenprüfspitzen und den Zugangsleitungen der zu messenden planaren Bauteile entwickelt worden. Das Verfahren wurde bei allen drei beteiligten Instituten erfolgreich zur Messung passiver Bauteile bis 110 GHz und am NIST zur Messung von Transistoren bis 750 GHz eingesetzt. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

#### **Neuer Spannungsteiler für Blitz- und Schaltstoßspannungen bis 1,5 Millionen Volt**

Die Tendenz, elektrische Energie auf immer höheren Spannungsebenen zu übertragen, erfordert es, auch für die Messtechnik entsprechende Normen und Geräte zu entwickeln. So wird in der neuen Hochspannungsnorm IEC 60060 empfohlen, die Vergleichsmessungen möglichst bis zur Nennspannung durchzuführen. Hierfür wurde die erste Stufe eines 3-stufigen gedämpft-kapazitiven Spannungsteilers für Blitz- und Schaltstoßspannungen bis 1,5 Millionen Volt entwickelt. (W. Lucas, FB 2.3, wolfgang.lucas@ptb.de)

#### **Aufbau und Industrietransfer einer neuartigen digitalen Regelung zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Elektroblechen**

Eine neuentwickelte digitale Regelung ermöglicht eine zuverlässigere und schnellere Messung der Verlustleistung von Elektroblechen. (J. Lüdke, FB 2.5, joachim.luedke@ptb.de)

#### **Quantenvoltmeter zur Messung von Wechselspannungen für die Industrie**

Technologietransfer eines Josephson-Messsystems für Gleich- und Wechselspannungen. (R. Behr, FB 2.6, ralf.behr@ptb.de)

#### **Metrologie für die Gesellschaft**

##### **Erste Ergebnisse im Projekt „Einfluss hochfrequenter Felder des Mobilfunks auf das blutbildende System in vitro“**

Im Rahmen des vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) geförderten Projektes „Einfluss hochfrequenter Felder des Mobilfunks auf das blutbildende System in vitro“, in dem die PTB zusammen mit dem Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Universität Würzburg die Auswirkungen der Exposition von Blutzellen mit hochfrequenten Feldern untersucht, wurde der Versuchsaufbau in Betrieb genommen und die spezifische Absorptionsrate als Maß für die Intensität der Exposition ermittelt. Ein Großteil der geplanten Expositionsexperimente wurde bereits durchgeführt und muss jetzt ausgewertet werden. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

##### **Projekt zur Bestimmung der Feldstärke von terrestrischen Navigationsanlagen begonnen**

Im Oktober 2012 ist der Startschuss für das vom Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung (BAF) geförderte Projekt „Untersuchungen zur Bestimmung der Feldstärke von terrestrischen Navigationsanlagen“ gefallen. In der dreijährigen Projektlaufzeit untersucht die PTB zusammen mit dem BAF Konzepte zur Messung der Feldstärke von Anlagen des Instrumentenlandesystems (ILS) der Flugsicherung. Ziel des Projektes ist die technische Bewertung der Vergleichbarkeit von Messergebnissen verschiedener Flugvermessungsunternehmen sowie der Systemleistung von terrestrischen ILS-Anlagen im Hinblick auf die Feldstärken im freien Raum gemäß den Vorgaben der internationalen zivilen Luftfahrtorganisation (International Civil Aviation Organization – ICAO). (T. Schrader, FB 2.2, thorsten.schrader@ptb.de)

##### **Projekt zur Untersuchung der Störwirkung von Windenergieanlagen auf Radarsysteme (WERAN – Wechselwirkung Windenergieanlagen und Radar/Navigation) begonnen**

Zum 1. September 2013 wurde das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderte Verbundvorhaben WERAN – Wechselwirkung Windenergieanlagen und Radar/Navigation begonnen. In der dreijährigen Projektlaufzeit befasst sich der Fachbereich 2.2 der PTB zusammen mit den Firmen FCS Flight Calibration Services GmbH

und steep GmbH sowie der Leibniz Universität Hannover mit der Untersuchung der Störwirkung von Windenergieanlagen auf Radarsysteme der Flugsicherung, der Landesverteidigung und der Wetterbeobachtung. (T. Schrader, FB 2.1, thorsten.schrader@ptb.de)

### **Entwicklung eines Messsystems zur Kalibrierung und Prüfung von Elektrizitätsmess-einrichtungen in Ladepunkten für Elektromobile**

Im Rahmen der Bemühungen der Bundesregierung, der Elektromobilität in Deutschland zum Durchbruch zu verhelfen, wird auch in der PTB in verschiedenen Projekten an dem Thema geforscht. In Zusammenarbeit der Fachbereiche *Elektrische Energiemess-technik* der Abteilung *Elektrizität* und *Metrologische Informationstechnik* der Abteilung *Medizinphysik und metrologische Informationstechnik* wurde eine mobile Kalibriereinrichtung entwickelt und aufgebaut, mit der nicht nur in Elektroautos, sondern auch in Stromtankstellen im öffentlichen Raum zu Abrechnungszwecken eingebaute Elektrizitätszähler kalibriert und geprüft werden können. (M. Seckelmann, FB 2.3, michael.seckelmann@ptb.de)

### **Entwicklung von Mindestanforderungen an die Nutzungsfreundlichkeit von Interaktionsschnittstellen an Messeinrichtungen für Elektrizität**

Erfolgreiche Interaktion zwischen Menschen und Elektrizitätsmess-einrichtungen in Smart Grids setzt voraus, dass die Kommunikation der Messinformationen über die Mensch-Maschine-Schnittstellen optimiert wird. Mit dieser Zielsetzung hat die PTB die entsprechenden, aus dem Eichrecht ableitbaren Mindestanforderungen in die 2013 veröffentlichten DIN SPEC 33440 „Ergonomische Gestaltung von Interaktionsschnittstellen und Produkten für Smart Grid und Elektromobilität“ eingebracht. (M. Kahmann, FB 2.3, martin.kahmann@ptb.de)

### **Verbesserte Anforderungen und Prüfregeln zur Zulassung von Elektroimpulsgeräten für den Personenschutz und im Bereich der Tierhaltung**

Das Waffengesetz überträgt der PTB die Aufgabe, durch die Entwicklung und Durchführung von Prüf- und Zulassungsverfahren die Einhaltung von technischen Anforderungen an Elektroimpulsgeräte sicherzustellen. Mit den im Jahr 2013 wesentlich überarbeiteten „Anforderungen und Prüfregeln zur Zulassung von Elektroimpulsgeräten für den Personenschutz und im Bereich der Tierhaltung“ hat die PTB ein verbessertes regulatives Rahmenwerk vorgelegt, auf dessen Grundlage das Vorhandensein der rechtlich geforderten Qualitätsmerkmale der Elektroimpulsgeräte mit stärkerer Einbindung des Herstellers in den Zulassungsprozess

zertifiziert werden kann. (H. Seifert, FB 2.3, helmut.seifert@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

#### **Abschluss des Projektes „Metrology for Energy Harvesting“**

2013 wurde das EMRP-Projekt „Metrology for Energy Harvesting“ erfolgreich abgeschlossen. (J. Melcher, FB 2.1, juergen.melcher@ptb.de)

#### **Joint Research Project Q-WAVE „A quantum standard for sampled electrical measurements“ gestartet**

Am 1. Juni 2013 startete das Joint Research Project (JRP) SIB59 Q-WAVE „A quantum standard for sampled electrical measurements“, das im Call 2012 „SI Broader Scope II“ des European Metrology Research Programme (EMRP) erfolgreich beantragt worden war. Im Rahmen des Projekts entwickelt die PTB gemeinsam mit elf weiteren europäischen nationalen Metrologieinstituten in den folgenden drei Jahren Messverfahren, um eine direkte und effiziente Rückführbarkeit für Präzisionsgeräte im Frequenzbereich bis 10 MHz zur Verfügung zu stellen. (J. Kohlmann, FB 2.4, johannes.kohlmann@ptb.de)

#### **Spintronik und Spin-Kaloritronik magnetischer Nanostrukturen**

Ein neu bewilligtes und von der PTB koordiniertes europäisches Forschungsprojekt untersucht neuartige Effekte in magnetischen Nanostrukturen. (H. W. Schumacher, FB 2.5, hans.w.schumacher@ptb.de)

#### **Joint Research Project „AIM QuTE: Automated impedance metrology extending the quantum toolbox for electricity“ gestartet**

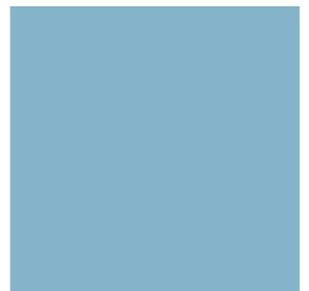
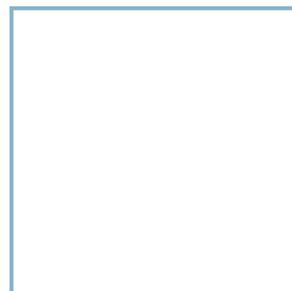
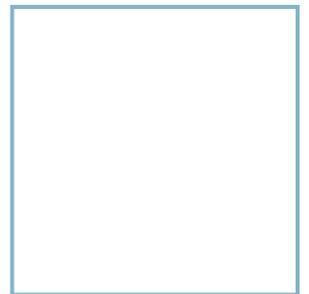
In einem neu bewilligten und von der PTB koordinierten europäischen Forschungsprojekt sollen Werkzeuge und Methoden der Impedanzmetrologie verbessert werden. (L. Palafox, FB 2.6, luis.palafox@ptb.de)

#### **Joint Research Project „Quantum resistance metrology based on graphene“ gestartet**

In einem neu bewilligten und von der PTB koordinierten europäischen Forschungsprojekt soll die Entwicklung von Graphen zu einem einfach nutzbaren Quantennormal des elektrischen Widerstands vorangetrieben werden. (F. J. Ahlers, FB 2.6, franz.ahlers@ptb.de)

# Abteilung 3

## Chemische Physik und Explosionsschutz



## Metrologie für gasförmige und flüssige Energieträger

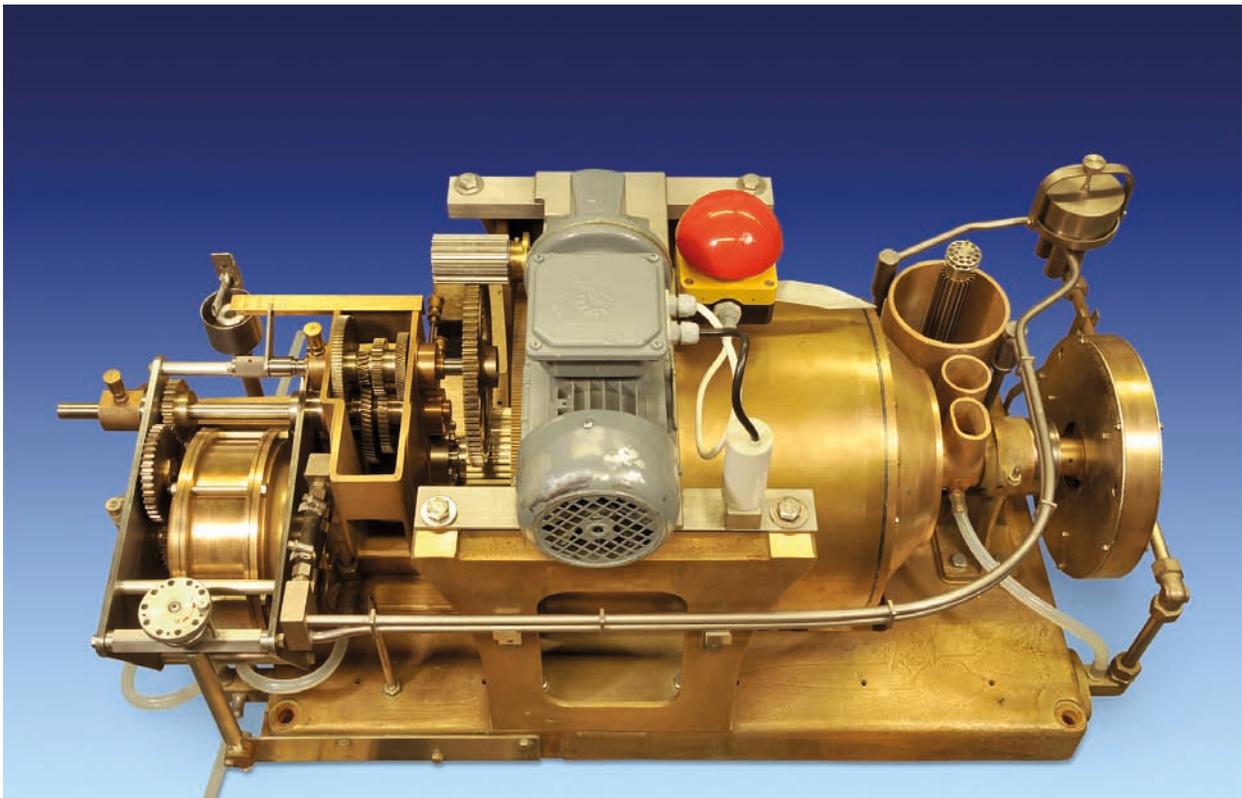
Im Zuge der aktuellen Bestrebungen, verstärkt regenerative Energien zu nutzen, ergeben sich eine Reihe neuer metrologischer Fragestellungen. Die PTB hat sich vor allem mit den für das gesetzliche Messwesen wichtigen thermophysikalischen Messgrößen befasst. Der wichtigste Aspekt ist dabei die durch Beimengung von regenerativ erzeugten Energieträgern bewirkte Änderung von thermophysikalischen Eigenschaften. Messverfahren und Normen müssen an die neuen Herausforderungen angepasst werden, um die Zuverlässigkeit von technischen Komponenten, Vorhersagemodellen und Abrechnungen zu beurteilen.

### Gasförmige Energieträger Kalorimeter für nicht-konventionelle Brenngase

Durch die Beimischung von nicht-konventionellen Brenngasen zu Erdgas ändern sich die thermophysikalischen und brenntechnischen Eigenschaften des resultierenden Erdgas-Gemisches, ohne dass die vorhandene messtechnische Infrastruktur des Erdgasnetzes auf diese Veränderungen vorbereitet wäre.

Aus diesen Gründen hat der Fachbereich 3.3 im Rahmen eines europäischen Verbundprojektes Untersuchungen zur Eignung zweier kommerzieller Kalorimeter zur Bestimmung des Brennwertes nicht-konventioneller Brenngase durchgeführt. Weitere Beteiligte waren das französische LNE, welches ein absolut messendes Referenzgaskalorimeter einsetzte, sowie das rumänische INM-BRML. Bild 1 zeigt die messtechnischen Komponenten des in der PTB verwendeten kommerziellen Foster-Cambridge-Kalorimeters im ausgebauten Zustand.

Für jedes der von den Metrologieinstituten eingesetzten Kalorimeter wurde eine eigene Kalibrierstrategie entwickelt. Während das Referenzkalorimeter des LNE mittels elektrischer Energie kalibriert werden konnte, wurden für die kommerziellen Kalorimeter binäre und ternäre Kalibriergasgemische – bestehend aus Methan, Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff – eingesetzt. Das Kalorimeter des INM-BRML wurde entsprechend DIN 51899 unter Verwendung eines Kalibriergases und eines Qualitätskontrollgases kalibriert, die Kalorimeter der PTB entsprechend ISO 6143 unter Verwendung von vier Kalibriergasen. Zur Validierung wurden sechs binäre oder ternäre biogas-ähnliche Gemische sowie ein kohleflözgas-ähnliches 10-Komponen-



Titelbild:

Aus allen Regionen Deutschlands gesammelte Kraftstoffproben zur Messung der Transportgrößen Dichte und Viskosität

Bild 1: Messtechnische Komponenten des Foster-Cambridge-Kalorimeters im ausgebauten Zustand.

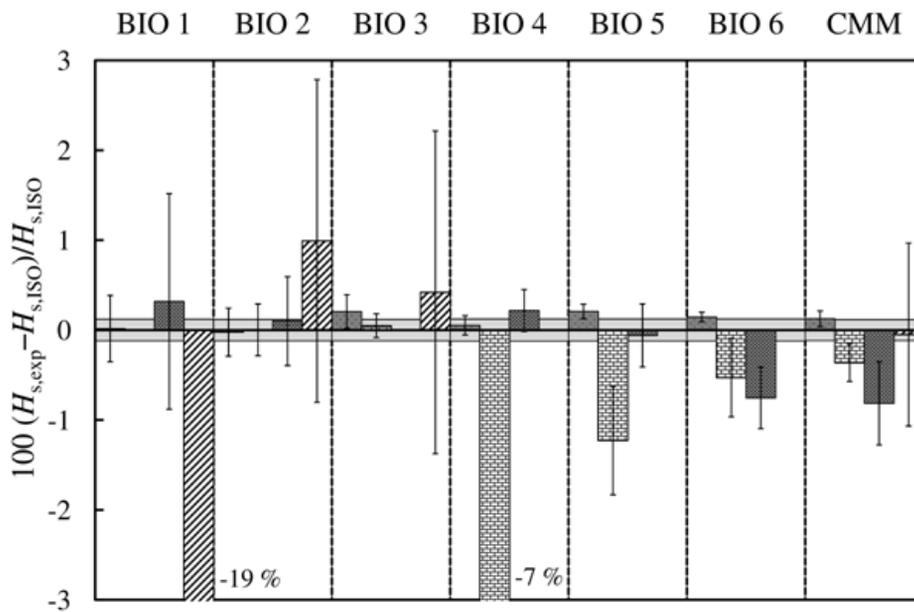


Bild 2: Relative Abweichungen der experimentell bestimmten Brennwerte  $H_{s,exp}$  von nach DIN EN ISO 6976 berechneten Werte und ihre Unsicherheiten ( $k = 2$ ). LNE Referenzkalorimeter; PTB Foster-Cambridge Kalorimeter; PTB Union Instruments CWD 2005 CT; INM-BRML Union Instruments CWD 2000; Unsicherheit der DIN EN ISO 6976-Werte

ten-Gas eingesetzt. Bild 2 zeigt die relativen Abweichungen der gemessenen Brennwerte von nach DIN EN ISO 6976 berechneten Brennwerten und ihre Unsicherheiten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die von den Herstellern der Geräte spezifizierten Unsicherheiten nur in einem eingeschränkten Messbereich gelten, mit einer angepassten Kalibrierstrategie aber auch deutlich unterschritten werden können.

### Gasbeschaffenheitsrekonstruktionsverfahren für Verteilnetze

Als Folge der zunehmenden Diversifizierung der Brenngase werden größere Beschaffenheitsschwankungen beim Verbraucher verursacht. Um die-

se korrekt zu erfassen, kann anstelle des Einsatzes zahlreicher Messgeräte auch das mathematische Verfahren der sogenannte Gasbeschaffenheitsrekonstruktion auf Verteilnetze angewendet werden. Bei diesen Verfahren wird für ein definiertes Netzgebiet aus den gemessenen Ein- und Auspeisemengen, den an den Einspeisestellen gemessenen Gasbeschaffenheiten und der bekannten Topologie des Gasnetzes unter Verwendung der einschlägigen Flussgleichungen die Wanderung einer „Gasportion“ durch das Gasnetz rekonstruiert. Die Anwendung derartiger Rekonstruktionssysteme (vgl. Bild 3) im Transportnetz ist seit vielen Jahren gängige Praxis, jedoch müssen diese Systeme für den jeweiligen Anwendungsfall adaptiert werden.

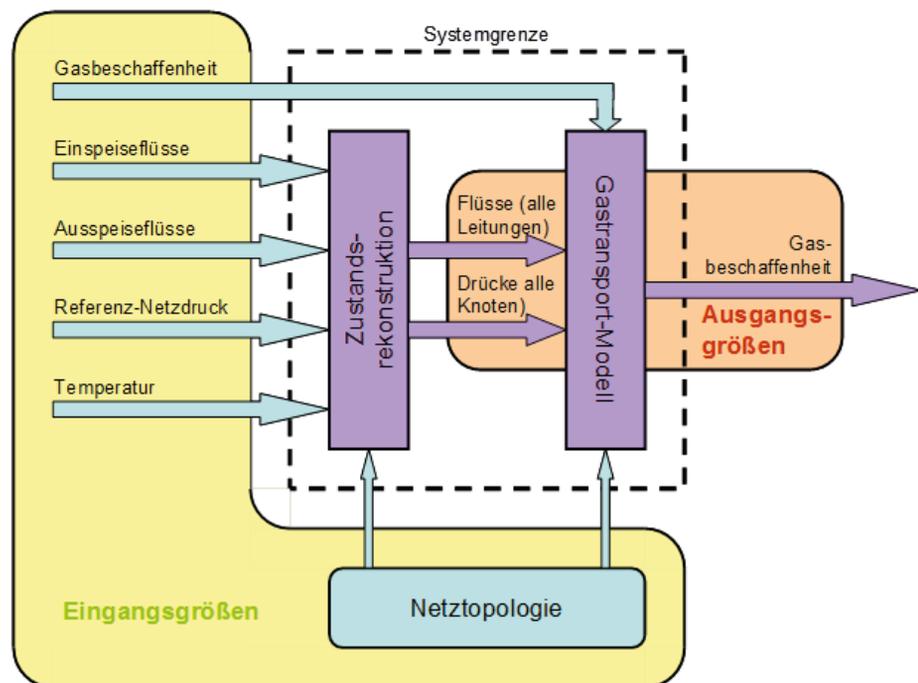


Bild 3: Schematische Darstellung des Zusammenwirkens der Ein- und Ausgangsgrößen eines Gasbeschaffenheitsrekonstruktionsverfahrens

Bild 4: Foto des Referenz-GC-Systems zur Zertifizierung von Gasgemischen



Die PTB entwickelt im Rahmen eines vom DVGW geförderten Drittmittelprojektes Verfahren zur Ermittlung von Gasbeschaffenheiten in regionalen Verteilnetzen. Diese Netze sind neben der im Vergleich zu den Transportnetzen komplexeren topologischen Struktur dadurch gekennzeichnet, dass vielerorts die Ausspeiseflüsse nicht kontinuierlich gemessen werden, sondern durch sogenannte Standardlastprofile ersetzt werden müssen. Durch Anwendung einer Monte-Carlo-Simulation konnte erstmals für derartige Netze eine orts aufgelöste Messunsicherheit ermittelt werden. Dies ermöglicht die Entscheidung, an Orten, an denen die Unsicherheit der Messgeräte einen besonders großen Einfluss auf die Ergebnisunsicherheit hat, ggf. höherwertige Messgeräte einzusetzen, während an Orten mit geringem Einfluss auf die Ergebnisunsicherheit die Messgeräte möglicherweise sogar entbehrlich sind.

### Zertifizierung von Kalibrier- und Eichgasen für Biogasmessgeräte

Seit der Schaffung der gesetzlichen Grundlagen für die Biogaseinspeisung in Erdgasnetze 2006 sind bundesweit inzwischen 127 Einspeiseanlagen in Betrieb (Stand: Nov. 2013).

Die Messtechnik zur Abrechnung des Energieträgers Biogas unterliegt dabei, wie im geschäftlichen Verkehr erforderlich, dem Eichrecht. Neben der Menge ist der Brennwert mit zugelassenen Messgeräten zu bestimmen.

Seit Jahresende 2010 können in der PTB auch spezielle Geräte für einspeisefähiges Biogas zugelassen werden. Die für diese Prozessgaschromatografen (PGC) notwendigen neuen Kalibrier- und Prüfgasgemische werden seither zu einem großen Anteil in der PTB zertifiziert.

Neben Wasserstoff ist auch Sauerstoff in der Erdgasmatrix enthalten, was diese Gemische zu sogenannten Oxyfuels macht, die in der Herstellung spezielle Sicherheitsvorkehrungen erfordern.

Für die rückgeführte Zertifizierung dieser Gemische setzt die PTB ihr Referenz-GC-System ein, das aus 2 Labor-Gaschromatografen mit WLD- und FID-Detektoren sowie einem Mikro-Gaschromatografen mit 4 Kanälen besteht. Bild 4 zeigt ein Foto des Systems.

Die Kalibrierung des Systems erfolgt in einem mehrfachen Messzyklus. Die Auswertung erfolgt nach Mehrpunktkalibrierung gemäß DIN EN ISO 6143 und DIN 51899.

Die volumenbezogenen Gemischbrennwerte bei der Bezugstemperatur und dem Bezugsdruck für die Verbrennung werden aus der quantitativen Analyse und den Brennwerten der reinen Komponenten nach DIN EN ISO 6976 berechnet. Bisher beträgt die Messunsicherheit des so errechneten Brennwertes aus der PTB-Analyse 0,12 %, wobei dieser Wert durch die Unsicherheit des reinen Methanbrennwertes aus der Norm limitiert ist. Eine Halbierung des Unsicherheitsbeitrages des Methanbrenn-

wertes – was durch neue PTB-Untersuchungen mithilfe eines Referenzkalorimeters bereits realisiert werden konnte – führt bei der Qualität der o. a. Analyse ebenfalls zur Reduzierung der Unsicherheit des Gemischbrennwertes auf die Hälfte des Wertes.

**Metrologische Infrastruktur für wasserstoffangereichertes Erdgas**

Um das zeitliche oder örtliche Überangebot an durch Windkraft und Solaranlagen erzeugtem Strom zu nutzen, bietet sich an, mit dem überschüssigen Strom elektrolytisch Wasserstoff zu erzeugen („Power to Gas“), diesen mit Erdgas zu mischen und über die vorhandene Erdgasinfrastruktur einer Nutzung zuzuführen. Aufgrund der großen Transport- und Speicherkapazität des Erdgasnetzes kann auf diese Weise auch ein saisonaler Ausgleich von Energieerzeugung und -verbrauch geschaffen werden, siehe Bild 5.

Die deutsche Erdgaswirtschaft strebt derzeit eine Maximalkonzentration von Wasserstoff im Erdgas von 10 % an, da bis zu diesem Wert die meisten Erdgasanlagen und -einrichtungen ohne größere Probleme ordnungsgemäß und sicher funktionieren sollten. Eine Ausnahme stellen die Drucktanks für erdgasbetriebenen Automobile dar, für die die entsprechende DIN-Norm einen Grenzwert von 2 % festlegt.

Derzeit (Nov. 2013) existieren in Deutschland nur wenige Pilotanlagen zur Wasserstoffproduktion mit einer Leistung von  $P_{el} = 2 \text{ MW}$  und einer Wasserstoffproduktion von  $V_n(H_2) = 360 \text{ m}^3/\text{h}$ . Bis 2020

sollen Anlagen mit einer Leistung von 100 MW errichtet sein.

Durch die Zumischung von Wasserstoff zum Erdgas ändern sich dessen thermophysikalische und brenntechnische Eigenschaften, insbesondere auch sein spezifischer Energiegehalt. Die PTB hat mehrere Projekte begonnen, um eine metrologische Infrastruktur, bestehend aus angepassten Messgeräten und geeigneten Kalibriergasen, zur Bestimmung des Volumens, der Masse, des Brennwertes und der Zusammensetzung des wasserstoffangereicherten Erdgases zu schaffen.

**Verflüssigtes Erdgas (LNG)**

Im Rahmen der Versorgungssicherheit gilt verflüssigtes Erdgas wegen seines im flüssigen Zustand 600-mal kleineren Volumens und der damit verbundenen besseren Lagerfähigkeit als strategisch wichtige und bei Transportwegen länger als 2000 km als ökonomische Alternative zur leitungsgebundenen Gasversorgung über Ländergrenzen hinweg. Außerdem kann LNG zu Verbrauchern transportiert werden, die keinen Zugang zum Gasversorgungsnetz besitzen. Als Treibstoff in der Binnenschifffahrt könnte LNG Schwefel- und Stickoxidemissionen minimieren, da beim Verbrennungsprozess prinzipiell nur Wasser und Kohlendioxid entstehen.

Das in diesem Jahr abgeschlossene EMRP-Projekt „Metrology for LNG“ umfasste verschiedenste durch LNG hervorgerufene metrologische Herausforderungen, angefangen von einer grundsätzlich zweimal besseren Bestimmung des Energiegehaltes von LNG im Handelsverkehr über die Verwirkli-

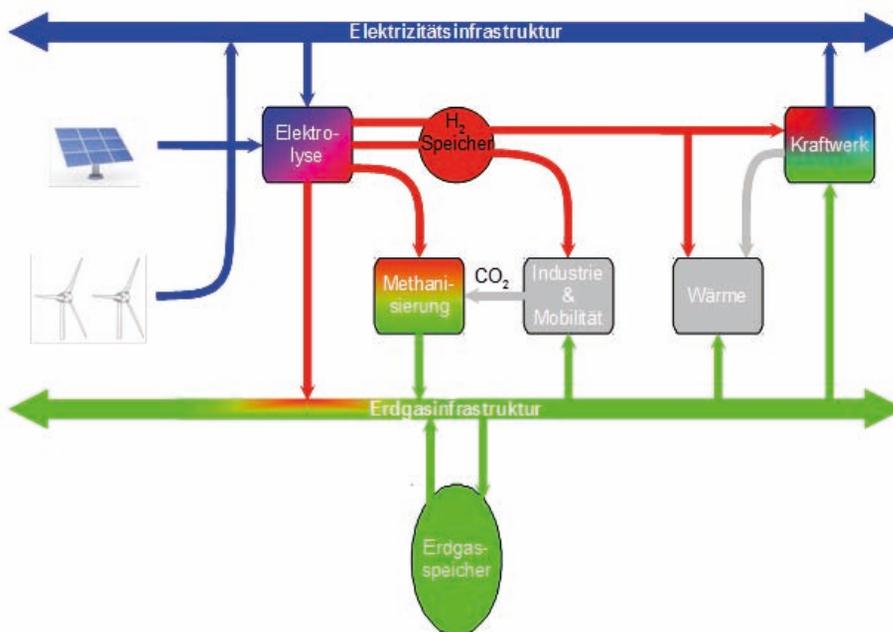


Bild 5: Verzahnung der Strom- und Gasinfrastruktur durch „Power to Gas“

Bild 6: Messgerät zur Messung der Dichte von Flüssigkraftstoffen und ihrer Temperaturabhängigkeit



chung von rückgeführten Durchfluss- und Dichtmessungen bis hin zur Verwertung der Ergebnisse in Richtlinien und ISO-Standards. Diese Aufgaben wurden von einer Gemeinschaft europäischer Forschungs- und Industriepartner (TUV NEL (Großbritannien), INRIM (Italien), VSL (Niederlande), PTB, E.ON Ruhrgas (Deutschland), Enagas (Spanien), Elengy (Frankreich), Ruhr-Universität Bochum) unter der Führung des VSL in Angriff genommen.

Die PTB gewährleistete die Kalibrierung von Senkkörpern (Arbeitsgruppe 3.23 *Thermisches Zustandsverhalten und Dichte*) für die Dichtemessanlage der Ruhr-Universität Bochum und sicherte damit die Rückführbarkeit der LNG-Dichtemessungen auf das SI. Die Arbeitsgruppe 3.31 *Kalorische Größen* lieferte Berechnungen von Bildungsenthalpien und Brennwerten von LNG einschließlich der dazugehörigen Unsicherheiten über einen großen Bereich von thermodynamischen Bedingungen.

### Flüssige Energieträger

Die Beimischung von agrotechnisch erzeugten Kraftstoffen („Biokraftstoffen“) zu fossilen Kraftstoffen erfordert nicht nur Modifikationen an Motoren und Einspritzsystemen, sondern für eichrechtliche, steuerrechtliche und quotenrechtliche Zwecke auch eine Neumessung der Transporteigenschaften und des Energiegehaltes der neuen Mischkraftstoffe.

Flüssige Kraftstoffe werden im Handel in Volumeneinheiten bemessen. Auch steuerliche Belastungen

und quotenrechtliche Vorgaben werden auf eine Volumeneinheit bezogen. Um eine von der Mess-temperatur unabhängige Vergleichsgröße zu schaffen, werden alle volumenbezogenen Angaben auf eine Bezugstemperatur von 15 °C umgerechnet. Für alle Kraftstoffe muss deshalb das Dichte-Temperaturverhalten bekannt sein.

Die PTB hat deshalb Messapparaturen zur präzisen Messung der Dichte von Kraftstoffen und ihrer Temperaturabhängigkeit aufgebaut (s. Bild 6). Die Dichte kann in einem Temperaturbereich von -25 °C bis +50 °C mit einem speziell für diesen Zweck modifizierten elektronischen Dichtemessgerät mit einer Unsicherheit von 0,02 kg/m<sup>3</sup> gemessen werden.

Mit dieser Apparatur wurden Messungen an zahlreichen Kraftstoffen und Kraftstoffgemischen durchgeführt. Dazu wurden Mischungen von fossilen Kraftstoffen mit Biokraftstoffen im gesamten Mischungsbereich von 0 % Bioanteil bis 100 % Bioanteil hergestellt. Um die durch Biobeimischungen bewirkten Abweichungen in der Dichte in Relation zur Streuung von auf dem Markt erhältlichen Kraftstoffen setzen zu können, wurden zusätzlich 145 Proben von 18 deutschen Raffinerien gesammelt und ebenfalls vermessen (Bild 7). Dabei wurden sowohl Benzin-Ethanol-Kraftstoffe als auch Diesel-Biodiesel-Kraftstoffe und Heizöl-Biodiesel-Brennstoffe, jeweils in Sommer- und Winterqualität, berücksichtigt.

Die Ergebnisse (Bild 8) zeigen, dass die Streuung der Messdaten für Proben verschiedener Herkunft etwa



Bild 7: Von 18 verschiedenen deutschen Raffinerien gesammelte handelsübliche Kraftstoffproben

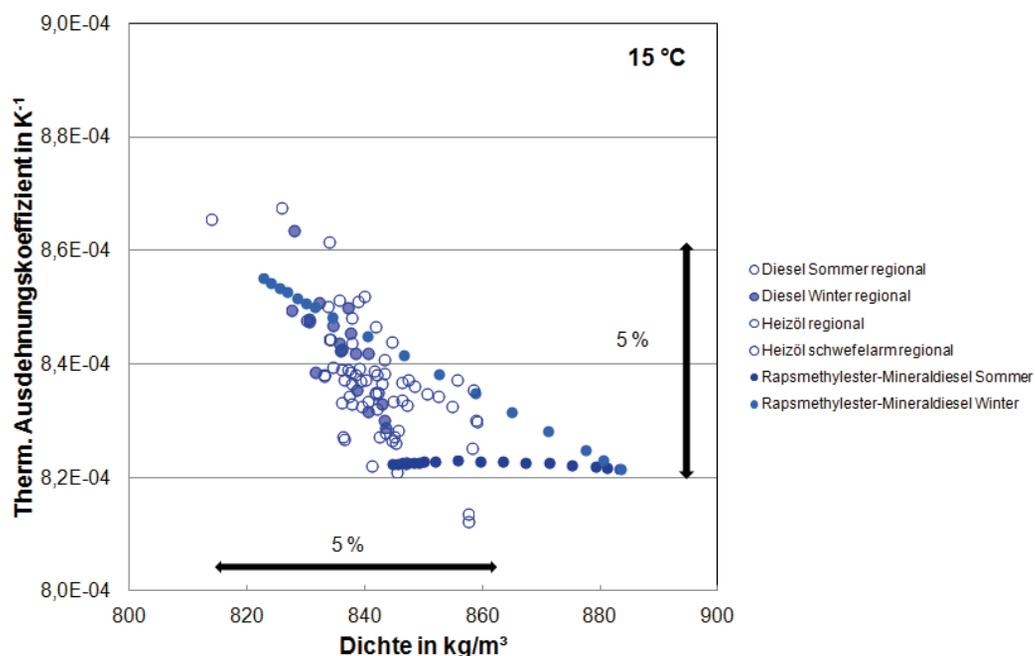


Bild 8: Streuung der Wertepaare Dichte – thermischer Ausdehnungskoeffizient für Proben verschiedener Herkunft verglichen mit der durch Beimischung von Biodiesel bewirkten Änderung von Dichte und thermischem Ausdehnungskoeffizienten

gleichgroß ist wie die Änderung der Dichte und des thermischen Ausdehnungskoeffizienten, wenn Bioanteile bis 30 % beigemischt werden. Bei Zuzuschungen bis 30 % ist deshalb keine Änderung der Eichvorschriften für die Umrechnung der gemessenen Volumen auf eine Zieltemperatur von 15 °C, die sogenannte Mengenumwertung, erforderlich.

### Internationale Harmonisierung

Im Jahr 2013 wurde ein metrologisches Verbundprojekt erfolgreich abgeschlossen, dessen Ziel es war, Referenzmessverfahren zur chemischen und physikalischen Charakterisierung von Biokraftstoffen der ersten Generation zu entwickeln und auf europäischer Ebene zu harmonisieren. Unter den 13 europäischen Partnern war die PTB durch die Abteilung 3 mit vier Arbeitsgruppen vertreten. Die Schwerpunkte lagen auf der Herkunftsermittlung von Biokraftstoffen, der harmonisierten Qualitäts-



Bild 9: Bombenkalorimeter zur Messung des Brennwertes von flüssigen Kraftstoffen

beurteilung und der quantitativen Ermittlung physikalischer Parameter.

Ein Schwerpunkt war die Harmonisierung der Brennwertmessung, die zurzeit noch mit drei Methoden ermittelt wird (Washburn-Korrekturen mit Bezug Standardbedingungen, DIN 51900 und ISO 1928). Die Stärken und Unterschiede dieser Methoden wurden erstmals mit Hilfe von Messunsicherheitsberechnungen herausgearbeitet.

Unter Federführung der PTB wurde auch in diesem Projekt das Dichte-Temperaturverhalten der Diesel-Biodiesel-Mischungen ermittelt. Die Untersuchungen zielten ebenfalls auf die Harmonisierung von unterschiedlichen Messmethoden bei drei europäischen Partnern ab.

Die internationale Harmonisierung wird durch die PTB auch in einer trilateralen Zusammenarbeit mit den metrologischen Staatsinstituten aus Frankreich und Brasilien mit dem Ziel, vor allem für alternative Kraftstoffe Messverfahren zu harmonisieren und Vergleichsmessungen durchzuführen, vorangetrieben.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de))

### Grundlagen der Metrologie

#### Grundlegende Verbesserung des Verfahrens der Standardaddition

Durch die vollständig neue mathematische Beschreibung der Standardaddition, des wichtigsten Verfahrens zur Kalibrierung einer chemisch-analytischen Messung innerhalb der Probenmatrix, wurde die Messunsicherheit von Elementgehalten in komplexen Proben um mindestens eine Größenordnung verringert. (O. Rienitz, FB 3.1, [olaf.rienitz@ptb.de](mailto:olaf.rienitz@ptb.de))

#### Universeller Standard zur Kalibrierung von Raman-Mikroskopen entwickelt

In der PTB wurde ein neuer Standard zur Kalibrierung von konfokalen Raman-Mikroskopen entwickelt. Hierzu wurden in Zusammenarbeit mit der der AG *Nanostrukturierung* auf einer gemeinsamen Substratoberfläche unterschiedliche periodische Strukturen vereinigt, die sowohl eine dimensionelle Kalibrierung der Proben-Positioniereinrichtung als auch eine Bestimmung der optischen Auflösung des Mikroskops ermöglichen. (S. Zakel, R. Stosch, FB 3.1, [rainer.stosch@ptb.de](mailto:rainer.stosch@ptb.de))

#### Neuer Ansatz zur quantitativen Bestimmung von Metallproteinen in klinischen Proben im Rahmen des EMRP-Projektes HLT05

Die Quantifizierung von Metallproteinen in klinischen Proben mittels der Metallionen ermöglicht die rückführbare Bestimmung intakter Proteine auch im Fall genetischer Variationen in der Aminosäuresequenz. (C. Swart, FB 3.1, [claudia.swart@ptb.de](mailto:claudia.swart@ptb.de))

#### Europäische Spektroskopie-Infrastruktur zur Messung molekularer Spektraldaten

In der AG 3.22 wird eine europäische Infrastruktur zur Messung von Spektraldaten aufgebaut, die auf einem hochauflösenden Fourier-Transform-Infrarot (FTIR)-Spektrometer für den infraroten Wellenlängenbereich (0,7  $\mu\text{m}$ –14  $\mu\text{m}$ ) basiert und eine spektrale Auflösung von bis zu 0,002  $\text{cm}^{-1}$  bietet und Messungen bei Temperaturen zwischen 220 K und 300 K und Drücken von >1 bar bis <0,1mbar anstrebt. Ein PTB-Bericht zum 1. Spektraldaten-Workshop wurde veröffentlicht („Spectral reference line data for atmospheric monitoring“, Proceedings of the EUMETRISPEC workshop, PTB-Bericht CP-8, ISBN 978-3-95606-034-2). (J. Brunzen-dorf, O. Werhahn, V. Ebert, FB 3.2, [volker.ebert@ptb.de](mailto:volker.ebert@ptb.de))

#### Neue 1,6-GPa-Druckmessmultiplikatoren

Zwei 1,6-GPa-Druckmessmultiplikatoren wurden entwickelt und gebaut. Durchgeführt wurden eine Machbarkeitsstudie für deren Betrieb bis zu 1,6 GPa, eine Parameteroptimierung ihrer Konstruktion und eine Vorhersage ihres Verhaltens mithilfe der Finite-Elemente-Analyse (FEA). Ihre Arbeits- und messtechnischen Eigenschaften wurden bei Drücken bis zu 500 MPa experimentell bestimmt. Die experimentellen und theoretischen Ergebnisse sind in einer angemessenen Übereinstimmung. Mit den bisher erzielten Ergebnissen wird eine relative Standardunsicherheit der Druckmessung bis zu 1,6 GPa voraussichtlich von nicht höher als  $2 \cdot 10^{-4}$  erwartet. Mit dieser Neuentwicklung wird der Bereich des Druckkalibrierdienstes in Europa bis zu 1,5 GPa erweitert werden. (W. Sabuga, FB 3.3, [wladimir.sabuga@ptb.de](mailto:wladimir.sabuga@ptb.de))

### Metrologie für die Wirtschaft

#### Metrologie für elektrochemische Energiespeichersysteme: Bestimmung des Lade- und Gesundheitszustandes von Lithium-Ionen-Batterien

Ein Referenzmessverfahren mit zwei temperaturkontrollierten, elektrochemischen Impedanzmessplätzen wurde realisiert. Der Messplatz dient dazu, den Lade- (state of charge, SoC) und Gesundheitszustand (state of health, SoH) von Lithium-Ionen-Batteriezellen anhand der gemessenen elektrochemischen Impedanzspektren zu beurteilen. (P. Spitzer, FB 3.1, [petra.spitzer@ptb.de](mailto:petra.spitzer@ptb.de))

### Metrologie für die Gesellschaft

#### Erfolgreicher Einsatz des neuen SEALDH-II-Laser-Hygrometers in der AIRTOSS-ICE Flugkampagne

SEALDH-II ist ein speziell für Flugzeugmessungen neu entwickeltes, absolutes (kalibrierfreies) „Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy“ (TDLAS)-Hygrometer zur genauen und schnellen Wasserkonzentrationsmessung in Luft. Es misst über vier Größenordnungen (2  $\mu\text{mol/mol}$  – 20000  $\mu\text{mol/mol}$ ), um insbesondere bei Wolkenuntersuchungen sehr große und schnelle  $\text{H}_2\text{O}$ -Variationen (>1000 ppm/sec) präzise und genau aufzulösen. SEALDH-II konnte im Jahr 2013 bereits über 30 Flugstunden im Rahmen der AIRTOSS-ICE-Kampagne (AIRcraft TOWed Sensor Shuttle) in einem Learjet 35A erfolgreich eingesetzt werden und lieferte dabei über die gesamte Flugdauer lückenlos 100 % aller Daten. (B. Buchholz, V. Ebert, FB 3.2, [volker.ebert@ptb.de](mailto:volker.ebert@ptb.de))

### **Laserspektrometrie für die Luftqualitätsüberwachung**

Die AG 3.22 entwickelte ein Laserspektrometer zur Bestimmung von CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Spuren in Reinstluft. Zur quantitativen Bestimmung der CO<sub>2</sub>- bzw. H<sub>2</sub>O-Anteile ist keine Kalibrierung des Spektrometers mit Prüfgasen notwendig (TILSAM-Methode). Das entwickelte Laserspektrometer ermöglicht nun die simultane Bestimmung beider Spezies als Verunreinigung von sogenannten Nullgasen, die in der Luftqualitätsüberwachung, u. a. der Bundesländer, von Bedeutung sind. Der Messbereich des in der AG 3.22 aufgebauten Spektrometers reicht bis weit unter diese spezifizierten Nullgas-Grenzwerte bis in den Sub-ppm-Bereich für CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O. (A. Pogany, O. Werhahn, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

### **Internationale Vergleichsmessung von Airborne-Hygrometern an der Wolkensimulationskammer AIDA des KIT Karlsruhe (AquaVIT2)**

Im April 2013 fand – eingebettet in EMRP-Projekt ENV07 – der zweite internationale Vergleich zwischen den wichtigsten weltweit eingesetzten Airborne-Hygrometern statt. Zur Sicherung einer metrologischen Rückführung wurden von der PTB ein rückgeführter 2P-1T-Feuchtegenerator und ein Tauspiegel-Hygrometer vor Ort betrieben. Damit wurde den Teilnehmern aus den Forschergruppen u. a. des NOAA, NCAR, Princeton University, Harvard University, University of Colorado, University of Szeged, UK MetOffice, Forschungszentrum Jülich, DWD, FAAM/NCAS sowie des KIT erstmalig während so einer Vergleichskampagne die Möglichkeit geboten, sowohl die Kalibrierquellen als auch die Hygrometer an die weltweit einheitliche metrologische Feuchteskala anzuschließen. (N. Böse, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

### **Metrologie für die laserspektroskopische Luftqualitätsüberwachung in Reinräumen**

Die AG 3.22 hat die Arbeit an einem neuen EMRP-Projekt aufgenommen, um neue Messtechniken für die Überwachung schwächster molekularer Kontaminationen in Reinräumen zu untersuchen. Zusammen mit Partnern aus den Metrologieinstituten Finnlands, Großbritanniens, Italiens, den Niederlanden und Tschechiens sollen insbesondere laserspektrometrische Verfahren auf ihre Tauglichkeit für die Reinraumluftüberwachung hin geprüft werden. (A. Rausch, O. Werhahn, V. Ebert, FB 3.2 volker.ebert@ptb.de)

### **Erfassung der Spurenfeuchte in Methan, Ethan und Propan mittels eines laseroptischen Hygrometers**

Die AG 3.22 hat für das EMRP-Projekt „GAS“ ein Laser-Hygrometer aufgebaut und optimiert, das Spuren von Wasser in Erdgas und anderen Energiegasen messen

kann. Das Hygrometer kann Wasseranteile von wenigen µmol/mol (ppm) messen und wurde erfolgreich mit dem primären coulometrischen Feuchte-(in-Methan)-Generator der PTB-AG 3.21 für Gasdrücke bis etwa 5 bar validiert. (J. Nwaboh, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

### **In-situ-Restgasquantifizierung mittels Diodenlaser-Absorptionsspektroskopie**

Für ein AiF/FVV-gefördertes Projekt wurden Infrarot-Laserspektrometer entwickelt, die eine Optimierung von Systemen zur Abgasrückführung und der zugehörigen Simulationsmodelle von Verbrennungsmotoren unterstützen. Dafür ermöglicht das Spektrometer eine probenahme-freie und gleichzeitig extrem schnelle Messung (33 µs pro Messwert) von H<sub>2</sub>O-Konzentrationen direkt im Brennraum der Motoren. In Kooperation mit der Universität Duisburg-Essen und der TU Darmstadt wurden Messungen an zwei optischen Glasmotoren und einem Vollmetall-Serienmotor realisiert. (O. Witzel, A. Klein, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

### **Erfolgreicher Abschluss des EMRP-Projektes ENG01 „Energy Gases“**

Das EMRP-Projekt ENG01 „Energy Gases“ wurde erfolgreich abgeschlossen. In der AG 3.21 wurde im Rahmen dieses Projektes ein Primärgenerator auf der Basis eines coulometrischen Feuchtegenerators aufgebaut und erfolgreich mit Methan (CH<sub>4</sub>) als Trägergas betrieben und validiert. Der Generator wird dazu beitragen, die Schwierigkeiten bei rückgeführten Feuchtemessungen in der Erdgas fördernden und verarbeitenden Industrie deutlich zu reduzieren und damit die Messgenauigkeit zu erhöhen. AG 3.21 plant, diesen Service in Zukunft im Leistungsverzeichnis der PTB anzubieten. (S. Pratzler, N. Böse, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

### **Entwicklung und Einsatz eines Rußaerosolstandards für die Partikel- und Aerosoldiagnostik**

Für ein Industrieprojekt wurden am neuen PTB-Rußaerosolstandard erfolgreiche Messungen zur Korrelation zwischen Aerosoltrübungskoeffizienten, Aerosolmassendichte und Streulichtintensität über einen weiten Bereich von Rußaerosolparametern durchgeführt. Ein umfangreicher Vergleich mit neuen, streulichtbasierten Rußsensoren mit dem PTB-Referenzverfahren lieferte – je nach Streulichtgerät – gute bis sehr gute Korrelationskoeffizienten. (A. Nowak, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

### **Aufbau einer Infrastruktur zur Rückführung von Kondensationspartikelzählern**

Für das EMRP-Projekt ENV02 „PartEmission“ wurde in der seit 01.10.2013 eigenständigen Aerosol-Arbeitsgruppe (AG 3.23) eine Infrastruktur zur Zählung von

Rußpartikeln implementiert. Dazu wurden Untersuchungen zur Stabilität des Rußaerosolstandards hinsichtlich der Partikelanzahl und -größe des erzeugten Aerosols durchgeführt, sodass auch die genauen Anforderungen eines Partikelanzahlnormals definiert werden konnten. (A. Nowak, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

### **Erfolgreiches Kick-Off-Meeting für die Revision der OIML R126 „Evidential Breath Analyzers“ von 2012**

Nach Übernahme des Co-Sekretariats für OIML TC 17/SC 7 „Breath alcohol analyzers“ durch die PTB fand am 22. und 23. Oktober in der PTB Berlin das Kick-Off-Meeting statt. Mit Teilnehmern aus 12 Ländern war dieses Meeting überaus erfolgreich.

Dem erklärten Ziel, die OIML R126 so weiterzuentwickeln, dass eine wesentlich größere länderübergreifende Akzeptanz als bisher erreicht werden kann, ist man mit den beschlossenen strukturellen Änderungen bereits einen großen Schritt näher gekommen. (R. Klüß, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

### **Aufbau einer Messapparatur zur Messung der Dichte von Seewasser unter Druck mit einer Messunsicherheit von 0,02 kg/m<sup>3</sup>**

Im Rahmen des Europäischen Metrologieforschungsprogramms EMRP wird im gemeinsamen Forschungsprojekt ENV05 die Möglichkeit der Rückführung der Salinität von Seewasser auf die Dichte erforscht. Die Salinität von Seewasser wird üblicherweise durch Leitfähigkeitsmessungen ermittelt. Dabei dient als Referenz das aus dem Atlantik gewonnene sogenannte Standardseewasser. Standardseewasser gilt zwar als zuverlässige, kurzzeitstabile Referenz, die Stabilität der Zusammensetzung über Dekaden, die beim Vergleich von Langzeitmessreihen erforderlich ist, ist aber metrologisch nicht gesichert. Da ein wesentliches Ziel der Salinitätsmessung die Dichtebestimmung von Seewasser ist, kann eine Rückführung auf die Dichte die Anbindung an das SI und damit eine Vergleichbarkeit über sehr lange Zeiträume ermöglichen. (H. Schmidt und H. Wolf, FB 3.3, hannes.schmidt@ptb.de, henning.wolf@ptb.de)

### **13. BAM-PTB-Kolloquium 2013 in Braunschweig**

Am 18. und 19. Juni 2013 richtete die PTB das 13. BAM-PTB-Kolloquium zur chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik in Braunschweig aus. An der im dreijährigen Rhythmus im Wechsel in Berlin und Braunschweig stattfindenden Tagung nahmen 162 Explosionsschutz-Experten aus Deutschland, den Niederlanden und der Schweiz teil. (T. Stolz, FB 3.4, thomas.stolz@ptb.de)

### **Sicherheitstechnische Kenngrößen von Alkohol/Luft-Gemischen: Explosionsdruck, zeitlicher Druckanstieg, Verbrennungsgeschwindigkeit**

Der maximale Explosionsdruck, der maximale zeitliche Druckanstieg und die Verbrennungsgeschwindigkeit dienen als Grundlage für Explosionsschutzmaßnahmen wie explosionsdruckfeste oder explosionsdruckstoßfeste Bauweise, Explosionsdruckentlastung und Explosionsunterdrückung. Für Methanol, Ethanol, 2-Propanol, 2-Butanol und 1-Pentanol wurden die sicherheitstechnischen Kenngrößen Explosionsdruck und zeitlicher Druckanstieg, die Druckabhängigkeit für Drücke kleiner 1 bar und die Temperaturabhängigkeit für Temperaturen bis 100 °C untersucht. (E. Brandes, FB 3.4, elisabeth.brandes@ptb.de)

### **Zündtemperaturen brennbarer Flüssigkeiten in Abhängigkeit von der Umschließung**

Die sicherheitstechnische Kenngröße Zündtemperatur – definiert unter anderem in der DIN EN 14522 [1] – ist Grundlage für die Einteilung von Stoffen und explosionsgeschützten Geräten in Temperaturklassen. Sie wird vielfach als Parameter für das sichere Betreiben chemischer Verfahren oder industrieller Prozesse herangezogen. Bei Untersuchungen hat sich gezeigt, dass bestimmte Substanzen im geschlossenen Gefäß bei 1 bar eine signifikant tiefere Entzündungstemperatur zeigen als in der Normapparatur. (E. Brandes, FB 3.4, elisabeth.brandes@ptb.de)

### **Einführung des internationalen „PTB Ex Proficiency Testing Scheme“ für Vergleiche zwischen Ex-Laboratorien**

Nach erfolgreichem Abschluss der Pilotphase der Ex-Ringvergleichsprogramme „Explosionsdruck“ und „Eigensicherheit“, hat die PTB als Provider zwei weitere Programme entwickelt und im Rahmen des „PTB Ex Proficiency Testing Scheme“ für die internationalen Ex-Laboratorien angeboten. Durch die neuen Programme „Zünddurchschlag“ und „Temperaturklassenbestimmung“ konnte die Anzahl der Teilnehmer noch einmal erhöht werden. Mittlerweile sind 61 Ex-Laboratorien aus 28 Ländern in dem „PTB Ex Proficiency Testing Scheme“ involviert. (T. Krause, FB 3.5, tim.krause@ptb.de)

### **Aus dem Ex-Dienst® wird Ex-Network e.V.**

Der Ex-Dienst, der seit 2003 erfolgreich die verschiedenen im Explosionsschutz tätigen Gruppen verknüpft, wird jetzt als gemeinnütziger Verein Ex-Network e.V. weitergeführt. Damit wollen die Gründungsorganisationen (u. a. die PTB und die Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie, NAMUR), zusätzliche Optionen zur Förderung der Wissenschaft

und Forschung im Explosionsschutz ermöglichen. (U. Klausmeyer, FB 3.5, uwe.klausmeyer@ptb.de)

### **Untersuchung von sicherheitsrelevanten Zündprozessen**

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) hat die Förderung der Forschergruppe FOR1447 „Safety Relevant Ignition Processes“ für die zweite Förderperiode bewilligt. Die beteiligten Wissenschaftler der PTB, der Universität Magdeburg und des Karlsruher Instituts für Technologie widmen sich der Entwicklung eines physikalisch-chemisch basierten numerischen Modells zur Beschreibung von Zündvorgängen von brennbaren Gasen. Die Wechselwirkungen der verschiedenen Transportprozesse mit chemischen Reaktionen bei verschiedenen Zündprozessen umfasst mehrere Zeit- und Längenskalen, sodass ein multidisziplinärer Ansatz notwendig ist, der die Erfahrungen der beteiligten Institute vereint. (D. Markus, FB 3.5, detlev.markus@ptb.de)

### **Heino Bothe mit dem IEC 1906 Award ausgezeichnet**

Die internationale Normungsorganisation IEC (International Electrotechnical Commission) hat Direktor und Professor Dr. Heino Bothe für seine herausragenden Leitungstätigkeiten in der internationalen Normung und sein Expertenwissen mit dem IEC 1906 Award 2013 ausgezeichnet. (M. Beyer, FB 3.7, michael.beyer@ptb.de)

### **Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Oberschwingungsverluste (explosionsschutzter) permanentmagneterregter Synchronmaschinen**

Neben den Grundschwingungsverlusten treten bei frequenzumrichter gespeisten permanentmagneterregten Synchronmaschinen Oberschwingungsverluste auf, welche in den Stator- und Rotorblechen sowie in den Rotormagneten lokalisiert sind. Eine Reduktion dieser Verluste ist sowohl unter Erwärmungs- als auch unter Energieeffizienzgründen erstrebenswert. Ein Parameter mit Einfluss auf die Verluste innerhalb der Magnete ist dabei die Teilung der Magnete auf der Rotoroberfläche in einzelne Segmente. (C. Lehrmann, FB 3.7, christian.lehrmann@ptb.de)

### **Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung von heißen Oberflächen in Reibkontakten in Abhängigkeit der Konstruktionswerkstoffe**

Heiße Oberflächen stellen eine bedeutende Zündquellenart in Reibsituationen dar. Mittels eines Stift/Scheibe-Kontaktes wurde eine Reibsituation modelliert, in der die Temperaturentwicklung und Temperaturverteilung relevanter Konstruktionswerkstoffe untersucht wurde. (L. Meyer, FB 3.7, lennart.meyer@ptb.de)

### **Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von metallischen Reibkontakten in explosionsfähigen Gas- und Dampf-Luft-Gemischen**

Die Einteilung explosionsgeschützter mechanischer Geräte erfolgt auf Grundlage der Temperaturklassen und Explosionsgruppen. Durch Untersuchungen sollte festgestellt werden, ob diese Einteilung möglich und zweckmäßig ist. (L. Meyer, FB 3.7, lennart.meyer@ptb.de)

### **Sicherheitstechnische Schlussfolgerungen zur Zündwirksamkeit von Ultraschall**

Im Rahmen der Neubewertung der Zündquelle Ultraschall ist es gelungen, neue Grenzwerte zu erarbeiten, die in die europäischen Regelwerke der Sicherheitstechnik eingehen werden. Dies erfolgte auf Grundlage der Ergebnisse von theoretischen Überlegungen, experimentellen Untersuchungen und in Abstimmung mit am Forschungsprojekt beteiligten Herstellern von Ultraschallgeräten und Berufsgenossenschaften sowie der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. (L. H. Simon, FB 3.7, lars.h.simon@ptb.de)

### **Bestimmung der elektrostatischen Aufladbarkeit von Isolierstoffen ohne experimentelle Aufladepfung**

Es ist bekannt, dass Stoffe sich nicht elektrostatisch aufladen lassen, wenn ihr Oberflächenwiderstand, gemessen bei 500 V, einen bestimmten Grenzwert nicht überschreitet. Bisher mussten Stoffe mit einem höheren Grenzwert experimentell auf ihre Aufladbarkeit geprüft werden. Die PTB hat festgestellt, dass dies nicht erforderlich ist, wenn man den Oberflächenwiderstand bei 10000 V mit einer Spezialelektrode bestimmt. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)

### **Patent Vermeidung elektrostatischer Aufladbarkeit**

Die PTB hat ein Verfahren entwickelt, mit dem praktisch ohne Mehrkosten jedes Kunststoffmaterial antistatisch gemacht werden kann. Das Verfahren beruht auf der Beobachtung, dass spiegelglatte Oberflächen nicht elektrostatisch aufgeladen werden können, wenn Silikonöl als Entformungsmittel verwendet wird. Inzwischen hat die PTB ein Patent auf dieses Verfahren erhalten. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)

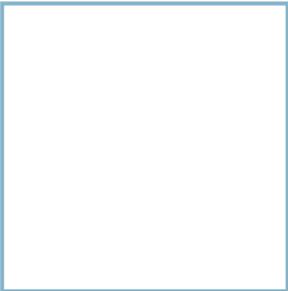
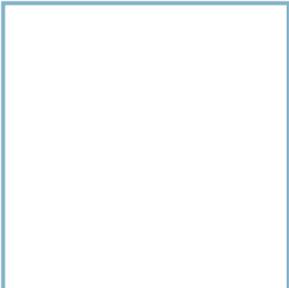
### **Internationale Zusammenarbeit**

#### **Hohe Auszeichnung für Braunschweiger Wissenschaftler der PTB**

Am 18.4.2013 wurde im Festsaal der ungarischen Akademie der Wissenschaften in Budapest der Helmut Krämer Award an den PTB-Mitarbeiter Dr. Ulrich von Pidoll verliehen. Der Preis gilt als der höchste Preis auf dem Fachgebiet der Elektrostatik. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)

# Abteilung 4

## Optik



Optik, optische Technologien und Photonik stellen für die Gesellschaft des 21. Jahrhunderts unverzichtbare Schlüsseltechnologien für die Lösung der großen Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft bereit. Die Abteilung *Optik* der PTB richtet ihre Forschungs- und Entwicklungsaufgaben daher daran aus, diese Schlüsseltechnologien für die zukünftigen metrologischen Dienstleistungen optimal nutzbar zu machen. Die Abteilung *Optik* der PTB konzentriert ihre Forschungs-, Entwicklungs- und Dienstleistungsaufgaben auf die Metrologie in den Bereichen *Länge und dimensionelle Metrologie*, *Radiometrie und Photometrie* und *Zeit und Frequenz*. Die Abteilung stellt die zu den Themenbereichen zugehörigen drei Basiseinheiten des internationalen Einheitensystems Candela, Meter und Sekunde dar und gibt diese und die davon abgeleiteten Einheiten mit angemessener Unsicherheit an ihre Kunden weiter. Seit Beginn 2013 organisiert die Abteilung ihre Arbeit in den vier Fachbereichen *Photometrie und angewandte Radiometrie*, *Bild- und Wellenoptik*, *Längeneinheit und Quantenoptik* und *Zeit und Frequenz*. Zusätzlich ist aus der Kooperation mit der Leibniz Universität Hannover (LUH) im Rahmen des Exzellenzclusters *Center for Quantum Engineering and Space-Time Research (QUEST)* das *QUEST-Institut an der PTB* hervorgegangen. Im Folgenden werden wichtige Ergebnisse und besondere Entwicklungen des vergangenen Jahres aus den vier Fachbereichen der Abteilung *Optik* und dem *QUEST-Institut an der PTB* vorgestellt.

### Photometrie und angewandte Radiometrie

Der Fachbereich *Photometrie und angewandte Radiometrie* realisiert neben der photometrischen Basiseinheit Candela unterschiedliche optische Einheiten und Messgrößen der verschiedenen, eng miteinander verknüpften radiometrischen und photometrischen Einheiten im Wellenlängenbereich von 200 nm bis 2500 nm und gibt sie mit kleiner Unsicherheit an die jeweiligen Nutzer weiter. Der Fachbereich stellt sich in seinen Forschungsschwerpunkten den großen Herausforderungen vorzugsweise im Bereich Energie und Umwelt; Schwerpunkte sind gegenwärtig die Photometrie neuartiger Lichtquellen, die Spektroradiometrie von Strahlern im Spektralbereich von 200 nm bis 2500 nm und die Metrologie von Solarzellen.

Titelbild:

In der PTB entwickeltes Normal für Höchstleistungsleuchtdioden

Bei den neuen Lichtquellen stoßen Leuchtdioden (LEDs) mehr und mehr auch in Anwendungsbe-reiche vor, wo ein hoher Lichtstrom von mehreren tausend Lumen gefordert wird, und ersetzen dort weniger effiziente klassische Lichtquellen. Neben der Energieeffizienz muss für die unterschiedlichen Anwendungen die „Qualität des Lichtes“ z. B. durch farbmetrische Kennzahlen quantifiziert werden. Um den Nutzern diese Aufgabe zu erleichtern und mit Substitutionsmethoden kleinste Unsicherheiten zu erreichen, hat die PTB Transfornormale entwickelt (s. Titelbild), die hinsichtlich Leistung und anderen Parametern den zu untersuchenden Quellen möglichst ähneln (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Der starke Ausbau von Photovoltaikanlagen in Deutschland im Rahmen der Energiewende erfordert eine neue anwendungsnahe Messtechnik, die den Bedürfnissen der Nutzer entgegenkommt. Besondere Bedeutung kommt dabei der Bestimmung des Wirkungsgrads von Modulen im praktischen Betrieb über zwei und mehr Dekaden zu. Dabei unterscheiden sich die Messanforderungen im Außenbereich gravierend von Labormessungen, da bei den ersten die Einflüsse der Umgebung quantitativ berücksichtigt werden müssen. Zur Untersuchung dieser Einflussfaktoren wurde in der PTB ein neuartiger Messplatz für Outdoormessungen entwickelt (s. Bild 1).

Mit dem Messplatz ist es jetzt möglich, den Kurzschlussstrom von Referenzsolarzellen unterschiedlichen Typs unter Standardtestbedingungen zu mes-

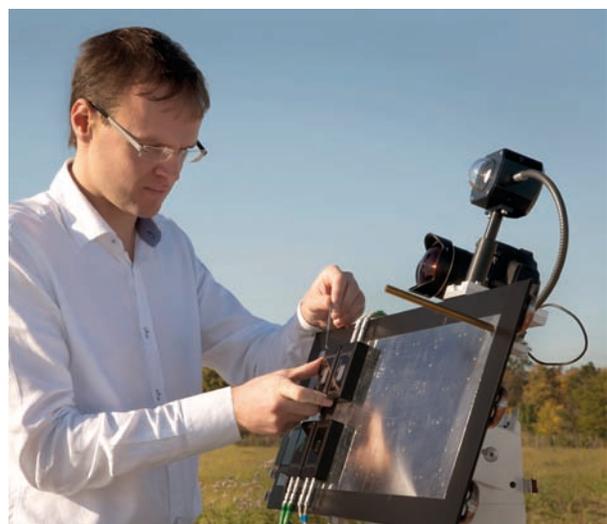


Bild 1: Neuentwickelter Outdoormessplatz der PTB mit montierten gefilterten und ungefilterten Referenzsolarzellen. Die Messebene wird dem Sonnenstand nachgeführt und Umgebungsbedingungen und zeitlich fluktuierende Bestrahlungsstärke werden gleichzeitig gemessen.



Bild 2: Organische Solarzelle

sen, mit wohlcharakterisiertem Sonnenspektrum, genau bestimmter Bestrahlungsstärke und Temperatur. Die Untersuchungen an dem neuen Messplatz zeigten, dass das bisher allgemein benutzte Verfahren, bei dem die Kurzschlussströme auf einen Referenzwert von 1 kW skaliert werden, nicht ausreicht. Insbesondere wenn Referenzzellen und Prüfling sich in ihrer spektralen Empfindlichkeit unterscheiden, wie z. B. bei den neuen organischen Solarzellen (s. Bild 2), liefert die gleichzeitige Messung des

Sonnenspektrums gegenüber dem üblichen Berechnungsverfahren verlässlichere Werte.

Für die neuen industriellen Anforderungen für Solarmodule sind die bisher im Rahmen der weltweiten Photovoltaic Scale eingeführten gekapselten Referenzsolarzellen mit einer Größe von  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$  Fläche oftmals zu klein. In dem von der Europäischen Gemeinschaft geförderten „PRECISE“-Projekt mit dem Institut für Solarforschung Hameln

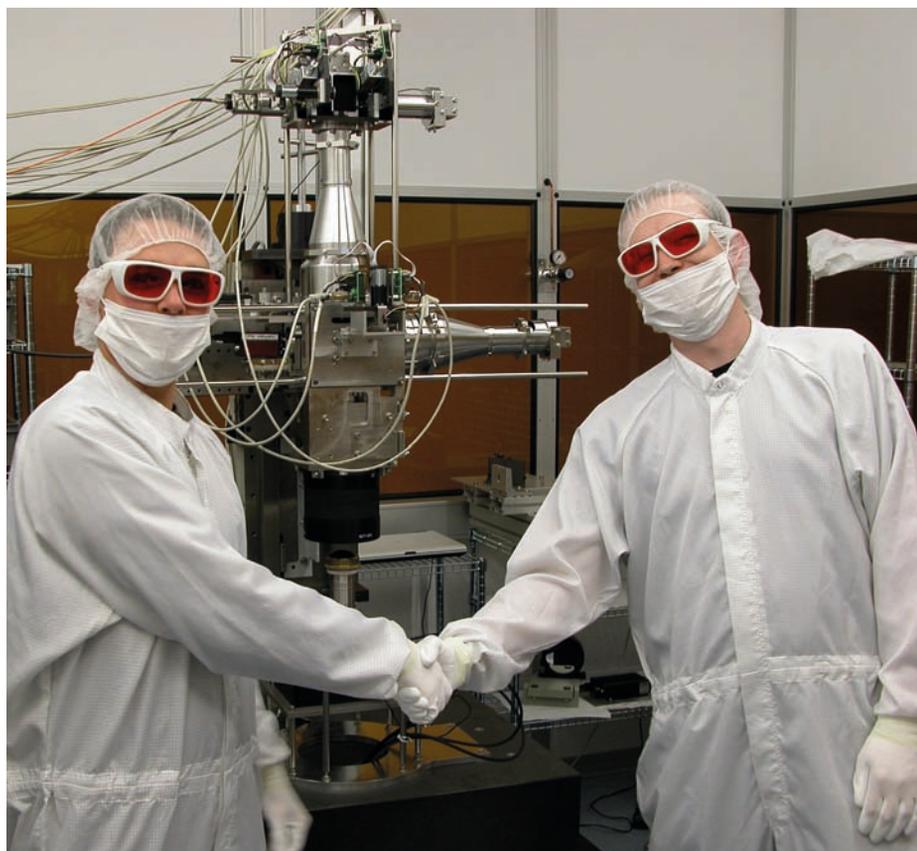


Bild 3: Übergabe des Prototyps eines neuen Asphärenmessgerätes auf der Basis eines Tilted Wave Interferometers, das in einer Zusammenarbeit zwischen PTB, einem Messgerätehersteller und einem Universitätsinstitut entwickelt und charakterisiert wurde

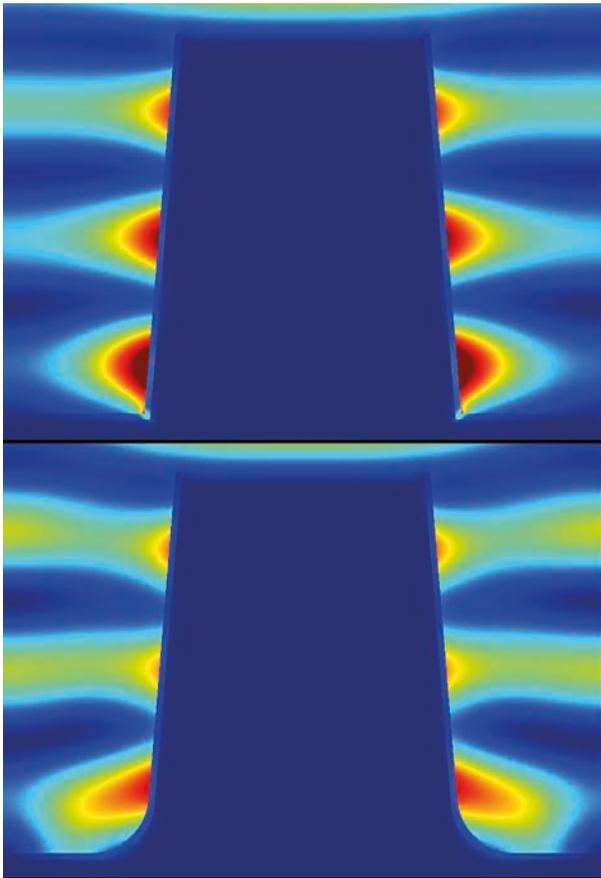


Bild 4: Berechnete Verteilung der elektrischen Feldstärke bei senkrechter Einstrahlung von p-polarisierter Strahlung bei 266 nm auf ein Si-Gitter mit einer Stegbreite von 300 nm, einer Höhe von 370 nm und 5 nm Oxidschicht. Die Feldstärkeverteilungen für ein einfaches Trapezmodell ohne (oben) und mit zusätzlicher Kantenverrundung am Boden des Strukturprofils (unten) unterscheiden sich signifikant.

wurde nun ein laserbasierter Messplatz zur primären Kalibrierung von großflächigen Solarzellen und Rückkontaktsolarzellen (s. Jahresbericht 2012) aufgebaut, mit dem die spektrale Empfindlichkeit großer Standard-Industriesolarzellen mit etwa fünfzigmal größerer Fläche primär kalibriert werden. Damit ist zukünftig auch die Kalibrierung von großflächigen Referenzsolarzellen für Kunden möglich.

### Bild- und Wellenoptik

Moderne Abbildungsoptiken höchster Qualität basieren zunehmend auf asphärischen optischen Komponenten, weil damit sehr viel kleinere optische Baugruppen bei gleichzeitiger Verbesserung der optischen Abbildung realisiert werden können. Für die Metrologie stellen die damit erforderlichen rückgeführten Form- und Strukturmessungen mit (Sub-) Nanometergenauigkeit an optischen Funktionsflächen eine neue Herausforderung dar, da eine einfache Plan- oder Kugelwelle nicht mehr ausreicht, um einen Prüfling zu vermessen. Im Rahmen eines

europäischen Metrologieprojektes wurde daher gemeinsam mit dem Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart und einem Messgerätehersteller ein sogenanntes Tilted-Wave-Interferometer entwickelt und charakterisiert (Bild 3). In diesem Messgerät werden verschieden zueinander verkippte Wellenfronten erzeugt, wovon jede einzelne einen passenden Teil der gekrümmten Oberfläche beleuchtet. Aus einer Kombination der Interferogramme für die einzelnen Wellenfronten wird dann die Form des Prüflings rekonstruiert. Gemeinsam mit dem Fachbereich *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* in der PTB-Abteilung *Medizinphysik und metrologische Informationstechnik* wurde eine Empfindlichkeitsanalyse der Asphärenmessung im Tilted-Wave-Interferometer durchgeführt, die die Leistungsfähigkeit des Instrumentes belegt.

Die relativ große Wellenlänge der optischen Strahlung, die immer noch vorteilhaft zur Charakterisierung von Mikro- und Nanostrukturen benutzt wird, stellt wegen der begrenzten Auflösung eine dauerhafte Herausforderung an die optische Messtechnik dar. Daher werden zur Umgehung der beugungsbegrenzten Auflösung nichtabbildende scatterometrische Verfahren benutzt, mit denen aus dem von nanostrukturierten Objekten gestreuten Licht geometrische und optische Eigenschaften der zugrundeliegenden Strukturen bestimmt werden. Allerdings müssen dazu Modellannahmen für die Beschreibung der untersuchten Strukturen gemacht werden. In der PTB wurde jetzt speziell der Einfluss des verwendeten Strukturmodells einer eindimensionalen Silizium-Gitterstruktur sowie der Effekt einer endlichen Beleuchtungsfleckgröße auf die im Scatterometer gemessenen Beugungsordnungen untersucht. Die berechnete Verteilung der elektrischen Feldstärke unterscheidet sich deutlich, je nach Verrundung des Fußes der Kantenstruktur (Abb. 4). Die sichtbaren Unterschiede der berechneten Feld-

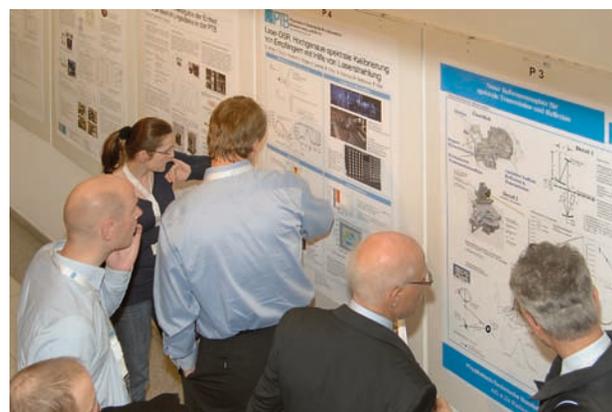


Bild 5: 2013 wurde die Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik in der PTB durchgeführt.

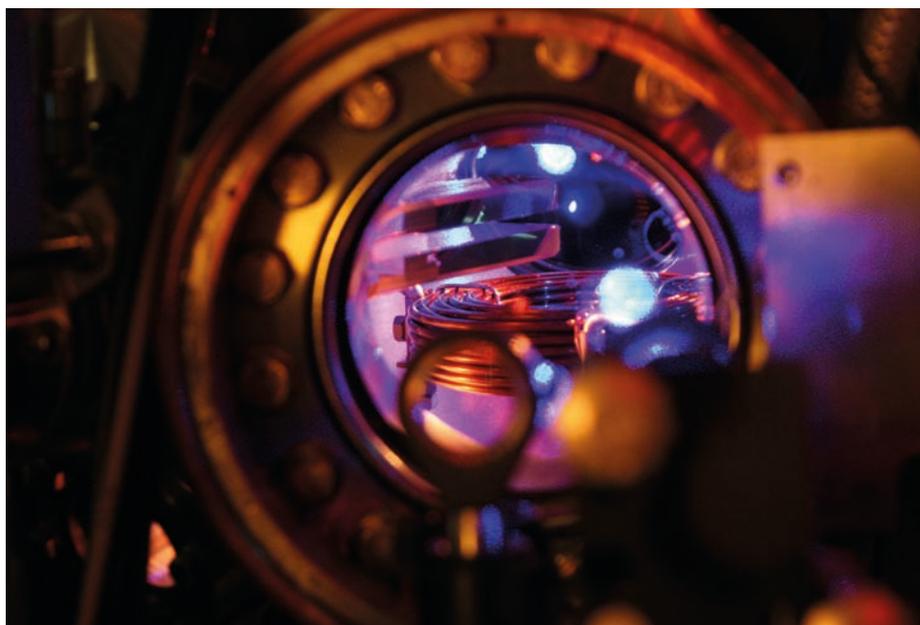


Bild 6: Blick in die Vakuumkammer der optischen Sr-Gitteruhr, in der die Strontiumatome gefangen und abgefragt werden, mit der im oberen Teil erkennbaren blau fluoreszierenden Atomwolke mit einer Temperatur von wenigen Millikelvin

stärkeverteilung führen zu stark unterschiedlichen Beugungseffizienzen im Scatterometer, die ihrerseits im Vergleich mit den Berechnungen zur quantitativen Analyse der Strukturen benutzt werden.

In diesem Jahr wurde vom Fachbereich *Bild- und Wellenoptik* die Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO) in Braunschweig mit 270 Teilnehmern durchgeführt (Bild 5). Die Gelegenheit zu Laborbesuchen in der PTB und die Plenarvorträge über die geplanten Änderungen am Internationalen Einheitensystem und die herausfordernden Messungen zu Naturkonstanten wurden gerne wahrgenommen.

### Quantenoptik und Längeneinheit

Der Fachbereich stellt ausgesuchte Wellenlängen- und Frequenznormale vom optischen bis in den röntgenoptischen Bereich bereit, die die Rückführung auf die Einheit Meter im Internationalen Einheitensystem erlauben. Im Fachbereich werden neuartige Methoden der Längenmessung über die Weitergabe von optischen Wellenlängen und Frequenzen entwickelt. In diesem Jahr wurde eine neue Methode zur Zeit- und Frequenzübertragung über Telekommunikationsfasern untersucht. Das Verfahren überträgt eine zeitlich veränderliche Frequenz, die an beiden Enden der Übertragungsstrecke gleichzeitig gemessen wird. Die Auflösung betrug auf einer Teststrecke von Braunschweig nach Hannover etwa 200 ps. Mit der erreichten Genauigkeit können jetzt satellitengebundene Zeitvergleiche mit einer unabhängigen Methode überprüft werden.

Im Fachbereich werden Frequenznormale entwickelt, die zukünftig auch als optische Uhren eine

weiter verbesserte Zeit- und Frequenzdarstellung erlauben. Aufgrund ihrer hohen optischen Frequenz, die um etwa fünf Größenordnungen über den heute für die Zeitmessung und Zeitverteilung benutzten Frequenzen im Mikrowellenbereich liegen, sind optische Uhren hinsichtlich ihrer Stabilität den besten Mikrowellenuhren um Größenordnungen überlegen. Gegenwärtig werden auch in der PTB zwei unterschiedliche Wege für die optischen Atomuhren verfolgt: die Abfrage von gespeicherten ultrakalten Atomensembles oder von einzelnen Ionen in einer Radiofrequenzfalle.

In diesem Jahr konnte bei der optischen Gitteruhr der PTB, in der ultrakalte Strontiumatome in einem optischen Gitter gespeichert werden (s. Bild 6), die abgeschätzte relative Unsicherheit um einen Faktor fünf auf  $3 \cdot 10^{-17}$  reduziert werden. Die optische Frequenz wurde gemeinsam mit dem Fachbereich *Zeit und Frequenz* zu 429 228 004 229 873.13(17) Hz durch Vergleich mit den beiden Caesium-Fontänenuhren der PTB bestimmt. Die Unsicherheit dieses Frequenzwerts ist jetzt nur noch durch die Realisierungsunsicherheit der beiden primären Normale (Caesium-Fontänenuhren) begrenzt.

### Zeit und Frequenz

Auch die im Fachbereich *Zeit und Frequenz* entwickelte optische Uhr auf der Basis eines gespeicherten Ytterbium-Ions wurde im Berichtszeitraum wesentlich verbessert und dabei eine abgeschätzte relative Unsicherheit von  $1 \cdot 10^{-17}$  erreicht. Damit hat die PTB jetzt zwei unterschiedliche optische Uhren zur Verfügung, mit denen das Frequenzverhältnis der Yb<sup>+</sup>- und Sr-Referenzübergänge mit einer relativen Unsicherheit von weniger als  $5 \cdot 10^{-17}$  bestimmt werden



Bild 7: Mobile Zweiweg-Messeinrichtung des russischen Instituts VNI-IFTRI mit transportablen Sende- und Empfangseinrichtungen zur Kalibrierung der Zeitübertragung über geostationäre Satelliten bei einer Messkampagne mit der PTB

soll. Wenn solche Messungen über einen längeren Zeitraum wiederholt werden, können sie beispielsweise Auskunft darüber geben, wie zeitlich konstant die Naturkonstanten sind. Dazu werden die beiden optischen Uhren durch zwei ca. 300 m lange weglängenstabilisierte Glasfaserstrecken verbunden, die in unterschiedlichen Frequenzbereichen arbeiten (344 THz und 193 THz). Es wurde nachgewiesen, dass diese Vergleiche nicht durch die Instabilität der optischen Frequenzübertragung negativ beeinflusst werden.

Neben ihrer Aufgabe der Verbreitung der gesetzlichen Zeit in Deutschland trägt die PTB maßgeblich zur koordinierten Weltzeit (UTC) bei. Die PTB führt dazu Zeit- und Frequenzvergleiche ihrer primären Uhren über Satelliten mit Uhren in aller

Welt durch (s. Bild 7). 2013 hat die PTB ihre Fontänenuhren CSF1 und CSF2 für einen mehrwöchigen koordinierten Vergleich mit neuentwickelten Uhren im chinesischen, indischen und russischen metrologischen Staatsinstitut eingesetzt. Die Messungen lassen erwarten, dass diese Uhren bald regelmäßig zu UTC beitragen werden.

Die Instabilität von interkontinentalen Zeit- und Frequenzvergleichen ist durch die auf geostationären Telekommunikationssatelliten verfügbare Bandbreite begrenzt. In einer dreimonatigen Testphase zwischen Japan und Deutschland wurde ein im NICT (Japan) entwickeltes Verfahren erprobt, bei dem die Trägerphase der Mikrowellenverbindung ausgewertet wird. Mit dem Verfahren konnte die statistische Messunsicherheit von Frequenzver-



Bild 8: Mitarbeiter des Instituts für Experimentelle Quantenmetrologie des QUEST-Instituts an der PTB zusammen mit Gästen der LUH und des Max-Planck-Instituts für Kernphysik (Heidelberg)

gleichen bei einer Mittelungszeit von einer Stunde um einen Faktor 20 reduziert werden. Im Rahmen dieser Experimente konnte erstmalig ein Vergleich zweier optischer Sr-Gitteruhren (von NICT und PTB) über eine Satellitenverbindung durchgeführt werden.

### QUEST-Institut an der PTB

Die Forschungsschwerpunkte am *QUEST-Institut an der PTB* (Bild 8) beinhalten die Entwicklung spektroskopischer Methoden, neuartiger Technologien zur Speicherung und Manipulation von einzelnen Ionen für Präzisionsmessungen sowie die Entwicklung von Atomuhren der nächsten Generation.

Im *QUEST-Institut an der PTB* wurde im Berichtszeitraum eine neuartige Spektroskopiemethode für gespeicherte Ionen entwickelt, die die Kopplung der Bewegungszustände der Ionen in einer Radiofrequenzfalle ausnutzt (s. Nachrichten aus der Abteilung). Diese sogenannte Photonenrückstoßspektroskopie ist so empfindlich, dass weniger als zehn absorbierte Photonen ausreichen, um ein Signal-zu-Rauschverhältnis von eins zu erhalten. Die hohe Empfindlichkeit kann jetzt ausgenutzt werden, um molekulare oder hochgeladene Ionen Präzisionsmessungen zugänglich zu machen. Die Kopplung der Bewegungszustände verschiedener Ionen in der Ionenfalle wird auch in einer gegenwärtig entwickelten optischen Uhr ausgenutzt, die einen Übergang im Aluminium-Ion nutzt. Auch für skalierbare Ionenuhren mit höherem Signal-zu-Rausch-Verhältnis müssen schmalbandige Laser realisiert werden, um das volle Potenzial zu nutzen. Diese Laser werden auf optische Resonatoren vorstabilisiert, die besonders unempfindlich gegenüber von außen eingebrachten Schwingungen sein müssen. In der Gruppe *Multi-Ionen-Uhren* wurde ein Resonator mit neuartiger Aufhängung aufgebaut, dessen schwingungsunempfindliches Design eine relative

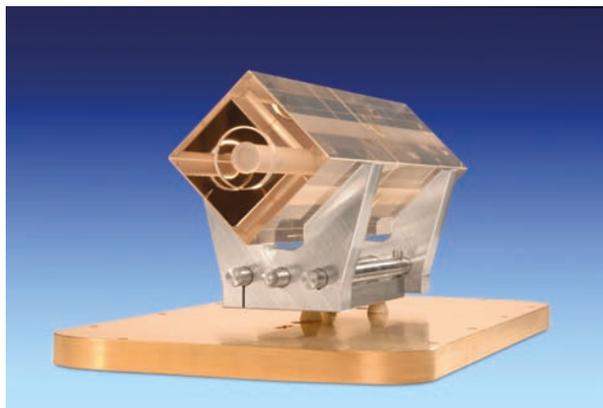


Bild 9: Optischer Resonator für eine Multi-Ionenuhr

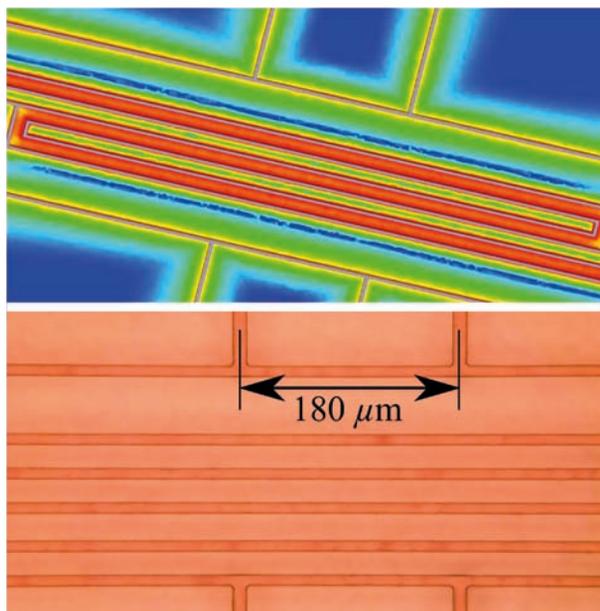


Bild 10: Numerische Simulation der in den Strukturen fließenden Mikrowellenstromverteilungen (oben) der im Reinraumzentrum der PTB hergestellten Fallenstruktur (unten) (Abbildungen: M. Carsjens und M. Kohnen)

Instabilität von  $10^{-16}$  in weniger als 100 ms ermöglicht (Bild 9). Diese Stabilität entspricht den Anforderungen eines Multi-Ionen-Frequenznormals.

In den meisten Ionenfallen wird bisher die Manipulation der Ionen durch komplexe Lasersysteme erzeugt. Eine neue Strategie, die in der Arbeitsgruppe von Prof. Christian Ospelkaus (LUH) am *QUEST-Institut an der PTB* verfolgt wird, kontrolliert die Wechselwirkung der Ionen durch Mikrowellenfelder. In einer Struktur (wie in Bild 10) werden Ionen einige  $10\ \mu\text{m}$  über einer Chipstruktur gefangen. In die Oberfläche werden dann Mikrowellenströme eingekoppelt. Das oberhalb der Oberfläche entstehende inhomogene Mikrowellen-Nahfeld lässt sich zur Kontrolle der Ionen einsetzen.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de))

### Grundlagen der Metrologie

#### Rückführung der Längeneinheit auf die Sekunde mittels optischer Frequenzmessung

Die Längeneinheit Meter wird von der PTB überwiegend durch die Kalibrierung von stabilisierten Lasern bei einer Wellenlänge von 633 nm an Kunden weitergegeben. Bisher wurde die internationale Übereinstimmung durch direkte Laser-Ver- gleichungen sichergestellt. In der PTB wurden jetzt die technischen Möglichkeiten geschaffen, optische Frequenzmessungen mittels Frequenzkamm routinemäßig durchzuführen und damit die nationalen Normale direkt auf die SI-Basiseinheit Sekunde rückzuführen. (Th. Legero, FB 4.3, [thomas.legero@ptb.de](mailto:thomas.legero@ptb.de))

#### Laufzeitfreie Synchronisation per Glasfaser

Mittels phasenstabilisierter Übertragung einer linear verstimmtten Frequenz per Glasfaser konnte über eine Streckenlänge von ca. 150 km die Synchronisation zweier Frequenzzähler mit einer Auflösung von unter 200 ps gemessen werden. Das Verfahren ermöglicht eine neue Methode der Zeitübertragung. (S. M. F. Raupach, FB 4.3, [sebastian.raupach@ptb.de](mailto:sebastian.raupach@ptb.de))

#### Europäisches Projekt zur Entwicklung von hocheffizienten Einzelphotonenquellen gestartet

Einzelphotonenquellen sind relevant für eine Vielzahl von Anwendungen, so auch in der Radiometrie und Quantenmetrologie. In dem von der PTB koordinierten europäischen Projekt „Single-Photon Sources for Quantum Technologies“ (SIQUTE) sollen nun in Zusammenarbeit zwischen führenden Staatsinstituten und Universitäten hocheffiziente Einzelphotonenquellen mit berechenbaren Eigenschaften entwickelt und angewendet werden. (S. Kück, FB 4.1, [stefan.kueck@ptb.de](mailto:stefan.kueck@ptb.de))

#### Graduiertenkolleg „Grundlagen und Anwendungen ultrakalter Materie“ erfolgreich gestartet

In dem an der Leibniz Universität Hannover eingerichteten Graduiertenkolleg ist die PTB mit fünf Doktoranden aus den Bereichen der optischen Uhren und der ultrakalten Quantengase beteiligt. In dem auf zunächst von der DFG für viereinhalb Jahre bewilligten Kolleg werden theoretische und experimentelle Untersuchungen zu Anwendung ultrakalter Gase für Präzisionsmessungen durchgeführt.

Siehe: <http://www.rtg1729.uni-hannover.de/>  
(H. Schnatz, FB 4.3, [harald.schnatz@ptb.de](mailto:harald.schnatz@ptb.de))

#### Frequenzvergleiche über Satellit mit verbesserter Stabilität

Zwischen der PTB und Metrologieinstituten in Asien erfolgen Zeit- und Frequenzvergleiche über einen russischen Telekommunikationssatelliten. Im Sommer 2013 wurde hiermit ein vom japanischen Institut NICT entwickeltes Verfahren zur Nutzung der Trägerphasenmessung der über den geostationären Satelliten übertragenen Signale auf einer 10 000-km-Basislinie erprobt. Es wurden bislang nicht erreichte kleine Werte der relativen statistischen Messunsicherheit nachgewiesen:  $2 \cdot 10^{-13}$  bei einer Mittelungszeit  $t = 1$  s,  $1 \cdot 10^{-15}$  bei  $t = 40\,000$  s. (D. Piester, FB 4.4, [dirk.piester@ptb.de](mailto:dirk.piester@ptb.de))

#### Uhren des Ostens

Die nationalen metrologischen Institute Chinas (NIM), Indiens (NPLI) und Russlands (VNIIFTRI) haben während der letzten Jahre neue Caesium-Fontänenuhren entwickelt. Mittels Zeitvergleich über einen russischen Telekommunikationssatelliten und über GPS wurden diese Uhren erstmals mit den Fontänenuhren der PTB verglichen. Im Rahmen der spezifizierten Unsicherheiten stimmen alle Uhren überein. (A. Bauch, FB 4.4, [andreas.bauch@ptb.de](mailto:andreas.bauch@ptb.de))

#### Frequenz der Strontium-Gitteruhr gemessen

Die PTB entwickelt unterschiedliche optische Frequenznormale, die zukünftig die Rolle der Cäsium-Atomuhren übernehmen können. In der Strontium-Gitteruhr wird ein Laser auf einen atomaren Strontium-Übergang stabilisiert. Die Frequenz dieses Lasers wurde durch Vergleich mit den Cs-Fontänenuhren der PTB mit einer relativen Unsicherheit von  $4 \cdot 10^{-16}$  gemessen, was der Ungenauigkeit der primären Cs-Uhren entspricht. (Ch. Lisdat, FB 4.3, [christian.lisdat@ptb.de](mailto:christian.lisdat@ptb.de))

#### Kryogener Silizium Resonator verbessert die Stabilität der Strontium-Gitteruhr

Die relative Frequenzstabilität von  $10^{-16}$  eines Referenzlasers bei 1,5  $\mu\text{m}$  Wellenlänge wurde mit einem Frequenzkamm als Transfer-Oszillator auf einen Laser bei 698 nm übertragen. Mit diesem Laser konnte der  $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$  Uhren-Übergang einer  $^{87}\text{Sr}$ -Gitteruhr mit einer Fourier-begrenzten Linienbreite von 1,5 Hz (gegenüber zuvor 10 Hz) aufgelöst wer-

den. Mit dieser verbesserten Auflösung konnte die relative Instabilität der optischen Uhr auf  $4,5 \cdot 10^{-16}$  reduziert werden, und sie gehört damit weltweit zu den stabilsten optischen Uhren. (Th. Legero, FB 4.3, thomas.legero@ptb.de)

### **Messung der Stabilität des Ytterbiumion-Oktupol-Frequenznormals**

Die durch Quantenprojektionsrauschen begrenzte Stabilität eines optischen Frequenznormals auf der Basis des S-F-Oktupolübergangs in einem gespeicherten  $\text{Yb}^+$ -Ion wurde durch Vergleich mit einem anderen optischen Frequenznormal bestimmt. Dafür wurden beide Normale über eine 300 m lange Glasfaser-Übertragungsstrecke verbunden. Die gemessene relative statistische Unsicherheit des Frequenzverhältnisses lag bei einer Mittelungszeit von 168 000 s bei  $2 \cdot 10^{-17}$ . (Chr. Tamm, FB 4.4, christian.tamm@ptb.de)

### **Vibrationsinsensitiver Referenzresonator mit thermischem Rauschen unter $1 \cdot 10^{-16}$**

Am *QUEST-Institut* der PTB wurde ein einfaches vibrationsinsensitives Design für einen 30 cm langen Referenzresonator entwickelt und getestet. Die experimentell bestimmten Beschleunigungsempfindlichkeiten erlauben in Kombination mit gemessenen Vibrationsspektren eine Frequenzinstabilität unter  $1 \cdot 10^{-16}$  für Mittelungszeiten über 20 ms. (J. Keller, QUEST, jonas.keller@ptb.de)

### **Neue Ionenfalle mit integrierter Mikrowellenkontrolle**

In der Arbeitsgruppe von C. Ospelkaus (Leibniz Universität Hannover und *QUEST-Institut an der PTB*) wurde eine Ionenfalle mit integrierten Mikrowellenleitern entwickelt, die die Kontrolle einzelner Ionen für die Quanteninformationsverarbeitung drastisch vereinfachen und die Qualität der Rechenoperationen verbessern soll. Dazu wurden umfangreiche numerische Mikrowellen-Simulationen durchgeführt und die dabei entworfenen Strukturen im Reinraumzentrum der PTB gefertigt. (M. Carsjens, QUEST, martina.carsjens@ptb.de)

### **Photon-Rückstoß-Spektroskopie**

Am *Quest-Institut* wurde eine neuartige Methode zur Präzisionsspektroskopie an gefangenen Ionen entwickelt. Mithilfe dieser Methode konnte die Messunsicherheit eines Überganges im  $\text{Ca}^+$  um eine Größenordnung verbessert und eine um mehrere Größenordnungen erhöhte Sensitivität gegenüber konventionellen Methoden nachgewiesen werden. Hierdurch wird die Messung einer bisher nicht für die Präzisionsspektroskopie zugänglichen Klasse

von Ionen ermöglicht. (F. Gebert, QUEST, florian.gebert@ptb.de)

### **Kontrollierte Erzeugung und Dynamik von Kink-Solitonen**

Am *QUEST-Institut* an der PTB wurden die Eigenschaften von topologischen Defekten (Kink-Solitonen) in lasergekühlten Ionen-Coulomb-Kristallen untersucht. Dabei wurde unter anderem der Einfluss von Massendefekten auf die Stabilität und Dynamik unterschiedlicher Kink-Solitonen analysiert. Es konnte experimentell gezeigt werden, dass sich mithilfe eines elektrischen Feldes und eines Massendefektes Kink-Solitonen deterministisch erzeugen und kontrollieren lassen. (T. Burgermeister, QUEST, tobias.burgermeister@ptb.de)

### **Topologische Defekte in Coulomb-Kristallen**

Ionen-Coulomb-Kristalle in einer linearen Paul-Falle eignen sich zur Untersuchung symmetriebrechender Phasenübergänge. Deren Universalität erlaubt es, Aussagen über unzugängliche Systeme (wie das frühe Universum) mithilfe dieses gut kontrollierbaren Systems im Labor zu überprüfen. Es konnte experimentell eine Abhängigkeit des Auftretens von Defekten von der Übergangsgeschwindigkeit nach einem Potenzgesetz nachgewiesen werden. (T. E. Mehlstäubler, QUEST, tanja.mehlstaebler@ptb.de)

### **Entwicklung einer portablen Monitorstrahlungsquelle mit im solaren UV-Wellenlängenbereich emittierenden Leuchtdioden**

Im Rahmen des Projektes EMRP ENV 03 „Traceability for surface spectral solar ultraviolet radiation“ wurde eine portable Monitorstrahlungsquelle entwickelt, mit deren Hilfe die Kalibrierung von Spektroradiometern im solaren UV-Wellenlängenbereich (280 nm bis 400 nm) überprüft werden kann. Als Strahlungsquellen dienen UV-Leuchtdioden (LEDs) verschiedener Emissionswellenlängen im TO-18-Gehäuse mit flachem Emissionsfenster. (S. Nowy, FB 4.1, stefan.nowy@ptb.de)

### **43 neue Energieniveaus des Thorium-Ions bestimmt**

Durch Zwei-Photonen-Laseranregung von gespeicherten  $\text{Th}^+$ -Ionen wurde jetzt erstmals systematisch nach Energieniveaus oberhalb von 7 eV Anregungsenergie gesucht. Dabei wurden 43 bisher unbekannte Niveaus gefunden. In diesem Energiebereich liegt der erste angeregte Kernzustand des Isotops  $^{229}\text{Th}$ , der nun über einige der neu gefundenen Niveaus mittels eines sogenannten elektronischen Brücken-

prozesses angeregt werden kann. (E. Peik, FB 4.4, ekkehard.peik@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Entwicklung von Radiometern und Strahlernormalen für hohe UV-C-Bestrahlungsstärken**

In einem Kooperationsprojekt im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) wurden gemeinsam mit der Berliner Firma sglux GmbH Radiometer und Strahlernormale entwickelt, die Kalibrierungen und rückführbare Messungen im Bereich der Wasserentkeimung mit hohen UV-C-Bestrahlungsstärken ermöglichen. (P. Sperfeld, FB 4.1, peter.sperfeld@ptb.de)

#### **Outdoormessplatz für die Solarzellenmetrologie**

An der PTB wurde ein neuer Outdoormessplatz entwickelt, um die Einflüsse unterschiedlicher Umgebungsbedingungen (Spektrum, Bestrahlungsstärke, Temperatur) auf den Kurzschlussstrom von Solarzellen zu untersuchen. Des Weiteren können verschiedene Einstrahlgeometrien eingestellt oder die Messebene zweiachsig zur Sonne nachgeführt werden. Erste Ergebnisse zeigen die Notwendigkeit der Korrektur einer spektralen Fehlanpassung selbst unter scheinbar perfekten Messbedingungen, sobald sich die relativen spektralen Empfindlichkeiten von zu prüfender Solarzelle und Referenzsolarzelle unterscheiden. Darüber hinaus werden die hier gewonnenen Erkenntnisse in die Erweiterung der Norm IEC 60904 einfließen. (T. Fey, FB 4.1, thomas.fey@ptb.de)

#### **Kalibrierung von großflächigen Solarzellen und Rückkontaktsolarzellen**

Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Institut für Solarenergieforschung Hameln wurde an der PTB ein laserbasierter Differential Spectral Response (Laser-DSR-) Messplatz zur primären Kalibrierung von großflächigen Solarzellen und Rückkontaktsolarzellen aufgebaut. Es konnte der Kurzschlussstrom von Standard-Industriesolarzellen unter Standardtestbedingungen (156 mm × 156 mm) mit einer Messunsicherheit bis herab zu 0,5 % bestimmt werden. Die Kalibrierung von großflächigen Referenzsolarzellen wird zukünftig als Dienstleistung der PTB angeboten werden. (I. Kröger, FB 4.1, ingo.kroeger@ptb.de)

#### **Höchstleistungs-LED-Transfornormal**

Halbleiterbasierte Lichtquellen mit hohem Lichtstrom, sogenannte High-Power-LED, dominieren zunehmend nahezu alle Bereiche der Beleuchtungstechnik. Die industrielle Entwicklung und Produkti-

on derartiger LED erfordern aber auch den Transfer photometrischer, radiometrischer und spektroradiometrischer Größen vom NMI in die Industrie mit Hilfe ähnlich leistungsstarker LED-Transfornormale. In der PTB wurde jetzt ein Höchstleistungs-LED-Transfornormal entwickelt und befindet sich zurzeit in der Erprobung. (M. Lindemann, FB 4.1, matthias.lindemann@ptb.de)

#### **114. Jahrestagung der DGaO in der PTB**

Vom 21.–25. Mai 2013 fand in der PTB die 114. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik (DGaO) statt. Mit rund 270 Teilnehmern aus Industrie und Wissenschaft war die Tagung sehr gut besucht und bot vielfältige Möglichkeiten zum wissenschaftlichen Austausch über neue Entwicklungen der angewandten Optik. Ein Schwerpunktthema der Tagung war die optische Präzisionsmesstechnik. Für nähere Informationen siehe: <http://www.dgao.de/de/content/dgao-tagung-bericht>. (E. Buhr, FB 4.2, egbert.buhr@ptb.de)

#### **Kalibrierung von Keramikstandards für die Zuckerindustrie**

Die Zuckerindustrie benötigt zur Rückführung von Reflexionskolorimetern, die zur Bestimmung des Zuckerweißgrades eingesetzt werden, geeignete Kalibriernormale. Bisher wurde hierzu speziell angefarbter Zucker verwendet. Seit kurzem sind als zulässiges alternatives Kalibriermaterial keramische Reflexionsnormale erhältlich. Diese können seit diesem Jahr in der PTB gemäß der „Braunschweig Standard-Farbtypenreihe“ mit den Farbtypen 0 und 6 kalibriert werden. (A. Höpe, FB 4.2, andreas.hoepe@ptb.de)

#### **Untersuchungen zum Einfluss verwendeter Näherungen in der Scatterometrie**

Die optische Scatterometrie ist eine Schlüsselmethode zur Messung funktionsrelevanter dimensioneller Größen bei der lithografischen Herstellung von Nanostrukturen. Hierbei werden im Allgemeinen Vereinfachungen in der Auswertung verwendet, welche die Messunsicherheit begrenzen können. Es konnte gezeigt werden, dass die Größe des Beleuchtungsflecks für aktuelle Messsysteme nicht relevant ist und dass die Scatterometrie wichtige Parameter wie Kantenverrundung erfassen kann, die mit anderen Verfahren nicht messbar sind. (J. Endres, FB 4.2, johannes.endres@ptb.de)

### **Hochempfindliche Winkelsensoren zur deflektometrischen Topografiemessung mit Sub-Millimeter-Aperturen**

Bei der Kleinwinkeldeflektometrie bestimmt die Spotgröße des Abtaststrahls die laterale Auflösung. Kommerziell erhältliche Autokollimatoren können nur mit Aperturen im Millimeterbereich messen. Es wurden zwei neuartige Winkelsensoren entwickelt, die auch bei Sub-Millimeter-Aperturen Winkelsensitivitäten im Bereich von 0,01 arcsec erreichen. Damit wird es möglich sein, Ebenheitsmessungen mit lateraler Auflösung im Sub-Millimeterbereich durchzuführen. (G. Ehret, FB 4.2, gerd.ehret@ptb.de)

### **Erste Messungen mit dem Prototyp eines neuen Asphärenmessgerätes**

Die vor einigen Jahren begonnenen Arbeiten zur Bereitstellung von rückgeführter Metrologie für optische Asphären haben einen ersten Meilenstein erfolgreich passiert: Der Prototyp des Asphärenmessgerätes konnte erste Messungen durchführen. Die Unsicherheitsanalyse des Systems wird mittels einer mathematischen Simulationsumgebung durchgeführt. (M. Schulz, FB 4.2, michael.schulz@ptb.de)

### **Breitbandig abstimmbare optische Synthesizer mit deterministischer Phase des Ausgangsignals**

Im Rahmen eines Kooperationsprojektes des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) wurde ein optischer Synthesizer demonstriert, der zu jedem Zeitpunkt und damit auch bei agiler, breitbandiger Frequenzabstimmung eine deterministische Phasenbeziehung seines infrequenten optischen Ausgangsignals relativ zu einem Referenzsignal aufweist. Bei simultaner Frequenzabstimmung zweier derartiger Systeme über einen Bereich von 30 GHz betrug die maximale optische Phasenabweichung weniger als 100 mrad. (E. Benkler, FB 4.3, erik.benkler@ptb.de)

## **Metrologie für die Gesellschaft**

### **Rückführbare Messung der spektralen Bestrahlungsstärke von UV-Wasserentkeimungsanlagen**

In der Wasserentkeimung kommen immer häufiger Anlagen mit Hochleistungs-Ultraviolett-Strahlern zum Einsatz, die besondere Eigenschaften hinsichtlich der spektralen Bestrahlungsstärke erfüllen müssen. Die PTB hat nun erstmalig mit transportablen Spektroradiometern Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke direkt an unterschiedlichen Anlagen im laufenden Betrieb bei der Prüfstelle des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches durchgeführt und gute Übereinstimmung zwischen

den unterschiedlichen Messverfahren nachgewiesen. (P. Sperfeld, FB 4.1, peter.sperfeld@ptb.de)

### **Galileo profitiert von der Qualität europäischer Zeitskalen**

Seit dem 1. August 2013 koordiniert jetzt die PTB die Beiträge der Europäischen Zeitinstitute in Italien, Frankreich, Spanien, Schweden und Deutschland für das europäische Satellitennavigationssystem Galileo. Die PTB ist dabei ein Mitglied eines Konsortiums, das die Systemzeit steuert und die von den Satelliten ausgesandte Zeitinformativ validiert. Es wurde bereits gezeigt, dass die Stabilität und Verfügbarkeit der Zeitskalen ausreichen, die Spezifikationen der Galileo-Zeit in vollem Umfang zu erfüllen. (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

## **Internationale Angelegenheiten**

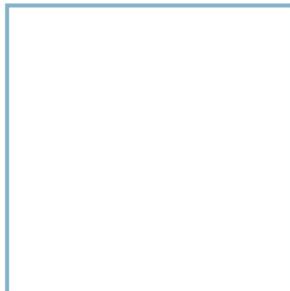
### **Abschluss des Lichtstärke-Vergleichs EURAMET. PR-K3a**

Mit der Übersendung des Abschlussberichtes (Draft B) an das Internationale Büro für Maße und Gewichte (BIPM) wurde von der PTB als Pilotlabor der internationale Lichtstärke-Vergleich EURAMET. PR-K3.a abgeschlossen. An dem Vergleich nahmen 16 Europäische Staaten mit insgesamt 78 Normallampen teil. Neben der PTB waren die nationalen Metrologieinstitute Frankreichs (LNE-CNAM) und Italiens (INRIM) die Link-Laboratorien zur Weitergabe des Schlüsselvergleich-Referenzwertes CCPR-KCRV K3.a der Messgröße Lichtstärke. (A. Sperling, FB 4.1, armin.sperling@ptb.de)



# Abteilung 5

## Fertigungsmesstechnik



In der Abteilung Fertigungsmesstechnik werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit dem Ziel durchgeführt, den aktuellen sowie insbesondere den künftigen Bedarf von Industrie, Gesellschaft und Wissenschaft an messtechnischer Rückführung dimensioneller Größen mit den jeweils für die Anwendung geforderten Messunsicherheiten bestmöglich zu decken. Basierend auf den Ergebnissen dieser Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden neue und verbesserte messtechnische Dienstleistungen im Bereich der Kalibrierung von Normalen, der Validierung von messtechnischen Verfahren sowie der Prüfung von speziellen Auswertalgorithmen angeboten und durchgeführt. Baumuster- und Entwurfsprüfungen für Längenmess-Maschinen und -Geräte gemäß der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) sowie die Prüfung und innerstaatliche Zulassung zur Eichung von dimensionellen Messgeräten runden das Aufgabenspektrum der Abteilung ab. Darüber hinaus sind Mitarbeiter der Abteilung als Fach- und Systembegutachter für die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) aktiv und wirken bei „peer reviews“ von Metrologieinstituten anderer Länder mit.

Die Bearbeitung der fachlichen Aufgaben der Abteilung erfolgt in den Fachbereichen *Oberflächenmesstechnik*, *Dimensionelle Nanometrologie*, *Koordinatenmesstechnik* sowie *Interferometrie an Maßverkörperungen*. Der Fachbereich *Wissenschaftlicher Gerätebau* der Abteilung unterstützt die gesamte PTB mit qualitativ hochwertigen Dienstleistungen in der Konstruktion, Fertigung und Montage von Prototyp-Messeinrichtungen sowie von Normalen.

Fortschritte in der Messtechnik erfordern ein genaues Verständnis der relevanten Einflussgrößen auf den jeweils verwendeten Messprozess. Ohne diese genaue Kenntnis ist die Erstellung der Messunsicherheitsbilanz eines Messergebnisses zwar prinzipiell auch möglich, allerdings nur mit einer sich ergebenden erhöhten Messunsicherheit. Gemäß GUM („Guide to the expression of uncertainty in measurement“) sind alle relevanten Einflussgrößen zu berücksichtigen und in der Modellgleichung für den Messprozess korrekt zu erfassen. Häufig ist der Messprozess allerdings recht komplex und die Aufstellung der Modellgleichung mit größte-

rem Aufwand verbunden bzw. gar nicht mehr zu realisieren. Bereits Ende der 90er Jahre wurde im Fachbereich *Koordinatenmesstechnik* der PTB für die Ermittlung messaufgabenspezifischer Messunsicherheiten an komplexen Werkstücken das Verfahren des virtuellen Koordinatenmessgerätes entwickelt, welches die Berechnung aufgabenspezifischer Messunsicherheiten mit Monte-Carlo-basierten Simulationsverfahren erlaubt. Ein anderer Anwendungsbereich für den Einsatz von Simulationen in der Messtechnik ist die Nanometrologie. Hier ergeben sich besondere Herausforderungen durch die geringen Abmessungen der zu charakterisierenden Nanostrukturen im Vergleich zu den eingesetzten Messsonden der unterschiedlichen Messgeräte. Die Erzielung geringer Messunsicherheiten erfordert in diesem Fall eine Modellierung der Wechselwirkung zwischen Sonde und Probe, um den vom Messgerät angezeigten Signalkontrast an der Nanostruktur hinreichend genau beschreiben und interpretieren zu können.

Der Schwerpunkt des Berichtes der Abteilung liegt in diesem Jahr auf der Diskussion dieser wechselseitigen Abhängigkeit von Fortschritten in der Modellierung messtechnisch relevanter Eigenschaften von Messgeräten bzw. wesentlicher Komponenten im Zusammenspiel mit den Kalibrierobjekten und Normalen einerseits und der hierdurch ermöglichten vertieften Kenntnisse des Messprozesses andererseits, die zur Reduzierung der Kalibrierunsicherheiten von Normalen sowie zur Optimierung von Messgeräten – ggf. auch Fertigungsgeräten – wesentlich beitragen.

### **Modellierungsverfahren für die moderne Fertigungsmesstechnik**

#### **Beispiele aus der Nanometrologie**

Moderne Rasterelektronenmikroskope (REM) sind in der Nanometrologie zu unverzichtbaren Werkzeugen geworden. Sie erlauben eine Abtastung von Probenoberflächen mit einem sehr feinen, nur etwa 1 nm breiten Elektronenstrahl, der rasterförmig über die Oberfläche bewegt wird. Allerdings unterliegen die Primärelektronen im zu untersuchenden Festkörper-Probenmaterial verschiedenen Wechselwirkungsprozessen, wie z. B. elastischer und inelastischer Streuung, sodass die im oberflächennahen Bereich der Probe generierten und häufig zur Detektion verwendeten niederenergetischen Sekundärelektronen (SE) aus einem größeren Bereich rund um den Eintrittsort der Primärelektronen stammen. Die Ausdehnung dieses SE-Emissionsbereichs ist

Titelbild:

Neuentwicklungen in der Koordinatenmesstechnik: Mikroverzahnungsnormal mit Sub-Millimeter-Stirnmodulen und angepasster Mikrotaster

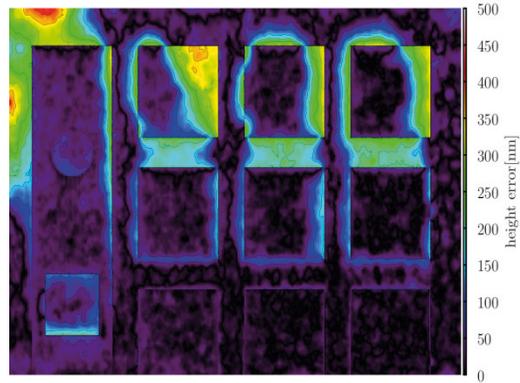
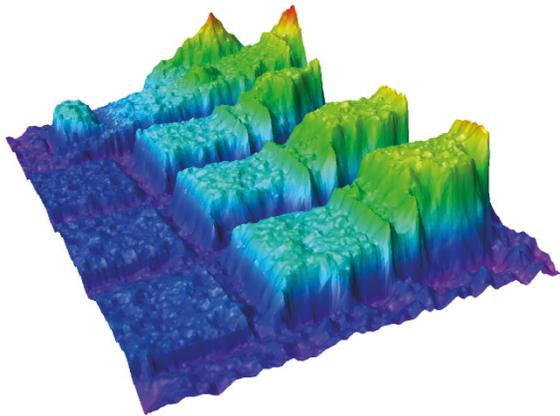
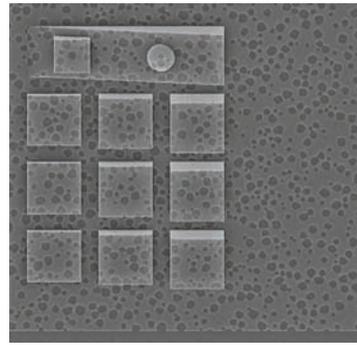
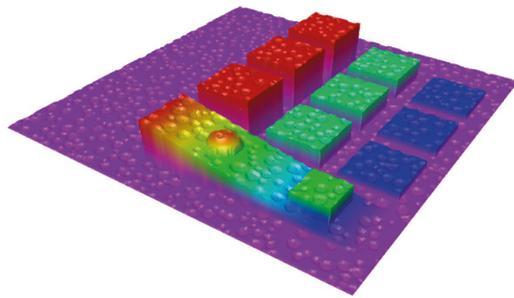


Bild 1: a) (o. l.) 3D-Teststruktur bestehend aus mehreren einfachen Geometrieelementen und einer überlagerten Textur; b) (o. r.) Simuliertes REM-Bild der um  $10^\circ$  gekippten Teststruktur; c) (u. l.) Ergebnis der Rekonstruktion aus den simulierten REM-Bildern der gekippten Probe; d) (u. r.) Analyse der Abweichungen der rekonstruierten 3D-Topografie von der angenommenen 3D-Topografie.

von verschiedenen Bedingungen wie z. B. dem Material und der Topografie der Probe, aber auch der Primärenergie der Elektronen abhängig. Zudem ist das gemessene SE-Intensitätssignal auch noch von der winkel- und energieabhängigen Effizienz der Elektronendetektion des verwendeten SE-Detektors abhängig.

Um dieser Komplexität der Entstehung des Bildsignals im Elektronenmikroskop gerecht zu werden, wurde die Simulationssoftware MCSEM entwickelt, mit der u. a. die Streuprozesse der Elektronen im Festkörper mittels Monte-Carlo-Methoden simuliert werden. Mittels MCSEM simulierte REM-Bilder an wohldefinierten Proben (mit bekannten Materialien und Topografien) können verwendet werden, um eingesetzte Algorithmen zur SE-Bildausswertung zu prüfen, beispielsweise für Algorithmen – die sogenannten Kantenfinder – zur Bestimmung der Breite oder Lage von Nanostrukturen im REM-Bild.

Zur Messung der Topografie technischer Oberflächen werden diese im REM unter verschiedenen Winkeln abgebildet. Mittels der sogenannten REM-Fotogrammetrie werden die sich ergebenden Bildfolgen durch spezielle Programme analysiert, und die zugrundeliegende Oberflächentopografie wird rekonstruiert. Für die Prüfung der erzielbaren Genauigkeit und der zu beachtenden Limitierungen der REM-Fotogrammetrie bei Oberflächen mit nanoskaliger Topografie wurden wiederum mittels MCSEM simulierte REM-Bilder eingesetzt.

Bild 1 a) zeigt eine simulierte Teststruktur bestehend aus mehreren einfachen Geometrieelementen mit einer maximalen Höhe von 300 nm, zusätzlich ergänzt um eine Textur, um günstige Voraussetzungen für die als Basis der Rekonstruktion bei der REM-Fotogrammetrie verwendeten Korrelationsalgorithmen über das gesamte Bildfeld zu schaffen. Bild 1 b) zeigt ein mittels MCSEM simuliertes REM-Bild der Teststruktur, welche um  $10^\circ$  gekippt angenommen wurde. Mit den so simulierten REM-Bildern der wohldefinierten Teststrukturen wurden die erzielbaren Genauigkeiten kommerziell verfügbarer REM-Fotogrammetrie-Rekonstruktionen im Rahmen des europäischen Verbundforschungsprojekts JRP MADES untersucht. Die an dem Beispiel sich ergebenden mittleren Abweichungen zwischen

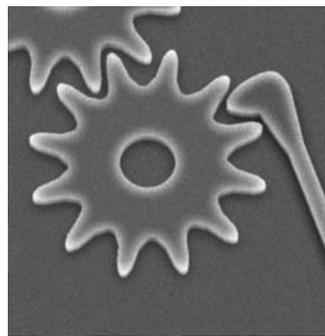
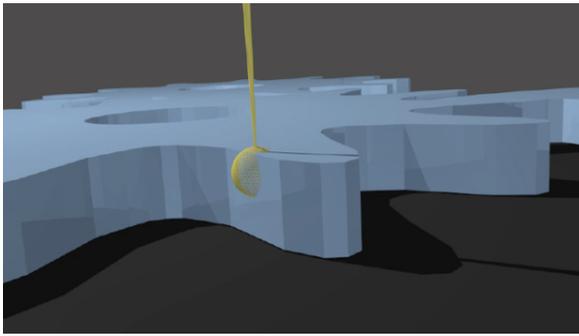


Bild 2: a) (links) Visualisierung des Prinzips der schnellen Berechnungsmethode für REM-Signale; b) (rechts) Mit der schnellen Berechnungsmethode simuliertes REM-Bild eines Mikrozahnrades

der rekonstruierten Topografie und der zugrundeliegenden Modell-Topografie von ca. 40 nm zeigen die Grenzen der Anwendbarkeit der Methode für die Nanometrologie auf.

Zur wesentlichen Beschleunigung der Berechnung der REM-Bilder wurde auch ein vereinfachtes Simulationsverfahren entwickelt, welches nur auf geometrischer Analyse der Oberflächentopografie und eines angenommenen sphärischen Streuvolumens des Elektronenstrahls basiert – also auf die rechenintensive Monte-Carlo-Methode zur Berechnung der Streuprozesse verzichtet – dafür allerdings eine geringere Genauigkeit aufweist. Bild 2 veranschaulicht das zugrundeliegende geometrische Prinzip der schnellen Simulation sowie ein derart simuliertes REM-Bild eines Mikrozahnrades.

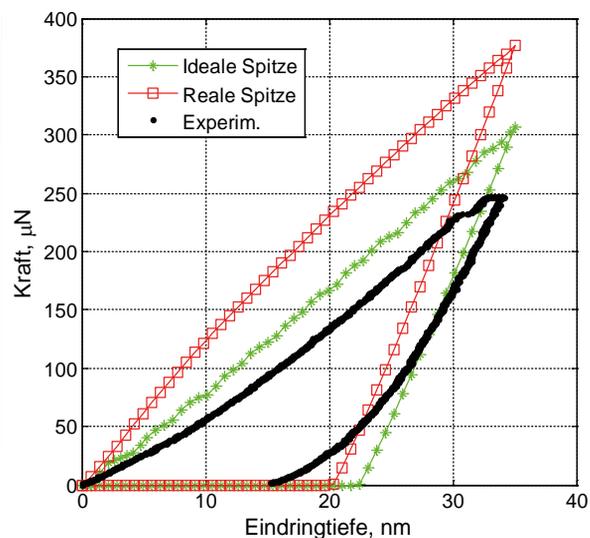
Die MCSEM-Simulationssoftware wurde ebenfalls im Rahmen eines anderen Projekts für die Optimierung der Belichtungsprozesse in Elektronenstrahl-Lithografieanlagen eingesetzt (siehe Schlagzeilen).

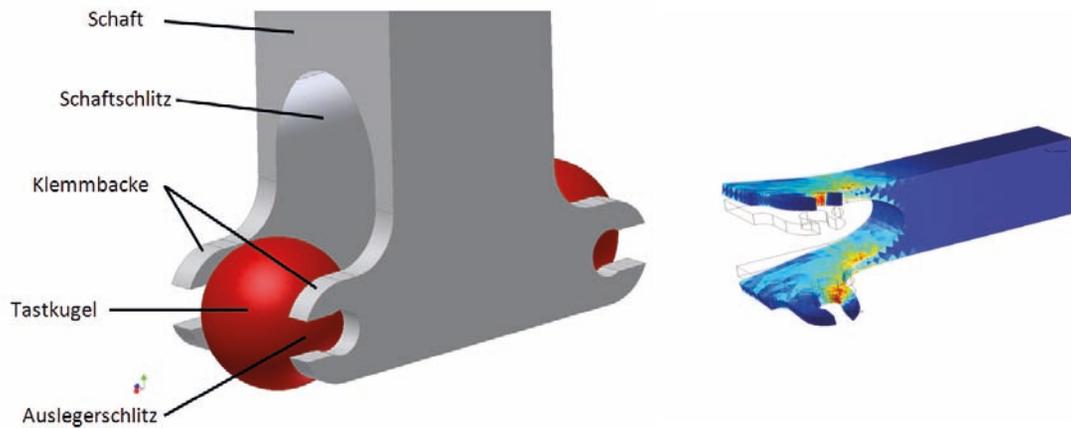
Die Untersuchung der Eigenschaften von nanoskaligen Objekten ist mit besonderen Herausforderungen verbunden. Dies soll hier am Beispiel der Bestimmung mechanischer Eigenschaften von

Nano-Objekten mittels Nanoindentation exemplarisch dargestellt werden. Herkömmliche Datenanalysemodelle für die Eindringprüfung im Nanometerbereich sind nicht in der Lage, Messergebnisse an Nano-Objekten korrekt zu interpretieren. Die experimentell ermittelten Ergebnisse von Nanoindentationsmessungen an zylindrischen Nano-Säulen aus Silizium mit einer Höhe von 500 nm wurden daher zusätzlich durch Simulationen mittels Finite-Element-Methode (FEM) unterstützt. Bild 3 a) zeigt das FEM-Simulations-Ergebnis der Deformation einer Si-Nano-Säule bei mittlerer Indentation durch einen verrundeten Eindringkörper (Berkovich-Indenter). Bei realen Indentationsprüfungen ist es häufig nicht möglich, genau im Zentrum der Nano-säulen zu indentieren. Dies führt zu noch größeren Spannungen am Fuß und damit häufig zu Versetzungen (s. schwarze Kurve in Bild 3 b) bis hin zur Zerstörung der Säulen.

Bild 3: FEM-Simulation der Nanoindentationsmessung von Silizium-Nanosäulen.

a) (links): Numerische 2D-Simulation der Spannungsverteilung einer Nanosäule während einer Nanoindentationsmessung mit einem verrundeten Berkovich-Indenter ( $r_{ip} = 30 \text{ nm}$ );  
 b) (rechts): Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und der Indentationsmessung an einer Silizium-Säule mit 386 nm Durchmesser





Der Vergleich der simulierten Kraft-Eindringkurven eines idealen und eines realen Berkovich-Indenters in Bild 3 b) mit einer experimentellen Kurve zeigt noch größere Abweichungen. Dies deutet darauf hin, dass die relativ einfachen zweidimensionalen Simulationen mit mittlerer Indentation der Nanosäulen nicht ausreichen, um die Experimente hinreichend genau zu beschreiben. Es ist daher beabsichtigt, künftig auch dreidimensionale Simulationen mit außermittiger Indentation durchzuführen.

### Beispiel aus der Mikrometrologie

Die Messung von Mikrostrukturkomponenten stellt oftmals noch eine besondere Herausforderung für die Fertigungsmesstechnik dar. An Mikro-Innengewinde (z. B.  $M0.7 \times 0.175$ ) angepasste Tastelemente waren bislang nicht in hinreichender Qualität und mit den geforderten Abmessungen verfügbar. Im Rahmen eines MNPQ-Projektes wurde ein Mikro-taster entwickelt, der durch seine spezielle hantelförmige Geometrie für die Messaufgaben an Mikro-Innengewinden optimiert ist. Bei diesem Taster werden kommerziell verfügbare Mikrokugeln aus Rubin mit Kugeldurchmessern bis hinunter zu  $110 \mu\text{m}$  als Antastelemente verwendet, die an einem hantelförmigen Taststift aus Hartmetall fixiert werden. Während die Montage kleiner Tastkugeln bei Mikrotastern bislang oftmals durch Kleben realisiert wurde, ist hier ein anderes Konzept verfolgt worden, bei dem die Kugeln durch eine am Taststift integrierte Klemmvorrichtung fixiert werden. Die für die Funktion der Klemmvorrichtung wichtigen geometrischen Parameter der Auslegung der Fixierung wurden vorab durch FEM-Berechnungen untersucht und optimiert, siehe Bild 4. Bei den durchgeführten Simulationen wurde die Länge des Schlitzes entlang des Schaftes bei einer definierten Aufspreizung der Klemmbacken des Tasters systematisch variiert. Als Kriterium für die Beurteilung der optimalen Länge des Schlitzes wurden die maximal auftretenden mechanischen Spannungen im

Bild 4: a) (links) Prinzipbild des entwickelten Mikrohandeltasters für Mikro-Innengewinde; b) (rechts) Ergebnis einer FEM-Simulation der entstehenden Verformungen an der Klemmvorrichtung des Mikrohandeltasters. Im Bild dargestellt ist sowohl der unbelastete Körper (dünne schwarze Umrangungslinien) als auch der verformte Körper mit Darstellung der von-Mises-Spannungen in Falschfarben. Die Verformungen sind überhöht dargestellt und entsprechen nicht den tatsächlichen Auslenkungen von bis zu  $10 \mu\text{m}$ .

Taster verwendet. Diese Spannungen mussten möglichst nahe der Bruchspannung des verwendeten Materials liegen, um ausreichend hohe Klemmkräfte zu erreichen, ohne die Bruchspannung jedoch zu überschreiten. Mithilfe der FEM-Berechnungen konnte die Anzahl anzufertigender Testtaststifte und der Zeitbedarf für die Entwicklung minimiert werden. Der entwickelte Mikrohandeltaster ist mittlerweile als Patent eingereicht und wird in Kürze als kommerzielles Produkt am Markt zur Verfügung stehen.

Die statische und – soweit notwendig – auch dynamische FEM-Analyse ist Bestandteil der Auslegung und konstruktiven Optimierung der funktionsrelevanten Eigenschaften der Komponenten von in der PTB hergestellten Prototypen von Messeinrichtungen. Insofern repräsentiert das hier dargestellte Beispiel die Bedeutung von Simulationen für die konstruktive Auslegung einer Vielzahl von in der PTB gefertigten Prototypen spezieller Messinstrumente und Komponenten.

### Beispiel zur Weiterentwicklung virtueller Messgeräte

Virtuelle Messgeräte sind Simulationsverfahren, die die Berechnung messaufgabenspezifischer Messunsicherheiten komplexer Messgeräte erlauben. Die Methode wurde in den 1990er Jahren für das sogenannte virtuelle Koordinatenmessgerät (VCM) entwickelt und erfolgreich in die industrielle Anwendung transferiert. Grundlage der Methode ist

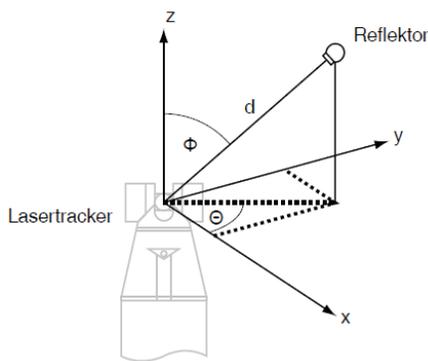


Bild 5: a) (links) Prinzipbild eines Lasertrackers; b) (rechts) Referenzwand der PTB für die Prüfung der messtechnischen Eigenschaften von mobilen 3D-Koordinatenmessgeräten, wie z. B. Lasertrackern

die Berücksichtigung sowohl der Grundkomponenten des Messgerätes (Bewegungsachsen, Antastsysteme etc.) inkl. ihrer als bekannt vorausgesetzten systematischen Messabweichungen als auch der systematisch unbekanntes sowie zufälligen Messabweichungen, die z. B. durch angenommene Schwankungen der Umgebungsparameter wie die Temperatur oder den Luftdruck resultieren. Für die Variation sämtlicher Eingangsparameter werden realitätsnahe Verteilungen angenommen, und im Computer wird auf Basis dieser sich ändernden Eingangsdaten und unter Verwendung der Monte-Carlo-Methode die Verteilung der Messwerte des virtuellen Messgerätes für eine beliebige Messaufgabe simuliert. Aus der Verteilung der simulierten Messwerte lässt sich die resultierende Messunsicherheit für die Messaufgabe besser abschätzen.

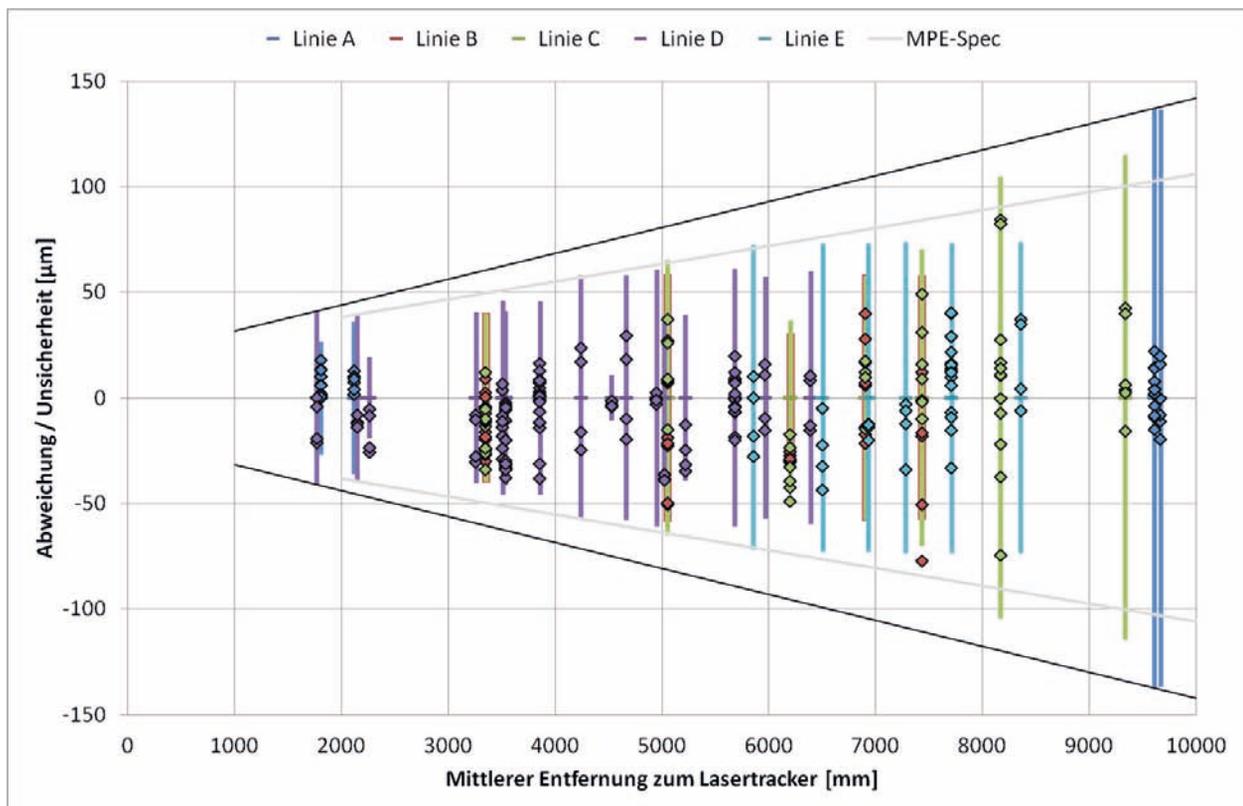
Dieses Berechnungsverfahren für die Messunsicherheit insbesondere komplexer Messaufgaben auf Basis der Monte-Carlo-Methode ist seit 2008 auch in der Ergänzung des GUM beschrieben (Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the „Guide to the expression of uncertainty in measurement — Propagation of distributions using a Monte Carlo method“). Das Verfahren des virtuellen Messgerätes wurde inzwischen auf unterschiedliche Messgeräteklassen angewandt, so z. B. im Bereich der Fertigungsmesstechnik auf Verzahnungsmessgeräte, Oberflächenmessgeräte, Interferometer sowie Rastersonden- und Rasterelektronenmikroskope.

Lasertracker sind mobile 3D-Koordinatenmessgeräte, die die Position eines Reflektors im Raum durch eine Entfernungsmessung und zwei Winkelmessungen in einem Polarkoordinatensystem

bestimmen und in der Regel in einem kartesischen Koordinatensystem an den Anwender ausgeben. Bild 5 a) zeigt das Prinzip dieser Messgeräte. Die Messabweichung solcher Lasertracker ist durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Die laserinterferometrische Entfernungsmessung hängt von der Brechzahl der Luft ab, die wiederum von den Umweltparametern Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchte im Strahlengang abhängt. Die Winkelmessung hängt von den Messabweichungen der verwendeten Winkelmesssysteme ab, die resultierende Raumkoordinate schließlich auch von der Orientierung der Messsysteme zueinander.

Für die experimentelle Bestimmung der Messabweichungen von mobilen 3D-Koordinatenmessgeräten wurde in der PTB eine Referenzwand bestehend aus einem thermisch stabilen, aus glasfaserverstärkten Kunststoffstäben realisierten Netz von Reflektormesspunkten in einem größeren Messraum installiert (siehe Bild 5 b). Hier können Lasertracker gemäß den in der Richtlinie VDI/VDE 2617 Blatt 10 formulierten Anforderungen geprüft werden.

Zur Bestimmung der messaufgabenspezifischen Messunsicherheiten von Lasertrackern an Großbauteilen wurde im Rahmen eines von der AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) geförderten Forschungsvorhabens der sogenannte virtuelle Lasertracker (VLT) entwickelt. Hierbei wurden die zuvor beschriebenen Grundmodule eines virtuellen Messgerätes verwendet, aber auf die spezifischen Einflussgrößen der Messgerätekategorie Lasertracker hin angepasst. Bild 6 zeigt die Ergebnisse der mittels VLT ermittelten Messunsicherheiten eines Lasertrackers im Vergleich zu den experimentell durch Messungen an der Referenzwand der PTB ermittelten Messunsicherheiten für verschiedene Stellungen des Lasertrackers im Raum, d. h. auch für verschiedene Abstände bis hin zu 10 m. Es ist in der Auftragsung der Ergebnisse



zu erkennen, dass die experimentell ermittelten Variationen der Messergebnisse entlang mehrerer Messlinien durch die mittels VLT simulierte Messunsicherheiten in der Mehrzahl der realisierten Stellungen des untersuchten Lasertrackers gut beschrieben werden können.

### Schlussbemerkung

Im diesjährigen Bericht der Abteilung wurde anhand von einigen Beispielen die besondere Bedeutung von Simulationsrechnungen für die Fertigungsmesstechnik aufgezeigt. Es wurden Anwendungen von Simulationen in der Nanometrologie, der Mikrometrologie, der Konstruktion wie auch der Berechnung von messaufgabenspezifischen Messunsicherheiten für unterschiedliche Messgeräteklassen dargestellt. Mit zunehmender Komplexität werden diese Verfahren zukünftig weiter ausgebaut und integriert werden müssen.

Bild 6: Ermittelte experimentelle Längenmessabweichungen (Symbole) und mit dem VLT simulierte Unsicherheiten der Längenmessung (vertikale Strichmarkierungen) entsprechend VDI/VDE 2617 Blatt 10, basierend auf den individuellen Restgeometriefehlern eines Lasertracker-Messkopfes. Zudem sind die vom Hersteller des untersuchten Lasertrackers spezifizierten maximalen Messabweichungen (MPE-Spec) mit aufgetragen.

# In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de))

## Grundlagen der Metrologie

### Neue Methode zum Test des Newton'schen Gravitationsgesetzes bei kleinen Distanzen

Die Nanokraftmesseinrichtung der PTB soll dazu genutzt werden, die Gültigkeit des Newton'schen Gravitationsgesetzes im Mikro- und Submikrometer-Bereich zu prüfen. Dazu wurde auf Basis moderner mikrotechnologischer Silizium-Strukturierungsverfahren ein Messverfahren entwickelt, mit dem eine Verbesserung der Empfindlichkeit im Bereich von  $10^3$  bis  $10^4$  verglichen mit bisherigen Messmethoden erreicht werden kann. (V. Nesterov, FB 5.1, [vladimir.nesterov@ptb.de](mailto:vladimir.nesterov@ptb.de))

### Modellierungsinfrastruktur für die Elektronenstrahlithografie

Im Rahmen des MNPQ-Projektes „ModELitho“ wird ein Softwaretool zur Simulation der Elektronenstreuung im Festkörper für die Elektronenstrahlithografie weiterentwickelt, um 3D-Proximity-Effekte sowie Aufladungseffekte mit dem Ziel zu untersuchen, Gerätekomponenten und Belichtungsstrategien der Elektronenstrahlithografie zu optimieren. (K.-P. Johnsen, FB 5.2, [klaus-peter.johnsen@ptb.de](mailto:klaus-peter.johnsen@ptb.de))

### Hochgenaue Bestimmung von Formabweichungen sphärischer Maßverkörperungen mit einem verbesserten Rekonstruktionsalgorithmus

Vor drei Jahren wurde ein Ansatz zur Rekonstruktion von Formabweichungen der Siliziumkugeln des Avogadro-Projekts vorgestellt. Eine Erweiterung des zugrundeliegenden Modells minimiert systematische Abweichungen und ermöglicht die direkte Berechnung der Messunsicherheit anstelle der vorherigen auf Vergleichsmessungen basierenden Genauigkeitsabschätzung. (G. Bartl, FB 5.4, [guido.bartl@ptb.de](mailto:guido.bartl@ptb.de))

### Kouroggi-Kamm für die absolute Längenmessung

Um das Potenzial dieser klassischen Frequenzkammquelle in der industriellen Längenmesstechnik zu untersuchen, wurde ein Kouroggi-Kamm aus einfachen Komponenten aufgebaut. Er weist einen Modenabstand von 9,2 GHz und ca. 50 Kammlinien auf und soll in einem absolut messenden Interferometer angewendet werden. (F. Pollinger, FB 5.4, [florian.pollinger@ptb.de](mailto:florian.pollinger@ptb.de))

### Bewertung und Optimierung eines Verfahrens zum Einsatz einer Multimode-Stufenindexfaser als Interferometerlichtquelle

Durch Schwingungsanregung eines ringförmig gewickelten Bereiches am Ende der Faser wird die Modenstruktur am Faserausgang im Zeitmittel zerstört (Scrambling). Die Stellparameter für das Mode-Scrambling wurden untersucht, eine stabile Anordnung aufgebaut und ein Kriterium zur Beurteilung der Wirksamkeit des Scramblings abgeleitet. (R. Spolaczyk, FB 5.4, [reiner.spolaczyk@ptb.de](mailto:reiner.spolaczyk@ptb.de))

### Beidseitig antastendes Interferometer zur absoluten Längenmessung von prismatischen Körpern ohne Anschlag

Bei diesem Interferometer wird die Länge einer freien endmaßartigen Probe gemessen, d. h. der Einfluss des Anschlebens der Endplatte auf die Länge entfällt. Damit entfällt der begrenzende Term der Anspengunsicherheit in der Messunsicherheitsbilanz, wodurch eine Reduzierung der Messunsicherheit erreicht werden kann. (K. Rau, FB 5.4, [katharina.rau@ptb.de](mailto:katharina.rau@ptb.de))

### Entwicklung einer BlueRay-Laserbelichtungsanlage zur 3D-Mikrostrukturierung

Für die Belichtung fotosensitiver Lacke wurde eine Anlage auf Basis einer sehr kostengünstigen BlueRay-Laserdiode entwickelt. Damit können auch dreidimensionale Oberflächen belichtet und strukturiert werden. Derzeit wird eine Strukturbreite von bis zu 30  $\mu\text{m}$  erreicht. (F. Schmaljohann, FB 5.5, [frank.schmaljohann@ptb.de](mailto:frank.schmaljohann@ptb.de))

## Metrologie für die Wirtschaft

### Verbessertes Verfahren zur zerstörungsfreien Bestimmung der Biegesteifigkeit von Rasterkraftmikroskop-Cantilevern

Durch die Anwendung eines dynamischen Messverfahrens konnte die Unsicherheit bei der zerstörungsfreien Messung der Steifigkeit von Siliziumcantilevern mit Spitzen auf Werte von nur noch 7 % verringert werden. (L. Doering, FB 5.1, [lutz.doering@ptb.de](mailto:lutz.doering@ptb.de))

### Rauheitsmessungen in Mikrodüsen mit dem Profils Scanner

Durch die Weiterentwicklung des Profils Scanners sind in der PTB erstmals Rauheitsprofil-Messungen in Mikrodüsen mit einem Durchmesser von 100  $\mu\text{m}$

und weniger möglich. (M. Xu, FB 5.1, min.xu@ptb.de)

### **TEM-Messungen für die Rückführung der Linienebreite von Nanostrukturen**

Zur hochgenauen Bestimmung der Linienbreite (CD-Werte) von Nanostrukturen wurden Messungen sowohl mit einem Rasterkraftmikroskop als auch mit höchstauflösenden Transmissionselektronenmikroskopen (TEM) durchgeführt und miteinander verknüpft. Im Ergebnis können Linienebreiten von Referenzstrukturen nun mit einer erweiterten Messunsicherheit von  $U(k=2) = 1,6$  nm kalibriert werden. (G. Dai, FB 5.2, gaoliang.dai@ptb.de)

### **Ultra-präzise Positionsregelung mittels interferometrischer Lagedetektion und Tauchspulenantrieb**

Zur Minimierung der Antriebsschwingungen des Messschlittens am Nanometerkomparator sollen die Signale des Vakuum-Interferometers zur Feinregelung des Messschlittens mit einer Tauchspule genutzt werden. Erste Messungen an einem Testaufbau mit einem einachsigen Positioniersystem mit Luftlagern, an welchem die laser-interferometrischen Positionssignale hochaufgelöst demoduliert und einer FPGA-gestützten Lageregelung mit hoher Stellrate zugeführt wurden, ergaben Positionsstabilitäten im Bereich von 0,1 nm. (P. Köchert, J. Flüge, R. Köning, C. Weichert, FB 5.2, paul.koechert@ptb.de)

### **Upgrade des Nanometerkomparators zur Messung von Geradheit an Teilungen**

Um neben der Längenabweichung auch die Geradheit von Teilungen kalibrieren zu können, wurde der Nanometerkomparator mit einem neuentwickelten Heterodyn-Interferometer ausgestattet. Das Planspiegelinterferometer basiert auf räumlich getrennt zugeführten Strahlen mit 1,5 MHz Differenzfrequenz zur Vermeidung periodischer Nichtlinearitäten sowie drei parallelen Messstrahlen, um die Spiegeltopografie auch während der Messung mit einem deflektometrischen Verfahren bestimmen zu können. (C. Weichert, R. Köning, FB 5.2, christoph.weichert@ptb.de)

### **FPGA-basierte Auswertung von Interferogrammen für die Verkippungs- und Verschiebungsmessung**

Ein neuartiges Interferometerkonzept in Kombination mit flächenhaften Bildsensoren und Signalverarbeitungsalgorithmen in programmierbarer Logik ermöglicht die hochpräzise, gleichzeitige Erfassung von Verschiebung und Verkippung eines Messob-

jektes. (S. Strube, G. Molnar, FB 5.2, gabor.molnar@ptb.de)

### **Rückführbare und robuste Kalibrierverfahren für Mikroinnenstrukturen**

Im Rahmen des MNPQ-Projekts „Rückführbare und robuste Kalibrierverfahren für Mikroinnenstrukturen“ wurde am Beispiel von Mikroinnengewinden (u. a.  $M0,7 \times 0,175$ ) eine vollständige Verfahrenskette für die Kalibrierung von Mikroinnenstrukturen erstellt. Hierzu wurden u. a. zum Patent angemeldete Mikrohandeltasterstifte mit Tastkugeldurchmessern bis hinunter zu 110  $\mu\text{m}$  und ein flächenhaftes Auswerteverfahren entwickelt. (T. Krah, A. Wedmann, FB 5.3, thomas.krah@ptb.de,)

### **3D-Mikrotaster zur Messung von Mikroverzahnungen**

Ein 3D-Mikrotaster auf Silizium-Basis mit Tastkugeldurchmessern zwischen 50  $\mu\text{m}$  und 300  $\mu\text{m}$  wurde in ein industrielles Verzahnungsmessgerät integriert. Damit sind zukünftig Messungen von Verzahnungen mit Modulen bis unter 0,2 mm möglich. Grundsätzlich lässt sich der Mikrotaster in jedes Koordinatenmessgerät ohne aufwendige Anpassungen integrieren. (K. Kniel, FB 5.3, karin.kniel@ptb.de)

### **Diamantbeschichtete Taster für Koordinaten- und Formmessungen**

Diamantbeschichtete Taster für den Einsatz bei Koordinaten- und Formmessungen wurden untersucht. Die Taster haben eine glatte Oberfläche, geringe Formabweichungen und es wurde bei den Untersuchungen keine signifikante mechanische Abnutzung festgestellt. (M. Neugebauer, FB 5.3, michael.neugebauer@ptb.de)

### **Realisierung und Kalibrierung vom Luftspaltnormalen zur Rückführung koaxialer interferenzieller Schichtdickenmessung**

Zur Rückführung von interferometrischen Schichtdickenmessgeräten auf die Längeneinheit wurden aus optischen Planglasplatten und genormten Parallelendmaßen kostengünstige und anwenderfreundliche Luftspaltnormale entwickelt. Je nach Anforderung können mehrere Luftspalte unterschiedlicher Dicke in einem Normal realisiert werden. (P. Franke, FB 5.4, peter.franke@ptb.de)

### Internationale Angelegenheiten

#### **Internationale Vergleichsmessung zu Kugelplatten abgeschlossen**

Der Schlüsselvergleich EURAMET.L-K6, bei dem eine Kugelplatte mittels Koordinatenmesstechnik gemessen wurde, ist erfolgreich abgeschlossen worden. Alle Ergebnisse stimmen gut überein und zeigen somit, dass diese Messgröße in Europa gut beherrscht wird. (O. Jusko, FB 5.3, otto.jusko@ptb.de)

# Abteilung 6

## Ionisierende Strahlung



Die Gesundheit des Menschen und der Schutz der Umwelt sind die Themen, welche die großen Arbeitsgebiete der Abteilung bilden. Dabei geht es nicht nur um die direkte metrologische Unterstützung medizinischer Anwendungen wie zum Beispiel die Dosimetrie bei der Computertomografie, sondern auch um Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der Wirkmechanismen ionisierender Strahlung in biologischen Geweben, um Fragen des Strahlenschutzes für Personal und Patienten sowie die sichere Überwachung unserer Umwelt zum Schutz der Bürger vor den Gefahren radioaktiver Stoffe. Mit der messtechnischen Begleitung wichtiger Umweltthemen tragen wir zum Erhalt und der Verbesserung unserer Lebensbedingungen bei. Mit der Entwicklung moderner Techniken für die Messung ionisierender Strahlung – seien es geladene Teilchen, Photonen oder Neutronen – engagieren wir uns in Projekten der wissenschaftlichen Grundlagenforschung. Einige Beispiele aus dem Berichtszeitraum werden im Folgenden vorgestellt.

### **Geringe Radon-Konzentrationen erstmals genau messbar**

Radon (Rn-222) ist ein radioaktives Edelgas, das vor allem in Granit-Gesteinen gebildet wird und aus dem Boden austritt. Es kann aber auch in Baumaterialien vorhanden sein. Trotz relativ geringer Aktivitätskonzentrationen von ca. 50 Bq/m<sup>3</sup> bis 200 Bq/m<sup>3</sup> in der Atemluft verursacht Radon nach der Neubewertung seiner biologischen Wirksamkeit durch die International Commission on Radiological Protection (ICRP) einen Hauptanteil der Gesamtstrahlenexposition der Bundesbürger. Die Belastung durch medizinische Anwendungen ist vergleichbar groß. Daher zielt die neue Europäische Strahlenschutz-Grundnorm in Richtung der Reduzierung von Radon in Gebäuden. Für dieses Ziel werden viele Radioaktivitätsmessungen bei niedrigen Aktivitätspegeln erforderlich, bei denen die heute genutzten Messgeräte nicht kalibriert werden können.

Aus diesem Grund hat die PTB eine neuartige Einrichtung für die Kalibrierung von Radon-Messgeräten entwickelt. In einer Messkammer mit genau bekanntem Volumen wird eine Radon-Referenzatmosphäre erzeugt, deren zeitlich konstante Aktivitätskonzentration mit einem neuentwickelten Transfornormal (siehe Titelbild zum Bericht der

Abteilung) bestimmt wird. Die Referenzatmosphären werden erzeugt, indem das von einem Radium-226-Aktivitätsnormal emanierte Radon über einen edelgasdichten Kreislauf kontrolliert in die Messkammer überführt wird. Mithilfe der bekannten Größen Radium-Aktivität, Emanationsgrad und des Volumens der Kammer können Messgeräte zur Bestimmung der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Luft bei niedrigen Aktivitätskonzentrationen zwischen 100 Bq/m<sup>3</sup> und 1000 Bq/m<sup>3</sup> mit relativen Messunsicherheiten von nur 2 % rückführbar kalibriert werden. Die neue Anlage erweitert das Kalibrierangebot der PTB in einem weltweit bisher nicht verfügbaren, aber gesellschaftlich hoch relevanten Bereich. Das neue Kalibrierverfahren wird auch die Messgenauigkeit der erhobenen Daten zur Strahlenexposition der Menschen deutlich verbessern.

### **Neutronenstrahlung in Gorleben**

Nach den letzten Transporten von CASTOR-Behältern in das Transportbehälterlager (TBL) Gorleben wurde befürchtet, dass im Ort Gorleben der Strahlungspegel durch Neutronen erhöht sein könnte. Das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz hat deshalb die PTB gebeten, Messungen der Neutronenstrahlung im Ortszentrum von Gorleben durchzuführen. Am „Referenzmesshaus 5“ (MH5), das sich in ca. 2 km Entfernung vom TBL befindet (siehe Bild 1), wurde von uns die Neutronen-Umgebungsäquivalentdosisleistung bestimmt. Zudem wurde durch den Vergleich mit zeitnah auf dem Gelände der PTB durchgeführten Messungen geprüft, ob und ggf. in welcher Höhe es Dosisbeiträge am MH5 gibt, die nicht von der kosmischen Höhenstrahlung stammen. Letztlich wurde auch der Schwächungsfaktor des Messhauses für die dort vorliegende Neutronenstrahlung ermittelt.

Die Messungen wurden mit einem Teil unseres Vielkugelspektrometers (Bonnerkugel-Spektrometers) NEMUS durchgeführt. NEMUS ist das Sekundärnormal der PTB zur Weitergabe der Einheit für die Umgebungsäquivalentdosis für Neutronenstrahlung in unbekanntem Strahlungsfeldern wie zum Beispiel an Arbeitsplätzen und in der Umgebung.

Das wesentliche Kriterium bei der Auswahl der Kugeln ergab sich aus der Aufgabe, das Verhältnis von Messwerten an verschiedenen Orten (PTB in Braunschweig und MH5 in Gorleben) zu bestimmen, um daraus einen möglichen Beitrag von Neutronen künstlichen Ursprungs zu erkennen und um den Einfluss des Messhauses auf die Anzeige eines

Titelbild:

Vieldraht-Impuls-Ionisationskammer für die Messung der Radon-Aktivitätskonzentration in Luft.



Bild 1: Messaufbau am MH5. Das MH5 ist rechts hinten zu sehen.

Umgebungs-Neutronenmonitors zu ermitteln. Die Nutzung des kompletten NEMUS-Spektrometers war dafür nicht erforderlich.

Dementsprechend wurden für die Messungen drei geeignete Moderatorokugeln des Spektrometers ausgewählt.

- Zentrale Komponente für die Untersuchungen war die 12"-Kugel (Durchmesser 30,48 cm). Sie hat von allen Kugeln des Spektrometers das Dosisansprechvermögen mit der geringsten Energieabhängigkeit. Die 12"-Kugel wurde daher zur Messung der Umgebungsäquivalentdosis auf dem PTB-Gelände, außerhalb des MH5 und innerhalb des MH5 eingesetzt.
- Die 5"-Kugel (Durchmesser 12,70 cm) besitzt ein Fluenzansprechvermögen, das ein Maximum bei niederenergetischen Neutronen aufweist. Sie wurde als Indikator für eventuelle Änderungen des Neutronenspektrums genutzt. Sie wurde ebenfalls auf dem PTB-Gelände sowie außerhalb und innerhalb des MH5 eingesetzt.
- Die 8"-Kugel (Durchmesser 20,32 cm) wurde in Gorleben während der gesamten Messzeit unverändert außerhalb des MH5 als Monitor eingesetzt, um eventuelle zeitliche Änderungen der Strahlungsintensität nachzuweisen.

Bei allen Messungen wurden die Einflüsse des Eigenuntergrunds der verwendeten Detektoren, des während der Messungen herrschenden Luftdrucks

und der Intensität der kosmischen Neutronenstrahlung berücksichtigt.

Die Messergebnisse der 12"-Kugeln zeigen, dass die Dosisleistung in der Nähe des MH5 in 1 m Höhe über dem Boden mit dem Wert auf dem PTB-Gelände übereinstimmt. Also sind am MH5 keine Beiträge zur Neutronen-Umgebungsäquivalentdosis zu erkennen, die nicht von kosmischer Strahlung stammen. Die Messergebnisse bei den kleineren Kugeln geben Hinweise darauf, dass die unterschiedlichen Umgebungsbedingungen sich geringfügig auf den Anteil niederenergetischer Neutronen im Neutronenspektrum auswirken. Dies ist jedoch ohne Einfluss auf die Umgebungsäquivalentdosis. Der Vergleich der Messungen im Messhaus und außerhalb zeigt, dass ein Einfluss des Messhauses auf die Neutronen-Umgebungsäquivalentdosis der dort vorliegenden Neutronenstrahlung nicht nachweisbar ist.

Diese Ergebnisse sind ein wichtiger Beitrag zum Konzept der Dosismessungen am Zaun des TBL. Sie zeigen, dass Messgeräte im MH5 genutzt werden können, um den Beitrag kosmischer Neutronenstrahlung bei den Messwerten am Zaun des TBL zu ermitteln.

### Kalibrierung einer Neutronenquelle für das XENON-Experiment

Das internationale „XENON Dark Matter Project“ ist ein Experiment zur Suche nach WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), einer Variante der Dunklen Materie. Das Experiment ist im Gran-Sasso-Untergrundlabor aufgebaut und

nutzt flüssiges Xenon als Targetmaterial für den Nachweis supersymmetrischer Teilchen. An diesem Experiment sind zahlreiche Universitäten und Laboratorien weltweit beteiligt.

Im Detektor wird nach Ereignissen gesucht, bei denen WIMPs einen Rückstoßkern erzeugen und die durch eine bestimmte Signatur in den Messsignalen erkannt werden können. Durch Kalibriermessungen mit einer Neutronenquelle, mit der im Xenon ebenfalls Rückstoßkerne erzeugt werden, wird festgelegt, ob ein Ereignis die geforderten Kriterien erfüllt. Außerdem muss bei der Analyse der registrierten Ereignisse der Beitrag berücksichtigt werden, der von den Neutronen im Untergrundlabor stammt.

Diese Eigenschaften des Detektors werden mit Teilchentransportrechnungen untersucht. Zur Validierung der Rechnungen ist eine Messung mit einer schwachen Neutronenquelle erforderlich, die eine bekannte Quellstärke aufweist. Im Rahmen der XENON100-Kollaboration wurde eine  $^{241}\text{Am}$ -Be-Neutronenquelle beschafft und eine präzise Messung der Quellstärke dieser Quelle durch die PTB durchgeführt. Dazu wurde ein  $^3\text{He}$ -Detektor des Bonnerkugel-Spektrometers NEMUS in einer Moderatoranordnung (Bild 2) benutzt. Durch Vergleich der XENON100-Neutronenquelle mit einer PTB-Kalibrierquelle gleichen Typs, deren Quellstärke auf nationale Normale rückführbar ist, wurde

die Quellstärke bestimmt. Dabei wurden auch der Einfluss der Orientierung der Quelle in der Bestrahlungseinrichtung und deren Beitrag zur Messunsicherheit untersucht. Mit dem vom nominellen Wert des Herstellers der Quelle um ca. 30 % abweichenden Ergebnis der Kalibrierung ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Teilchentransportrechnungen und Messungen.

### Messung des differentiellen Neutron-Deuteron-Streuquerschnitts

Neben der Nukleon-Nukleon-Streuung ist die Streuung eines Neutrons an einem Deuteron, d. h. an dem aus einem Neutron und einem Proton bestehenden Kern des schwereren Wasserstoffatoms  $^2\text{H}$ , einer der fundamentalen Prozesse in quantenmechanischen Wenigkörper-Systemen. Außerdem hat die Neutron-Deuteron-Streuung eine wichtige technische Bedeutung in mit Schwerwasser ( $^2\text{H}_2\text{O}$ ) moderierten Kernreaktoren. Die Analyse von Experimenten an Schwerwasser-moderierten kritischen und subkritischen Reaktormodellen führte zu Änderungen der Winkelverteilungen der gestreuten Neutronen zwischen den Kerndatenbibliotheken ENDF/B-VI und ENDF/B-VII, mit denen aber nicht alle Messergebnisse erklärt werden konnten. Deshalb wurde der differentielle Wirkungsquerschnitt für die Neutron-Deuteron-Streuung in die von der Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD betreuten High-

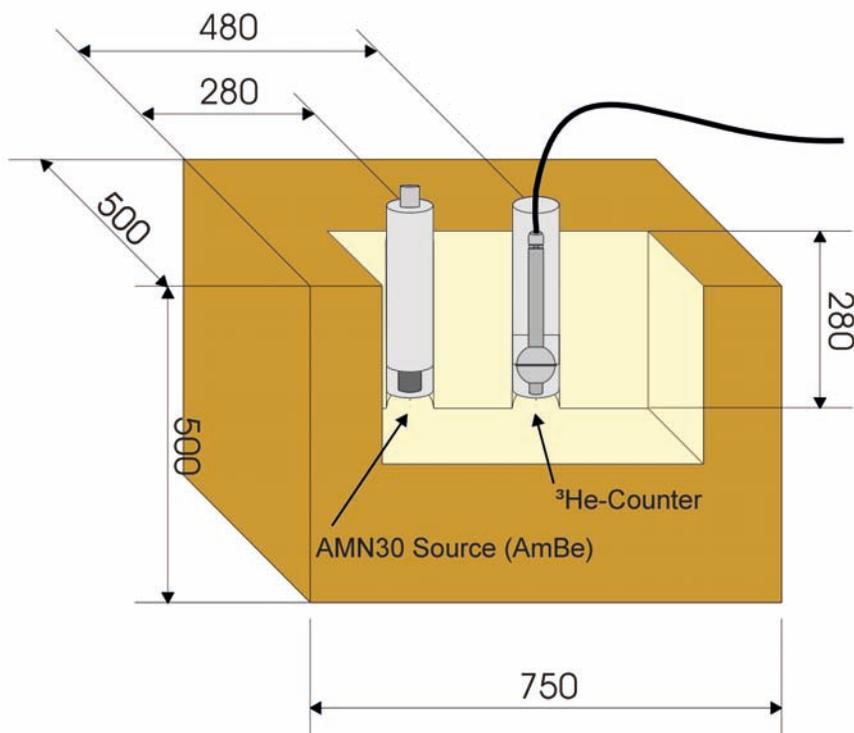


Bild 2: Aufbau zur Messung der Neutronenquellstärke. In einem Moderator aus Paraffin sind der  $^3\text{He}$ -Detektor und die zu untersuchende Neutronenquelle untergebracht.

Priority Request List (HPRL) für Kerndatenmessungen aufgenommen. Trotz ihrer offensichtlichen technischen und wissenschaftlichen Bedeutung liegen für die Neutron-Deuteron-Streuung im Energiebereich unterhalb von 1 MeV nur relativ wenige, teilweise inkonsistente Messungen aus den 1950er und 1960er Jahren vor. Deshalb sind neuere experimentelle Daten zur Klärung der aufgetretenen Fragen immer noch erforderlich.

Aus diesen Gründen wurde in einer Zusammenarbeit mit dem IRMM in Geel/Belgien eine erste Reihe von Messungen mit einem Proportionalzähler der PTB durchgeführt. Statt der normalerweise als Zählgas für die Messung der Neutronenfluenz eingesetzten Mischung aus leichtem Wasserstoff ( $^1\text{H}_2$ ) und Methan ( $\text{C}^1\text{H}_4$ ) wurde für diese Messungen ein Gasmisch aus schweren Wasserstoff (Deuterium,  $^2\text{H}_2$ ) und deuteriertem Methan ( $\text{C}^2\text{H}_4$ ) verwendet. Dabei wird das Zählgas im Proportionalzähler sowohl als Streutarget als auch zum Nachweis der bei der Streuung von Neutronen an Deuterium entstehenden Rückstoßdeuteronen verwendet. Bei einem idealen Detektor würde die Impulshöhenverteilung direkt den differentiellen Streuquerschnitt im Schwerpunktsystem widerspiegeln. In einem realen Detektor führen aber vor allem die endliche Impulshöhenauflösung und die sogenannten Randeffekte durch unvollständige Energiedeposition von Deuteronen am Rand des Zählvolumens sowie der Untergrund parasitärer Photonen zu Verzerrungen der Impulshöhenverteilung. In einem neuen Experiment wurde der Photonenuntergrund durch elektronische Diskriminierung sowie durch Abschirmung möglichst weit unterdrückt. Die Randeffekte sowie der Beitrag von Kohlenstoffrückstoßkernen aus der Neutron-Kohlenstoff-Streuung wurden durch ein neues Monte-Carlo-Simulationsprogramm möglichst gut modelliert.

Das Bild 3 zeigt oben die experimentelle Impulshöhenverteilung des Proportionalzählrohrs für eine Neutronenenergie von 498 keV sowie simulierte Impulshöhenverteilungen, die mit verschiedenen Datensätzen für den differentiellen Wirkungsquerschnitt berechnet wurden. Unten sind die verwendeten Daten für den differentiellen Wirkungsquerschnitt im Schwerpunktsystem als Funktion des Streuwinkels des Neutrons im Schwerpunktsystem dargestellt.

Die Ergebnisse der neuen Messungen unterstützen die Daten aus der neueren Bibliothek ENDF/B-VII, während die Winkelverteilungen aus der japanischen Bibliothek JENDL 4 und aus der älteren Bibliothek

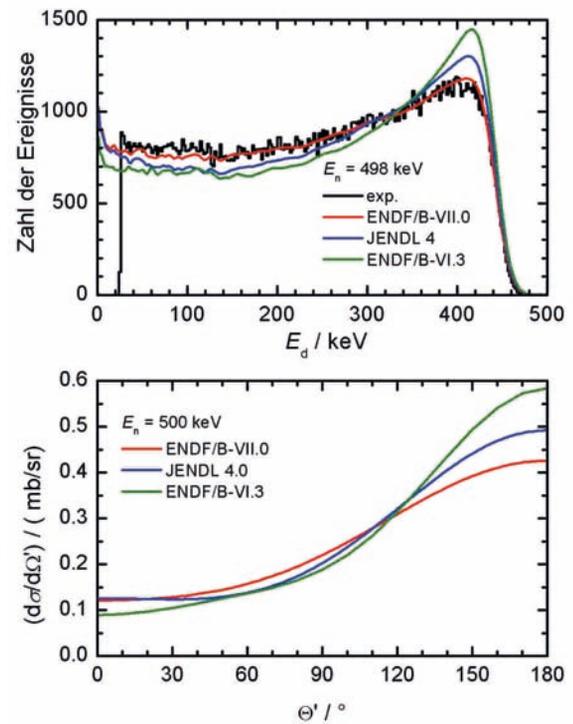
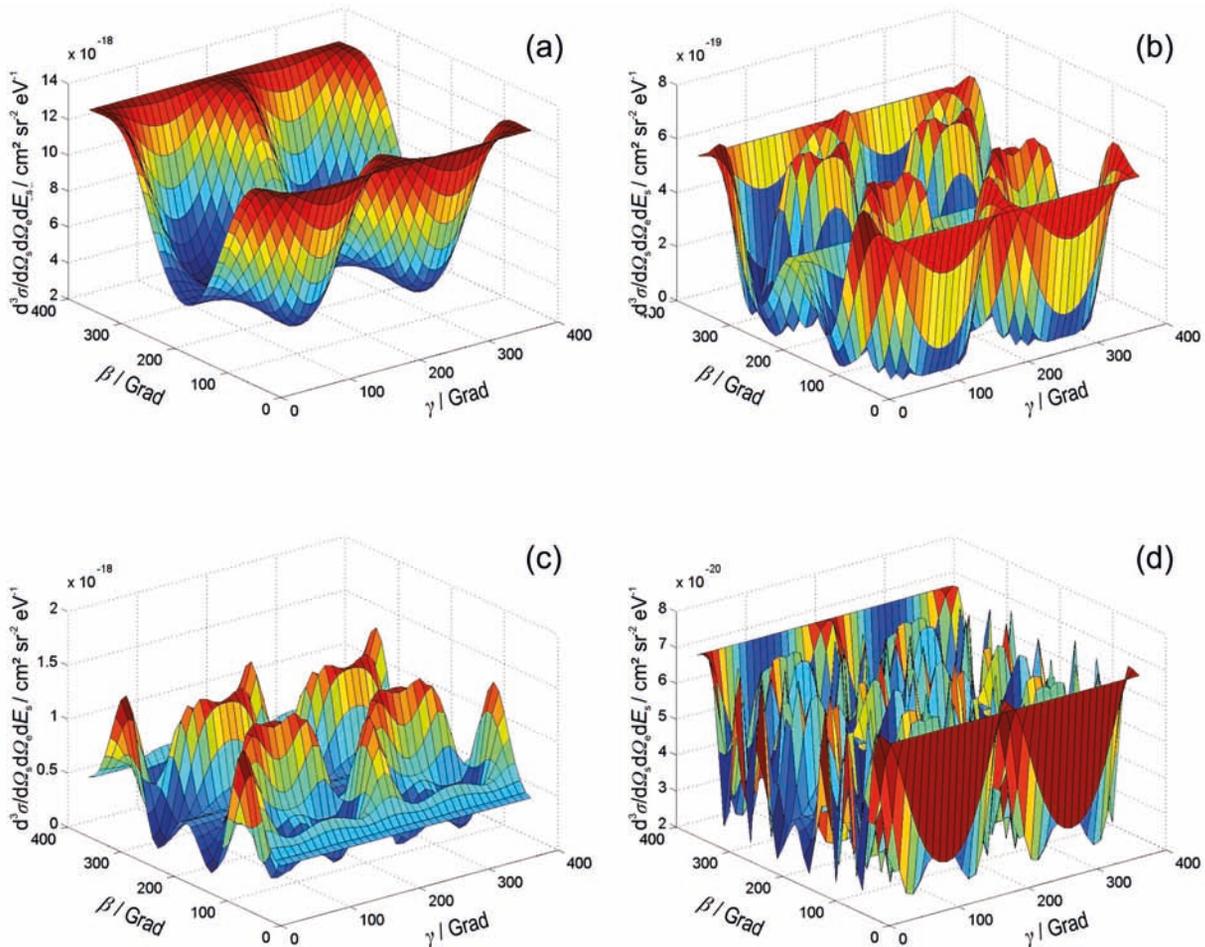


Bild 3: Experimentelle (Histogramm) und simulierte (farbige Linien) Impulshöhenverteilungen für eine Neutronenenergie von 498 keV (oben) und die für die Simulation verwendeten differentiellen Wirkungsquerschnitte als Funktion des Neutronenstreuwinkels im Schwerpunktsystem (unten)

ENDF/B-VI eine deutlich zu hohe Anisotropie bei großen Streuwinkeln zeigen.

### Einfluss eines externen Magnetfeldes auf Elektronenstreuwirkungsquerschnitte für orientierte Wassermoleküle

In der Strahlentherapie wird versucht, eine hohe Strahlendosis in das Tumervolumen zu applizieren, um die Tumorzellen abzutöten oder deren Wachstum zu hemmen, wobei das gesunde Gewebe und Risiko-Organen soweit wie möglich geschont bleiben sollen. Um die Qualität der strahlentherapeutischen Behandlung zu steigern, ist die Visualisierung des Zielvolumens und des umliegenden Gewebes während der Bestrahlung hilfreich. Zu diesem Zweck werden derzeit Geräte entwickelt, die eine vorteilhafte Kombination aus einem Linearbeschleuniger und einem Kernspintomografen darstellen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welchen Einfluss das Magnetfeld des Kernspintomografen auf die Wechselwirkung zwischen Strahlung und Gewebe hat. In einem ersten Ansatz wurde der Einfluss eines Magnetfeldes auf die Elektronenwirkungsquerschnitte für die elastische Streuung und die Ionisation an Wassermolekülen studiert. Ziel der im Rahmen des internationalen Projekts EMRP-



JRP MRIsafety (<http://www.ptb.de/emrp/mri.html>) durchgeführten Studie war es herauszufinden, ob in einem konventionellen Monte-Carlo-Simulationsprogramm zur Dosisberechnung die Streuwirkungsquerschnitte modifiziert werden müssen, wenn der Strahlungstransport in einem Magnetfeld simuliert wird.

Um diese Größen zu bestimmen, wurden im ersten Schritt die differentiellen Wirkungsquerschnitte für Elektronenstreuung an orientierten Wassermolekülen theoretisch berechnet. Die Orientierung des Wassermoleküls wurde mithilfe der Eulerschen Winkel ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) definiert, die eine Folge von Rotationen um die Achsen des Wassermoleküls beschreiben, und die differentiellen Elektronenstreuquerschnitte für verschiedene Werte der Eulerschen Winkel von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  berechnet. Die differentiellen Wirkungsquerschnitte für die elastische Streuung wurden mithilfe des Independent-Atom-Modells berechnet, während für die Ionisation ein auf der ersten Born'schen Näherung beruhender Ansatz benutzt wurde. Ergebnisbeispiele sind in Bild 4 zu sehen und demonstrieren die starke Abhängigkeit der Streuwirkungsquerschnitte von den Euler'schen Orientierungswinkeln. Die Bestimmung des Mittelwerts der Wirkungsquerschnitte ohne Magnet-

Bild 4: Differentielle Wirkungsquerschnitte für elastische Elektronenstreuung an einem orientierten Wassermolekül als Funktion der Eulerwinkel  $\beta$  und  $\gamma$  für Streuwinkel von  $30^\circ$  (links) und  $90^\circ$  (rechts) und für unterschiedlichen Energien: 50 eV (a und b), 200 eV (c und d)

feld wurde durch eine Integration über die drei Euler'schen Winkel erreicht. Im zweiten Schritt wurde dann die Präsenz eines Magnetfeldes berücksichtigt. Das Magnetfeld führt zu einem Energieunterschied zwischen verschiedenen Orientierungen der Wassermoleküle bezüglich des Magnetfelds. Um den Mittelwert des differentiellen Wirkungsquerschnitts im Magnetfeld zu ermitteln, wurde die statistische Verteilung der relativen Anzahl an Molekülen mit einer bestimmten Orientierung mit einem Boltzmannfaktor berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Mittelwerten der differentiellen Wirkungsquerschnitte für orientierte Wassermoleküle mit und ohne Magnetfeld vorhanden sind. Eine Modifikation der Wirkungsquerschnitte im Monte-Carlo-Simulationsprogramm zur Dosisberechnung ist also nicht notwendig, wenn ein Magnetfeld in der Simulation berücksichtigt werden soll.

## Bremsvermögen von flüssigem Wasser für Kohlenstoffionen

In der Strahlentherapie mit schweren Ionen ist das Bremsvermögen von Wasser die elementare Größe zur Berechnung von Dosisverteilungen in der Bestrahlungsplanung. Für hohe Projektilenergien kann das Bremsvermögen mithilfe der Bethe-Bloch-Gleichung theoretisch berechnet werden, wohingegen für niedrige Projektilenergien im Bereich des maximalen Bremsvermögens komplexe Wechselwirkungen vorherrschen, für die bislang keine gültige Theorie existiert. In diesem Energiebereich existieren für schwere Ionen derzeit auch keine experimentellen Daten für das Bremsvermögen. Stattdessen werden in Wasserdampf oder D<sub>2</sub>O-Eis durchgeführte Messungen auf die flüssige Phase extrapoliert.

Das Bremsvermögen von Kohlenstoffionen mit kinetischen Energien im Bereich des maximalen Bremsvermögens (ca. 4 MeV) für flüssiges Wasser kann mithilfe der sogenannten Inverted Doppler Shift Attenuation Methode ermittelt werden. Dazu werden angeregte Kohlenstoffionen durch Beschuss eines dünnen Kohlenstofftargets mit  $\alpha$ -Teilchen erzeugt. Hierfür wurde ein Target entwickelt, das aus einer dünnen Eintrittsfolie aus Tantal besteht, auf die eine 20 nm dicke Kohlenstoffschicht aufgebracht ist. Mit der Eintrittsfolie wird bei möglichst geringem Einfluss auf Energie und Winkelverteilung der  $\alpha$ -Teilchen sowie geringstmöglichem Untergrundbeitrag das Wasservolumen vom Vakuum des Strahlrohrs getrennt.

Während die angeregten Kohlenstoffionen entlang ihrer Bahn durch das Wasser laufen, erfahren sie eine negative Beschleunigung und zerfallen in ihren Grundzustand. Das beim Zerfall der Kerne in den Grundzustand emittierte  $\gamma$ -Quant ist mit einer vom Geschwindigkeitsvektor des Kohlenstoffkerns im Moment des Zerfalls und der Emissionsrichtung des  $\gamma$ -Quants korrelierten Doppler-Verschiebung beaufschlagt. Die Energieverteilung der  $\gamma$ -Quanten wird mithilfe eines hochreinen Germanium-Spektrometers aufgenommen.

Das gemessene  $\gamma$ -Spektrum ist die Faltung aus der Startenergieverteilung der angeregten Kohlenstoffkerne und der durch den Abbremsprozess und die Verteilung der Zeitdauer des angeregten Zustands bis zum Zerfall gegebenen Dopplerverteilung, die die gesuchte Information darstellt. Zur Bestimmung der für die Entfaltung erforderlichen Startenergieverteilung kann eine Dopplerverteilung verwandt werden, die den Zerfall der Kohlenstoffkerne im Vakuum repräsentiert. Hierfür wurde bei dem neu-konstruierten Target die Möglichkeit eines evakuierbaren Bereichs hinter dem Kohlenstofftarget vorgesehen. Ein erstes Experiment wurde im Rahmen einer Doktorarbeit an den Ionenbeschleunigeranlagen der PTB durchgeführt. Damit wurde das neu-konstruierte Target getestet und der zu erwartende Untergrund abgeschätzt (siehe Bild 5). Das durchgeführte Experiment zeigt, dass die Messung des Bremsvermögens von Wasser mithilfe der Inverted Doppler Shift Attenuation prinzipiell realisierbar ist.

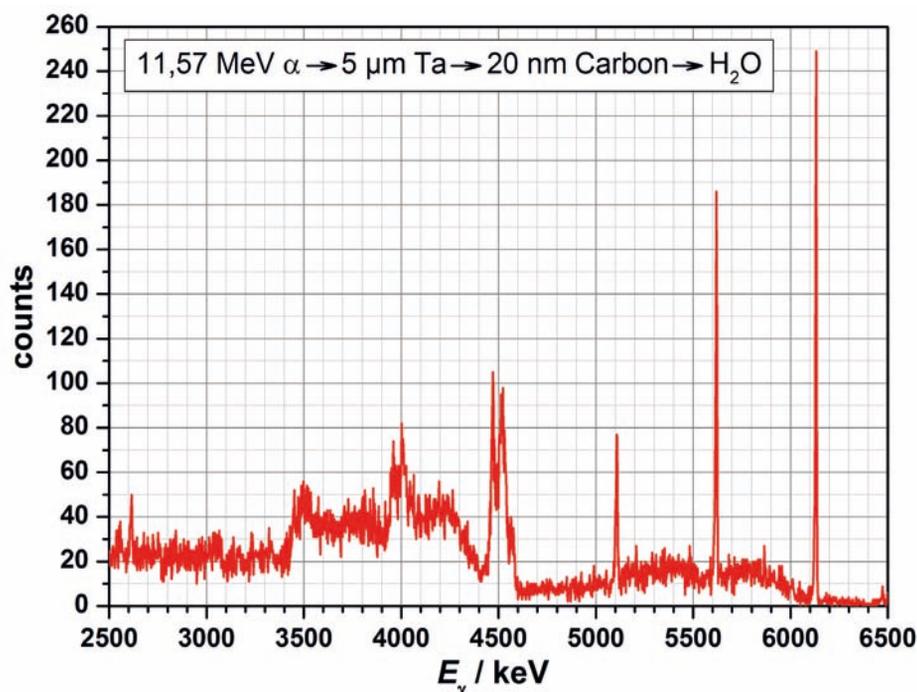


Bild 5: Gemessenes  $\gamma$ -Spektrum nach ca. einer Stunde Messzeit. Die Linien um 4,5 MeV entsprechen dem Dopplerspektrum der bei Abbremsung der Kohlenstoffprojekteile in flüssigem Wasser emittierten  $\gamma$ -Quanten und sind deutlich vom restlichen Untergrund abgesetzt.

# In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de))

## Grundlagen der Metrologie

### ICRU Committee on Radon Measurements and Reporting of Radon Exposures

Die neunköpfige internationale Arbeitsgruppe zur Erarbeitung eines ICRU-Reports rund um das Themenfeld Radonmessungen traf sich zur ihrem letzten gemeinsamen Arbeitsmeeting in Dublin. Dieser Report wird weltweit einheitliche Qualitätsstandards für Radonmessungen (Rn-222 und Rn-220 und deren zugehörige Folgeprodukte), den Umgang mit Expositionsbestimmungen und einen Vorschlag zur einheitlichen Dosimetrie liefern, der die neuesten Erkenntnisse aus ICRP 115 berücksichtigt. Die Veröffentlichung des Reports wird 2014 erwartet. (A. Röttger, FB 6.1, [annette.roettger@ptb.de](mailto:annette.roettger@ptb.de))

### Nachweis- und Erkennungsgrenzen: Gleichzeitige Radon/Thoron-Messungen mit passiven Messsystemen

Implementierung der Norm ISO 11929 auf gemischte Rn-222/Rn-220-Expositionen: Die Bestimmung der Exposition von Rn-222 und Rn-220 mit angepassten passiven Detektorsystemen mit jeweils zugehörigem Untergrund ist ein bisher nicht behandelter Sonderfall. Die Expositionen wurden an der Radonnormal-Kammer und der Thoron-Folgeproduktkammer der PTB mit unterschiedlichen Aktivitätskonzentrationen durchgeführt. Die PTB ermittelte die Aktivitätskonzentrationen und führte die Expositionen durch. Die Bestimmung der Spurdichten erfolgte durch den Anwender, während zur Entwicklung des mathematischen Modells entsprechend ISO 11929 D. Schrammel vom KIT gewonnen werden konnte. Es wurde ein Analysesystem geschaffen, welches für passive Radon-Messsysteme grundsätzlich anwendbar ist und dazu beiträgt, Expositionspläne zu optimieren. (A. Röttger, FB 6.1, [annette.roettger@ptb.de](mailto:annette.roettger@ptb.de), A. Honig, FB 6.1, [anja.honig@ptb.de](mailto:anja.honig@ptb.de), D. Schrammel, KIT, Karlsruhe)

### Experimentelle Bestimmung von Strahlungsqualitäts-Korrektionsfaktoren für häufig verwendete Ionisationskammertypen

In der klinischen Praxis werden zur Dosismessung Ionisationskammern verwendet, die zur Anzeige der Wasser-Energiedosis im  $^{60}\text{Co}$ -Strahlungsfeld kalibriert sind. Wird ein solches Dosimeter in einem hochenergetischen Photonen- oder Elektronenfeld eines klinischen Linearbeschleunigers eingesetzt, so muss die Änderung des Ansprechvermögens

des Dosimeters durch die Anwendung eines Strahlungsqualitäts-Korrektionsfaktors  $k_Q$  berücksichtigt werden. Für sieben in der klinischen Praxis häufig verwendete Ionisationskammertypen wurden  $k_Q$ -Faktoren in hochenergetischen Photonenfeldern experimentell bestimmt. Die relative Standardmessunsicherheit dieser experimentell bestimmten  $k_Q$ -Faktoren beträgt 0,4 % ( $k = 1$ ) und ist deutlich geringer als die bislang in verschiedenen Dosimetrieprotokollen angegebene Unsicherheit von ca. 1 %. (R.-P. Kapsch, FB 6.2, [ralf-peter.kapsch@ptb.de](mailto:ralf-peter.kapsch@ptb.de))

### Charakterisierung eines Röntgenspeicherfoliensystems für die 3D-Vermessung der Wasser-Energiedosis einer Miniatur-Röntgenröhre

Ein kommerzielles Röntgenspeicherfoliensystem wurde auf seine Eignung zur Messung der Wasser-Energiedosis im Strahlungsfeld einer Miniatur-Röntgenröhre untersucht. (L. Hoffmann, FB 6.2 und D. Radeck, FB 6.2, [desiree.radeck@ptb.de](mailto:desiree.radeck@ptb.de))

### Bestimmung der räumlichen Ansprechfunktion von Ionisationskammern in Elektronen- und Photonenstrahlungsfeldern

In der Strahlentherapie wird zunehmend auf Bestrahlung mit kleinen Feldern und Feldern gesetzt, die dem Tumorprofil angepasst werden. Das stellt besondere Herausforderungen an die Dosimetrie, da Methoden entwickelt werden müssen, um die Dosisverteilung dieser Felder mit hohem räumlichem Auflösungsvermögen ausmessen zu können. Ionisationskammern sind wegen ihrer einfachen Handhabung und der vergleichsweise geringen Energieabhängigkeit ihres Ansprechvermögens besonders geeignet für die klinische Dosimetrie. An den klinischen Beschleunigern der PTB wurde deshalb das räumliche Ansprechvermögen typischer Ionisationskammern mit einer besseren Statistik und höheren Auflösung ausgemessen, als dies bis jetzt möglich war. (S. Ketelhut, FB 6.2, [steffen.ketelhut@ptb.de](mailto:steffen.ketelhut@ptb.de))

### Messung des differentiellen Neutron-Deuteron-Streuquerschnitts im Energiebereich von 100 keV bis 600 keV mit einem Rückstoßprotonenproportionalzählrohr

Neben der Nukleon-Nukleon-Streuung ist die Streuung eines Neutrons an einem Deuteron, d. h. an dem aus einem Neutron und einem Proton bestehenden Kern des schwereren Wasserstoffatoms

$^2\text{H}$ , einer der fundamentalen Prozesse in quantenmechanischen Wenigkörper-Systemen. (R. Nolte, FB 6.4, ralf.nolte@ptb.de)

**Neue  $^{252}\text{Cf}$ -Quelle für die Bestrahlungsanlage mit Neutronenquellen der PTB**

Für Kalibrierungen und Bestrahlungen von Neutronen-Dosimetern werden in der PTB hauptsächlich  $^{252}\text{Cf}$ -Neutronenquellen verwendet. Aufgrund der Halbwertszeit von 2,645 Jahren konnten mit der vorhandenen, 10 Jahre alten Quelle die erforderlichen Dosisleistungen nicht mehr erreicht werden. Eine neue  $^{252}\text{Cf}$  Quelle wurde angeschafft, umfassend charakterisiert und in die Bestrahlungsanlage eingebaut. (A. Zimbal, FB 6.5, andreas.zimbal@ptb.de)

**Kalibrierung einer Neutronenquelle für das XENON-Experiment**

Das „XENON Dark Matter Project“ ist ein Experiment im Gran-Sasso-Untergrundlabor zur Suche nach WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), einer Variante der Dunklen Materie. Die präzise Bestimmung der Quellstärke einer für dieses Experiment benutzten Neutronenquelle konnte Diskrepanzen aufklären. (H. Schuhmacher, FB 6.5, helmut.schuhmacher@ptb.de)

**Untersuchung von elektronenstoßinduzierten Fragmentierungsprozessen von DNA-Bausteinen**  
 Fragmentierungsquerschnitte von Tetrahydrofuran für Elektronen gemessen. (A. Arndt, FB 6.6, alexander.arndt@ptb.de)

**Doppelt differenzielle inelastische Elektronenstreuquerschnitte von Trimethylphosphat**  
 Ionisierungsquerschnitte von Trimethylphosphat für Elektronen gemessen. (W. Y. Baek, FB 6.6, woon-yong.baek@ptb.de)

**Verbesserung der Spurstruktursimulationen von Alphateilchen in Stickstoff und Propan**

Spurstruktursimulationen von Alphateilchen (100 keV – 20 MeV) in Stickstoff und Propan wurden erfolgreich um detaillierte Wirkungsquerschnitte für Umladungsprozesse erweitert. (M. Bug, FB 6.6, marion.bug@ptb.de)

**Spurstruktur von Kohlenstoffionen verschiedener Energien nanodosimetrisch charakterisiert**

Die Häufigkeitsverteilungen der Ionisationsclustergrößen für Kohlenstoffionenstrahlen verschiedener Energien in 1,2 mbar  $\text{N}_2$  und 1,2 mbar  $\text{C}_3\text{H}_8$  wurden gemessen. (G. Hilgers, FB 6.6, gerhard.hilgers@ptb.de)

**Messung des Bremsvermögens von flüssigem Wasser für Kohlenstoffionen**

Das Bremsvermögen von flüssigem Wasser für Kohlenstoffionen mit Energien im Bereich des maximalen Bremsvermögens kann mithilfe der Inverted Doppler Shift Attenuation Methode ermittelt werden. (J. Rahm, FB 6.6, johannes.rahm@ptb.de)

**Einfluss eines externen Magnetfeldes auf Elektronenstreuwirkungsquerschnitte für orientierte Wassermoleküle**

Die teilweise Orientierung von Wassermolekülen in einem 1,5 T starken Magnetfeld hat keinen Einfluss auf die Mittelwerte der Streuwirkungsquerschnitte für Elektronen im Energiebereich von 50 eV bis 1 keV. (H. Szymanowski, FB 6.6, hanitra.szymanowski@ptb.de)

**Berechnung des diamagnetischen Tensors des Wassermoleküls**

Der diamagnetische Tensor des Wassermoleküls wurde aus der Elektronendichteverteilung berechnet. (R. Neungang Ngangwa, FB 6.6, romaine.neungang-ngangwa@ptb.de)

**Metrologie für die Wirtschaft**

**Hochempfindlicher Ladungsmesser zur Messung von Ionisationskammerströmen**

Ströme aus Ionisationskammern liegen im Bereich von weniger als einem Femtoampere ( $10^{-15}$  A) bis zu einigen Nanoampere ( $10^{-9}$  A) und werden am sichersten über eine Ladungsmessung bestimmt. Ein derartiger Ladungsmesser mit mehreren Messbereichen und einem Eingangsruhestrom von weniger als 0,3 fA ist kommerziell nicht erhältlich und wurde darum entwickelt. Zur Qualitätskontrolle wurde der Ladungsmesser mit dem Stromnormal der PTB verglichen. Dieser Vergleich zeigte, dass ein Strom von 40 fA mit einer Standard-Unsicherheit von 0,1 fA bestimmt werden kann. (G. Buchholz, FB 6.3, gerd.buchholz@ptb.de)

**Metrologie für die Gesellschaft**

**Geringe Radon-Konzentrationen werden erstmals genau messbar**

Radon trägt nach neuesten Erkenntnissen gleichauf mit der Medizin am stärksten zur Strahlenbelastung der Bevölkerung bei. Im Hinblick auf die geplante EU-weite Absenkung der Referenzwerte, ausgelöst durch die Neubewertung des Radons durch die International Commission on Radiological Protection (ICRP), ist in der PTB eine neuartige Anlage zur Ka-

librierung von Radon-Messgeräten entwickelt worden. (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de)

### **Low-Level-Radonnormalkammer geht in Betrieb**

Die PTB erweitert ihr Leistungsangebot bezüglich Rn-222: Kunden stehen nun auch Kalibrierungen bei Aktivitätskonzentration zwischen 100 Bq/m<sup>3</sup> und 1000 Bq/m<sup>3</sup> mit den von der PTB gewohnten kleinen Messunsicherheiten von nur 2 % zur Verfügung. Dieses Angebot resultiert aus den Ergebnissen der 2013 abgeschlossenen Promotion von D. Linzmaier und wurde um die entsprechenden Qualitätssicherungsmaßnahmen für den Betrieb einer PTB-Kalibriereinrichtung ergänzt. (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de, A. Honig, FB 6.1, anja.honig@ptb.de, D. Linzmaier)

### **Medizinischer Computertomograf für die Dosimetrie**

Die Anzahl computertomografischer (CT-)Untersuchungen in Deutschland hat sich seit 1996 bis heute mehr als verdoppelt. Im Jahre 2010 waren 61 % der kollektiven effektiven Dosis der Bevölkerung durch röntgendiagnostische Untersuchungen auf CT-Aufnahmen zurückzuführen. Diese Zahlen belegen die große Bedeutung der CT-Dosimetrie. Die Grundlagen der CT-Dosimetrie wurden bereits Anfang der 1980er Jahre kurz nach der Erfindung des ersten CTs gelegt und haben sich bis heute kaum verändert. Dagegen vollzog sich bei den CT-Geräten eine rasante technologische Entwicklung. Für die neuen Scanner-Generationen können die veralteten Konzepte der CT-Dosimetrie nicht mehr verwendet werden. Weltweit wird deshalb über neue Konzepte in der CT-Dosimetrie nachgedacht. Die PTB ist für die Darstellung und Weitergabe der Einheiten für die CT-Dosimetrie und Bauartprüfungen von CT-Diagnostikdosimetern nach dem Eichgesetz zuständig. Zur Erhaltung der Kompetenz und zur Bearbeitung wichtiger Fragen auf dem Gebiet der Metrologie für die CT-Dosimetrie in der Medizin hat sich die PTB einen modernen 64-Zeilen-CT-Scanner angeschafft. (B. Alikhani, FB 6.2, babak.alikhani@ptb.de)

### **Messungen im Streustrahlungsfeld eines medizinischen Beschleunigers**

In der Medizin werden zur Tumor-Strahlentherapie vermehrt medizinische Linearbeschleuniger eingesetzt. Aufgrund der erzeugten hohen Photonenenergie entsteht auch ein intensives Streustrahlungsfeld außerhalb des Nutzstrahls. Dieses Streustrahlungsfeld, das zu einer zusätzlichen unerwünschten Strahlenbelastung führt, wurde mittels spezieller Ionisationskammern und Personendosimetern an den medizinischen Linearbeschleunigern der PTB

an verschiedenen Messorten im Raum bestimmt. Die Messgeräte wurden so ausgewählt, dass sie auch unter den speziellen Bedingungen richtig messen. (H. Zutz, FB 6.3, hayo.zutz@ptb.de)

### **Forschungsprojekt für grundlegende Verbesserung bei der Strahlentherapie: mit Microbeam und Nanodosimetrie**

Im Rahmen des European Metrology Research Programme (EMRP) koordiniert die PTB das Forschungsprojekt „BioQuaRT: Biologically weighted Quantities in Radiotherapy“. Mit Partnern aus 6 Ländern und Fördermitteln von 3,5 Millionen Euro über 3 Jahre soll die Entwicklung eines metrologischen Fundaments für die konsistente Quantifizierung (Dosimetrie) der physikalischen und der biologischen Strahlenwirkung für alle Arten von ionisierender Strahlung in der Therapie vorangetrieben werden. (U. Giesen, FB 6.4, ulrich.giesen@ptb.de, H. Rabus, FB 6.6, hans.rabus@ptb.de)

### **Messung der Neutronenstrahlung in Gorleben**

Auf Anfrage des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz wurden Messungen im Ortszentrum von Gorleben durchgeführt. Am Messhaus 5, das sich in ca. 2 km Entfernung vom Transportbehälterlager befindet, wurde gezeigt, dass dort ausschließlich Neutronen aus der kosmischen Strahlung zur Umgebungs-Äquivalenzdosis beitragen. (H. Schuhmacher, FB 6.5, helmut.schuhmacher@ptb.de)

### **Neutronenmonitor AGREM – Testmessungen in gepulsten Strahlungsfeldern**

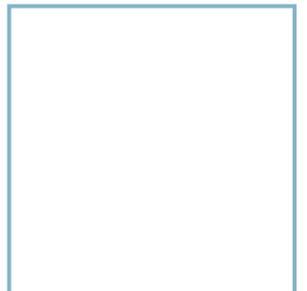
Der an der PTB entwickelte Neutronenmonitor AGREM wurde in unterschiedlichen gepulsten Strahlungsfeldern getestet und mit anderen Neutronenmonitoren verglichen. Während kommerziell erhältliche Monitore bei ansteigender Dosis im Puls ein Sättigungsverhalten aufwiesen, stieg die Anzeige des PTB-Monitors in allen Fällen linear mit der Dosis an. (M. Luszik-Bhadra, FB 6.5, marlies.luszik-bhadra@ptb.de)

### **Entfaltungsalgorithmus für Elementrekonstruktion bei der Neutronenresonanzradiografie**

Neutronenresonanzradiografie ermöglicht die Messung der Verteilung bestimmter leichter Elemente (C, N, O, H) in großvolumigen Proben. Ein auf dem Bayes'schen Verfahren beruhender Algorithmus zur Rekonstruktion der Elementverteilung aus experimentellen und simulierten Datensätzen wurde entwickelt und mithilfe simulierter Radiografieexperimente erfolgreich getestet. (V. Dangendorf, FB 6.5, volker.dangendorf@ptb.de)

# Abteilung 7

## Temperatur und Synchrotronstrahlung



Die Abteilung *Temperatur und Synchrotronstrahlung* stellt in den Themenbereichen Thermometrie, Radiometrie und Vakuummetrologie die jeweils relevanten Skalen über einen sehr breiten Bereich dar und gibt sie weiter. Synchrotronstrahlung der Elektronenspeicherringe Metrology Light Source (MLS) und BESSY II wird für Radiometrie im kurzwelligen Bereich (Röntgen- bis UV-Bereich) genutzt, in zunehmendem Umfang aber auch für Nanometrologie und (Mikro-)Spektrometrie. Die Messung thermischer Energie gewinnt wachsende Bedeutung und die weltweit führende Position bei der Entwicklung von SQUIDs im Bereich Kryosensorik konnte in mehreren Anwendungen belegt werden (siehe auch „Nachrichten des Jahres“). F&E-Arbeiten in allen genannten Bereichen werden in nach wie vor steigendem Umfang geleistet, insbesondere auch im Rahmen des europäischen Metrologie-Forschungsprogramms EMRP. Nachfolgend werden einige ausgewählte Entwicklungen und Ergebnisse dargestellt.

### Metrologie mit Synchrotronstrahlung

An der MLS wurde der neue Messplatz für die Kalibrierung von Strahlungsquellen umfangreich charakterisiert und validiert. Die MLS dient dabei als primäres Strahlernormal. Bei der Bestimmung spektraler Strahlstärken und -dichten von Deuterium- und Wolframbandlampen konnte sehr

gute Übereinstimmung mit Messergebnissen von BESSY II und gegen Temperatur-Hohlraumstrahlung erzielt werden.

Die umfangreichen Messungen im Rahmen der langjährigen Kooperationen zur EUV-Lithografie erfolgen seit Oktober 2013 größtenteils am EUV-Strahlrohr der MLS. Dazu wurde im Sommer 2013 das EUV-Reflektometer der PTB von BESSY II transferiert. Von dessen erfolgreicher Inbetriebnahme an der MLS (Bild 1) konnten sich auch die mehr als 110 Teilnehmer aus Industrie und Forschung des 273. PTB-Seminars „VUV and EUV Metrology“ überzeugen, das am 24. und 25. Oktober im Hörsaal des Helmholtz-Zentrums Berlin in Berlin-Adlershof stattfand (Bild 2). Im Gegenzug wurde am EUV-Strahlrohr bei BESSY II ein neues EUV-Ellipso-Scatterometer in Betrieb genommen (Titelbild der Abt. 7).

Mit dem ISAS-Institut für Analytische Wissenschaften und der TU Berlin wurde vereinbart, am Undulatorstrahlrohr der MLS gemeinsam quantitative Untersuchungen an Oberflächen mit Ellipsometrie und Elektronenspektroskopie durchzuführen. Erste Experimente an organo-metallischen Schichtsystemen, die z. B. in den Bereichen Optoelektronik und Photovoltaik eine Rolle spielen, sollen u. a. in dem neuen EMRP-Projekt „ThinErgy“ fortgesetzt werden.



Bild 1: Das EUV-Reflektometer der PTB am EUV-Strahlrohr der MLS

Titelbild:

Das EUV-Ellipso-Scatterometer der PTB bei BESSY II



Bild 2: Teilnehmer des 273. PTB-Seminars „VUV and EUV Metrology“

Die weltweit einzigartigen Möglichkeiten der PTB auf dem Gebiet der detektorgestützten Radiometrie mit Synchrotronstrahlung wurden zur Kalibrierung von zwei speziellen Detektorsystemen genutzt. Zum einen wurde für das IPP in Garching vom UV- bis in den harten Röntgenbereich an fünf Strahlrohren in den PTB-Laboratorien bei BESSY II und an der MLS ein Bolometer-Detektor für die Plasmadiagnostik kalibriert. Zum anderen wurden in Kooperation mit DESY in Hamburg Photoionisationsquerschnitte von Edelgasen im Photonenenergiebereich zwischen 2,1 keV und 30 keV gemessen, die für die Kalibrierung von Gas-Monitor-Detektoren des europäischen Röntgenlasers XFEL erforderlich sind.

Nach dem erfolgreichen Abschluss einer Promotion an der TU Berlin im April 2013 zur rückführbaren Bestimmung der Größe sphärischer Nanopartikel

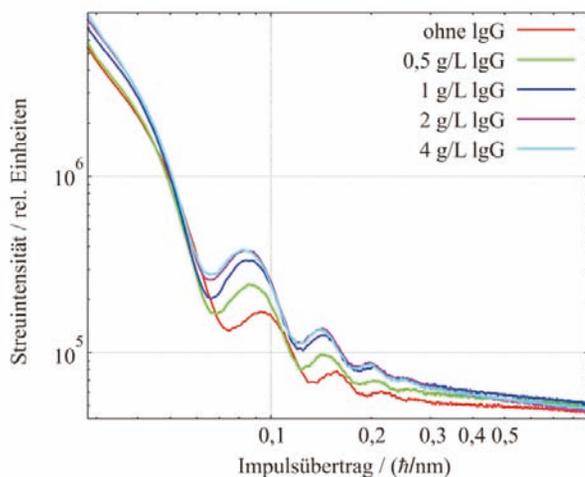


Bild 3: Streukurven von funktionalisierten Polystyrol-Nanopartikeln in unterschiedlich konzentrierten Lösungen von Gammaglobulin (IgG)

konzentrieren sich die Arbeiten zur dimensionellen Nanometrologie über Röntgenkleinwinkelstreuung mit Synchrotronstrahlung bei BESSY II nun auf komplexere Systeme wie z. B. funktionalisierte Core-Shell-Partikel in biologischer Umgebung (Bild 3), die im Rahmen des EMRP untersucht werden. Darüber hinaus wurden in Reflexionsgeometrie sowohl im Röntgen- als auch im EUV-Bereich Gitterstrukturen, Photomasken und Oberflächenrauigkeiten charakterisiert, z. T. ebenfalls im Rahmen von Doktorarbeiten.

Die Arbeitsgruppe Röntgen- und IR-Spektrometrie arbeitet seit mehreren Jahren erfolgreich an der Entwicklung von Instrumentierungen für die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA). Eine an der PTB entwickelte und von der Gruppe bei BESSY II erfolgreich eingesetzte UHV-Messkammer für die RFA wurde inzwischen auch im Auftrag für die IAEA gebaut und für den Betrieb am Speicherring ELETTRA ausgeliefert (Bild 4). Die Kammer wird dort ab 2014 den 151 Mitgliedstaaten der IAEA für die Durchführung von RFA-Experimenten zur Verfügung stehen (IAEA XRF Newsletter No. 24, March 2013). Weitere Kammern wurden für die Kooperationspartner TU Berlin und das französische Metrologieinstitut LNE/CEA-LNHB zur Nutzung an dem Speicherring SOLEIL in Auftrag gegeben.



Bild 4: UHV-Messkammer der IAEA am PGM-Strahlrohr der PTB bei BESSY II

### Thermometrie

Für die Temperaturmetrologen besonders bedeutsam war die alle 3 Jahre stattfindende Konferenz „Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science“, kurz TEMPMEKO, auf Madeira, Portugal. Im Oktober 2013 trafen sich dort 300 führende Wissenschaftler aus 42 Ländern und diskutierten in über 350 Beiträgen u. a. neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Skalendarstellung und Weitergabe, der Einführung von neuartigen eutektischen Hochtemperaturfixpunkten und der neuen Definition des Kelvins. Die Thermometeriker aus Abteilung 7 waren an 32 Beiträgen ihrer internationalen Bedeutung entsprechend beteiligt, darunter befand sich ein eingeladener Vortrag zur Neudefinition des Kelvins.

Vom 4. bis 7. Juni 2013 wurde die nationale Temperaturtagung TEMPERATUR 2013 mit 124 externen Teilnehmern, insbesondere aus der Industrie und dem Mess- und Eichwesen, in der PTB in Berlin durchgeführt. Zum fünften Mal in Folge waren die Fachbereiche 7.3 und 7.4 damit Gastgeber für diese anwendungsorientierte Fachtagung zu Verfahren und Geräten der Temperatur- und Gasfeuchtemessung, die in enger Zusammenarbeit mit dem VDI und dem DKD-Fachausschuss Temperatur und Feuchte stattfindet.

Ein Meilenstein auf dem Weg zur Neudefinition des Kelvins stellt die zweite Bestimmung der Boltzmann-Konstante durch die PTB dar. 2011 veröffentlichte die PTB ihre erste Bestimmung am Wassertripelpunkt mithilfe der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie. Die neuen, im Dezember 2013 in der Zeitschrift Metrologia publizierten Mes-

sungen weisen mit 4,3 ppm nur noch halb so große relative Unsicherheiten auf. Wesentlich hierfür war die geringere Deformation des Messkondensators unter Druck durch den Einsatz von Wolframcarbid als Elektrodenmaterial. Verbessert wurden die Bestimmung der Deformation (Bild 5), die Analyse der Verunreinigungen des Messgases Helium und die Reproduzierbarkeit der Kapazitätsmessungen. Erstmals steht mit den neuesten Ergebnissen der PTB eine unabhängige Methode zur Verfügung, um die anderen, mit akustischer Gasthermometrie bestimmten Werte der Boltzmann-Konstante in der von den internationalen Gremien geforderten Qualität abzusichern.

Die langjährigen Anstrengungen der Abteilung in den EURAMET-Gremien, vollständige Einträge in der BIPM-Datenbank für thermometrische Kalibrierdienstleistungen zu erhalten, waren jetzt erfolgreich. Bild 6 belegt den Anspruch der PTB, von den tiefsten Temperaturen im Millikelvinbereich bis zu den höchsten, mit Strahlungsthermometern messbaren Temperaturen für ihre Kunden Kalibrierungen anzubieten. Im Uhrzeigersinn nach zunehmender Temperatur geordnet, beginnend mit Thermometern für die Tieftemperaturskala PLTS-2000, sind die Einträge zu Geräte-Kategorien zusammengefasst. Mit den z. Zt. insgesamt 112 Einträgen kann nun jeder PTB-Kalibrierschein für Thermometer mit Verweis auf die BIPM-Datenbank

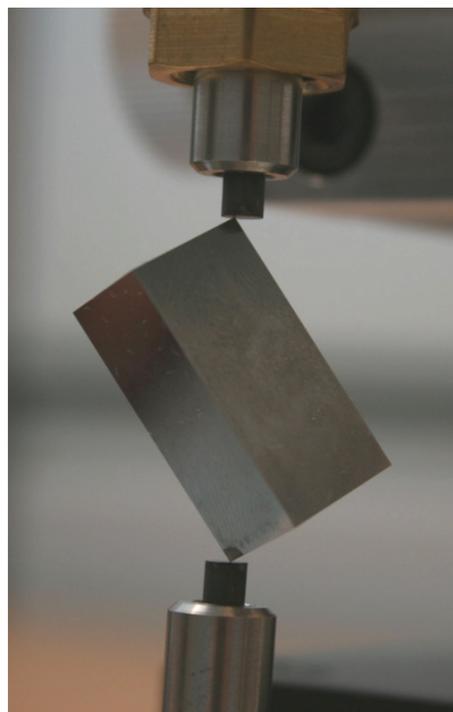


Bild 5: Resonante Ultraschall-Spektroskopie zur Bestimmung der Deformation der Kondensatoren des Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometers

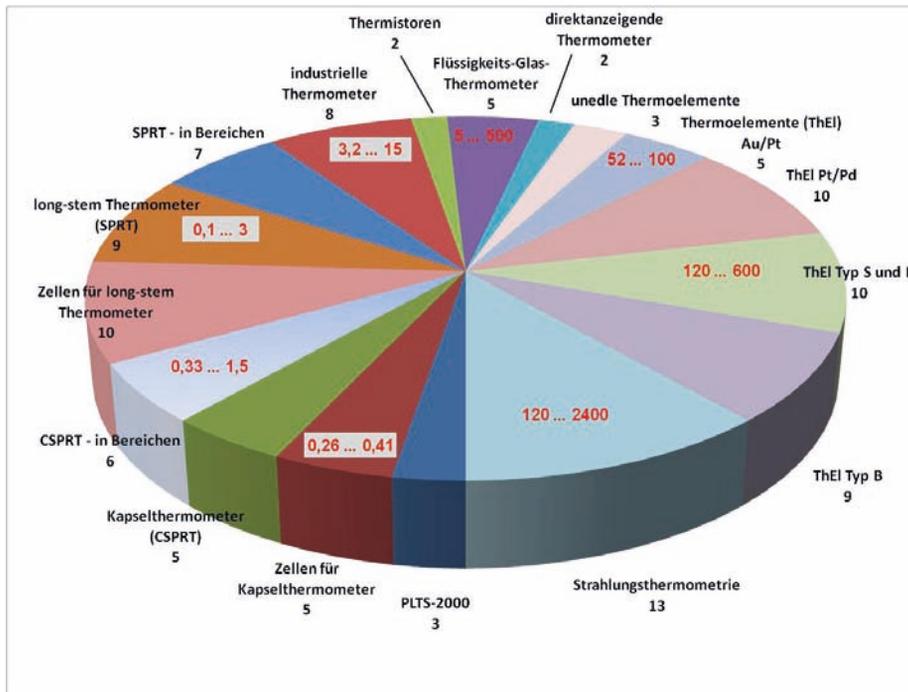


Bild 6: Anzahl der PTB-Einträge in der BIPM-Datenbank für thermometrische Kalibrierdienstleistungen, geordnet nach Thermometertypen. In roter Schrift sind einige typische erweiterte Unsicherheiten in mK angegeben.

ausgestellt werden. Dies stellt einen wesentlichen Wettbewerbsvorteil für die zahlreichen, durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkKS) betreuten thermometrischen Kalibrierlaboratorien und die weltweit führende deutsche mittelständische Thermometerindustrie dar, deren Kalibrierscheine für ihre Produkte damit im Ausland problemlos anerkannt werden. Auch international befindet sich die PTB, sowohl was die Breite des Temperaturbereichs als auch was die Unsicherheiten anbelangt, in einer Spitzenposition. Beispielsweise ist die PTB das einzige Staatsinstitut, das Kalibrierungen mit Einträgen in der BIPM-Datenbank im Tieftemperaturbereich unterhalb von 14 K anbieten kann.

Beim Laserstrahlhärten von hochlegierten Stahlwerkstoffen oder Gusseisen im Temperaturbereich bis 1300 °C ist eine Temperaturregelung innerhalb weniger Kelvin notwendig, um die gewünschten Härteeigenschaften eines Werkstoffs prozesssicher zu erzielen. Im Rahmen des EMRP-Vorhabens „High temperature metrology for industrial applications (>1000 °C)“ wurde ein mobiler Kalibrierfixpunktstrahler speziell für den Anwendungsbereich des Laserstrahlhärtens gemeinsam mit dem Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS entwickelt. Die gute Praxistauglichkeit des Kalibrierstrahlers konnte an mehreren Härtereianlagen in einem industriellen Umfeld nachgewiesen werden.

Der zunehmenden Bedeutung der bildgebenden Messtechnik in der berührungslosen Temperaturmessung trägt die Abteilung Rechnung, indem sie sowohl die dafür zu entwickelnde technische Re-

gelsetzung in den entsprechenden Gremien unterstützt als auch Messplätze entwickelt, die eine metrologische Charakterisierung von bildgebenden Temperaturmesssystemen entsprechend der technischen Regelsetzung mit kleiner Messunsicherheit ermöglicht. In diesem Zusammenhang ist auch die konstituierende Sitzung des neuen VDI/VDE-Fachausschusses GMA 8.16 „Temperaturmessung mit Wärmebildkameras“ zu sehen, die im Juni 2013 an der PTB stattgefunden hat. Für die radiometrische Charakterisierung und Kalibrierung von bildgebenden Detektorsystemen, insbesondere für Instrumentierungen im Bereich der Erdfernerkundung, steht nun auf der Basis einer Ulbrichtkugel ein neuartiges Transfornormal variabler Strahldichte zur Verfügung, dessen Strahldichte sich über mehr als zwei Größenordnungen ohne signifikante Änderung der spektralen Verteilung variieren lässt (Bild 7).

## Radiometrie

Die Arbeiten der Abteilung im Bereich der Rückführung von radiometrischen und strahlungsthermometrischen Erdfernerkundungsmessungen ist erfolgreich fortgesetzt worden. Die World Meteorological Organisation (WMO) hat im Rahmen ihrer Anerkennung der strategischen Forschung des EMRP für den Bereich Environment gegenüber EURAMET vier Projekte besonders hervorgehoben, von denen zwei („SolarUV“ und „Metrology for Earth Observation and Climate“) im Fachbereich 7.3 wesentlich bearbeitet werden. Im Rahmen einer Kooperation mit dem Institut für Methodik der Fernerkundung des DLR in Oberpfaffenhofen

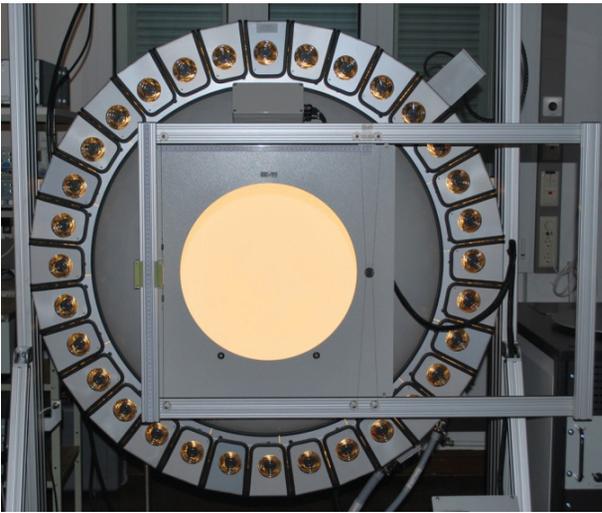


Bild 7: Leuchtende Ulbrichtkugel mit einer strahlenden Fläche von 40 cm Durchmesser als Transfernormal variabler Strahldichte zur Kalibrierung von bildgebenden radiometrischen und thermometrischen Messsystemen

konnte ergänzend zu der bereits bestehenden strahlungsgestützten radiometrischen Rückführung der „Calibration Home Base“ (CHB) erstmalig auch eine detektorgestützte Rückführung im Spektralbereich von 300 nm bis 3  $\mu\text{m}$  mittels fünf an der PTB absolut kalibrierten Filterradiometern sichergestellt werden. Die CHB als eine wesentliche Kalibriereinrichtung des DLR für die Erdfernerkundung ist damit nun über unabhängige Rückführungsketten an die zwei Primärnormale der PTB, Kryoradiometer und Schwarzer Körper, angebunden.

Die beiden Emissionsgradmessplätze der PTB an Luft und unter Vakuum erlauben jetzt Materialuntersuchungen ab 25 °C (Messplatz an Luft) bzw. ab -40 °C (Messplatz unter Vakuum) bis zu Temperaturen von 600 °C und Wellenlängen von 100  $\mu\text{m}$ . Emissionsgradmessungen bei Raumtemperatur an Luft sind wichtig für industrienahen Fragestellungen, etwa nach dem Emissionsgrad von Textilien oder von Materialien im Automobilbau. Messungen bei sehr tiefen Temperaturen und großen Wellenlängen sind relevant für die Charakterisierung von Beschichtungen von Referenzstrahlungsquellen für die Erdfernerkundung.

Durch Nutzung eines speziell für THz-Strahlung entwickelten Referenzempfängers und eines THz-Molekülgaslasers können nun THz-Detektoren im gesamten Spektralbereich von 1 THz bis 5 THz kalibriert werden bei Standardmessunsicherheiten der spektralen Empfindlichkeit von weniger als 2 %. Um einen Strahlungsempfänger für den FIR- und THz-Spektralbereich mit einer gegenüber kommerziellen Bolometern wesentlich besseren Linearität zu entwickeln, wurde ein Transition-Edge-Superconducting (TES)-Bolometer auf der Basis dreier in der PTB lithografisch hergestellter und optimierter Bauteile entwickelt: ein Absorber aus strukturierten dünnen Metallschichten auf einer Siliziumnitrid-Membran, eine Aluminium-Niob-Bilayer als eigentlicher TES-Sensor sowie ein SQUID als Stromsensor (Bild 8). Erste Messungen zeigen eine spektral flache und lineare Empfindlichkeit über einen großen Messbe-

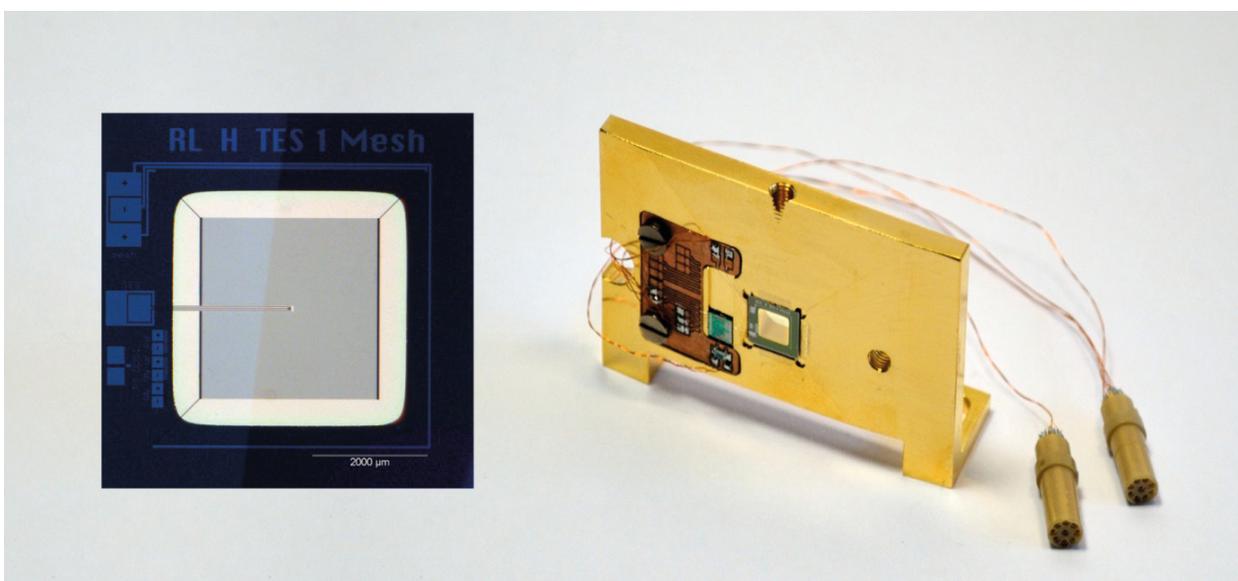


Bild 8: Das TES-Bolometer der PTB für die FIR- und THz-Spektroskopie, das sich durch einen großen linearen Arbeitsbereich sowie einen spektral flachen Verlauf des Absorptionsvermögens für Strahlung von 100  $\mu\text{m}$  bis zu über 3 mm Wellenlänge auszeichnet.

reich und damit eine gute Eignung des Empfängers für quantitative FIR- und THz-Spektroskopie.

Bei der Einzelphotonenradiometrie wurde der Einsatz der MLS als Strahlungsquelle mit einem über 11 Größenordnungen einstellbaren Photonenfluss erfolgreich fortgesetzt. Im Rahmen des EMRP-Projektes „Metrology for industrial quantum communications“ wurde an der MLS im NIR die spektrale Empfindlichkeit fasergekoppelter supraleitender Einzelphotonendetektoren rückgeführt auf ein Kryoradiometer kalibriert mit relativen Messunsicherheiten von unter 2 %.

### Kryosensorik

In den vergangenen Jahren wurde das Vorhaben „European Microkelvin Collaboration“ erfolgreich abgeschlossen. An diesem Vorhaben, das eine Laufzeit von vier Jahren hatte, waren insgesamt zwölf Partner aus acht Ländern beteiligt. Die PTB hat schwerpunktmäßig mit Arbeiten zur Entwicklung von SQUID-Systemen für den Einsatz in Ultratief-temperaturanlagen von Vorhabenspartnern beigetragen. So werden die entwickelten SQUID-Systeme z. B. an der Royal Holloway University of London für NMR-Experimente und für die Rauschthermometrie eingesetzt. Weitere Detektorsysteme werden in Tieftemperaturgruppen der Aalto Universität Helsinki, der Universität Heidelberg, der Universität Leiden, der Universität Basel und dem Institut Néel in Grenoble verwendet. Der Verbund der beteiligten Partner hat die Tieftemperatur-Community in Europa nachhaltig gestärkt, was z. B. in der Bildung einer Low Temperatur Section in der European Physical Society zum Ausdruck kommt. Die im Rahmen des Vorhabens aufgebauten Kooperationsbeziehungen werden weit über die Laufzeit des Vorhabens Bestand haben. Die Partner haben vereinbart, ein Folgevorhaben zu initiieren.

Die Abteilung 7 unterstützt seit mehreren Jahren die Arbeiten der Abteilung 2 mit messtechnischen Entwicklungen, die im Bereich der Widerstandsmetrologie und bei der Neudefinition der Basiseinheit Ampere benötigt werden. So wurde für hochpräzise und rückgeführte Messungen von Stromstärken im Bereich 100 pA ein neuartiges Verstärkerkonzept, ein sogenanntes Ultrastable low-noise current amplifier (ULCA), entwickelt und erfolgreich getestet (siehe auch Bericht der Abteilung 2). Das Verstärkerkonzept wurde zum Patent angemeldet.



Bild 9: Das neue dynamische Vakuumnormal. Durch die Gasexpansion aus einem sehr kleinen (1) in ein sehr großes Volumen (3) mittels eines sich schnell öffnenden Schieberventils (2) kann der Druck im kleinen Volumen innerhalb 20 ms um 3 Größenordnungen abgesenkt werden und die Antwortzeit eines Vakuummeters (4) untersucht werden.

### Vakuummetrologie

Das neue dynamische Normal für sich schnell ändernde Drücke im Grobvakuum ist in Betrieb gegangen (Bild 9). Vakuummessgeräte, die schnelle Prozesse in industriellen Anwendungen steuern, z. B. Schleusenammern, sollten unmittelbar auf Druckänderungen reagieren. Um die Antwortzeiten von Vakuummessgeräten zu testen, kann im neuen Normal ein Druckabfall von 100 kPa auf 100 Pa innerhalb 20 ms erzeugt werden oder der Druck mittels einer Blende oder Lavaldüsen in vorhersagbarer Weise innerhalb einer Sekunde von 100 kPa auf 100 Pa abgesenkt werden. Dazu waren aufwändige Simulationen nötig. Auf Schnelligkeit optimierte kapazitive Membranvakuummeter eines Projektpartners des EMRP-Projektes IND12 „Vacuum Metrology“ zeigten eine Antwortzeit von höchstens 1,3 ms für einen 1/e-Abfall. Da die Messunsicherheit dieser Vakuummeter kleiner ist als die Unsicherheit der Berechnung, ist geplant, diese als Bezugsnormale für sich schnell ändernde Drücke einzusetzen, ein

schönes Beispiel für eine erfolgreiche Kooperation zwischen Industrie und Metrologieinstitut.

### Thermische Energie

Ein laseroptisches Hochtemperatur-Durchfluss-Normal basierend auf einer kommerziellen Schauglasarmatur und einer Präzisions-Venturidüse wurde als sogenanntes Insert aufgebaut (Bild 10). Das Normal erlaubt durch zwei physikalisch unabhängige Verfahren zeitgleich den Volumenstrom zu bestimmen, einerseits über das in der Industrie etablierte Wirkdruckverfahren, zum anderen über rückführbare Laser-Doppler-Anemometrie (LDA). Das Normal ist ausgelegt für Temperaturen bis 230 °C bei Betriebsdrücken bis 40 bar in DN150. Durch Wahl einer anderen Schauglasarmatur kann das System an wesentlich höhere Temperaturen (600 °C) und Drücke (800 bar) angepasst werden und eröffnet so die Möglichkeit des Einsatzes für die direkte Kalibrierung von Durchflusssensoren unter Kraftwerksbedingungen. Eine regelmäßige Rekalibrierung der Düse kann durch ganzflächige LDA-Messungen im Einbauzustand vorgenommen werden. Geplant ist zunächst der Einsatz als Primärnormal für eine bestehende Hochtemperatur-Durchfluss-Prüfanlage. Aufgrund der robusten Ausführung ist das Messsystem jedoch auch für ein industrielles Umfeld geeignet.

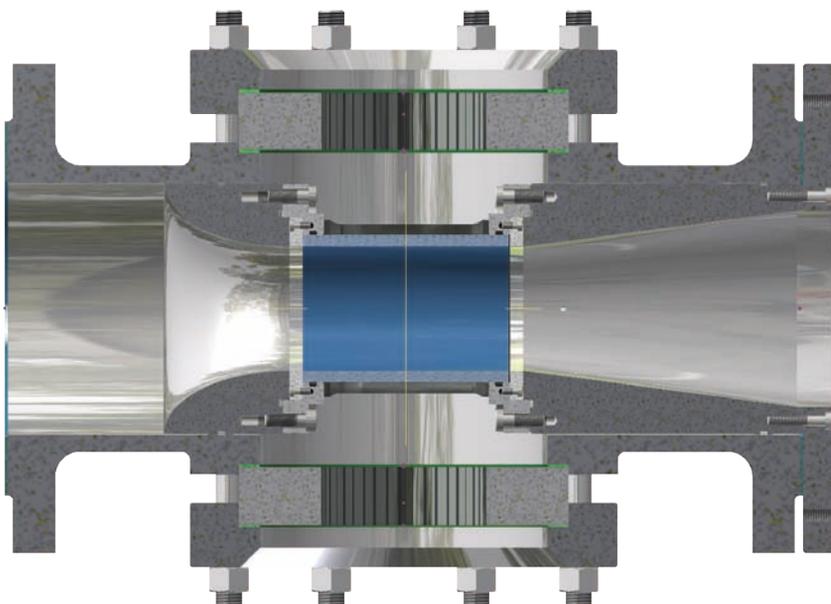


Bild 10: Schauglasarmatur mit Venturi-Insert als Kernstück des laseroptischen Durchfluss-Normals (hier: Schnittansicht). Der Volumenstrom ergibt sich aus der Integration des laseroptisch bestimmten Geschwindigkeitsprofils über der Fläche des Präzisionsglasrohres (blau dargestellt) und aus der Druckdifferenz über die Venturi-Kontur.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de))

### Grundlagen der Metrologie

#### Messung der spektralen Empfindlichkeit im extremen UV (EUV)

Eine Basisaufgabe im Bereich VUV- und EUV-Radiometrie besteht in der Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von Strahlungsempfängern, die jedoch im Wellenlängenbereich zwischen 25 nm und 40 nm bis vor Kurzem aus technischen Gründen nicht möglich war. Durch erfolgreiche Messungen am neuen EUV-Strahlrohr der *Metrology Light Source* (MLS) mit einem Kryoradiometer als primäres Detektornormal konnte diese Lücke nun geschlossen werden. (F. Scholze, FB 7.1, [frank.scholze@ptb.de](mailto:frank.scholze@ptb.de))

#### Detektor für Plasmadiagnostik vom UV- bis in den Röntgenbereich kalibriert

Für die Kernfusionsforschung werden zur Untersuchung extrem heißer Plasmen kalibrierte Strahlungsdetektoren in einem sehr breiten Spektralbereich benötigt. Mit dem IPP in Garching wurde in diesem Zusammenhang kürzlich ein Bolometer-Detektor an fünf Strahlrohren in den PTB-Laboratorien bei BESSY II und an der *Metrology Light Source* (MLS) über den gesamten Photonenenergiebereich von 5 eV bis 25 keV kalibriert, was zurzeit weltweit woanders nicht möglich ist. (F. Scholze, FB 7.1, [frank.scholze@ptb.de](mailto:frank.scholze@ptb.de))

#### Photoionisationsquerschnitte im Röntgenbereich

Im Rahmen einer Kooperation mit DESY in Hamburg wurden im Photonenenergiebereich zwischen 2,1 keV und 30 keV absolute Photoionisationsquerschnitte und Ionenausbeuten an Krypton und Xenon gemessen, die für die Kalibrierung von Gas-Monitor-Detektoren des Europäischen Röntgenlasers XFEL benötigt werden. (M. Richter, FB 7.1, [mathias.richter@ptb.de](mailto:mathias.richter@ptb.de))

#### Messplatz zur Kalibrierung von Strahlungsquellen an der *Metrology Light Source*

Der an der *Metrology Light Source* (MLS) aufgebaute Messplatz zur Kalibrierung von Strahlungsquellen wurde im Spektralbereich von 116 nm bis 400 nm mithilfe von Deuteriumlampen und einer Wolframbandlampe umfangreich charakterisiert und validiert. Bei der Bestimmung spektraler Strahlstärken und Strahldichten konnte eine sehr gute Übereinstimmung mit bei BESSY II erhaltenen Messergeb-

nissen erzielt werden. (R. Thornagel, FB 7.1, [reiner.thornagel@ptb.de](mailto:reiner.thornagel@ptb.de))

#### Elektronen zählen an der *Metrology Light Source*

Vor allem für den Einsatz der *Metrology Light Source* (MLS) als primäres Strahlungsquellennormal berechenbarer Synchrotronstrahlung ist die Strommessung der in der MLS gespeicherten Elektronen eine Voraussetzung. Durch eine verbesserte Signalverarbeitung ist es nun möglich geworden, mehr als tausend gespeicherte Elektronen einzeln zu zählen und damit im Elektronenstrombereich von einigen pA die Unsicherheiten deutlich zu reduzieren. Auch für die Kalibrierung von Zähl-detektoren ist dies von großer Bedeutung. (R. Klein, FB 7.1, [roman.klein@ptb.de](mailto:roman.klein@ptb.de))

#### Ursache für Zusatzrauschen bei Chopper-Verstärkern gefunden

Zur empfindlichen Messung von Gleichspannungen werden häufig Chopper-Verstärker eingesetzt. Leider weisen diese Verstärker ein erhöhtes Stromrauschen am Eingang auf. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde als Ursache für das Zusatzrauschen die in der Eingangskapazität gespeicherte thermische Rauschenergie erkannt und erstmals ein einfaches theoretisches Modell entwickelt. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Messung. (D. Drung, FB 7.2, [dietmar.drung@ptb.de](mailto:dietmar.drung@ptb.de))

#### Streulicht-Nahfeldmikroskopie und Nano-FTIR-Spektroskopie an der *Metrology Light Source*

Der im letzten Jahr am Infrarot (IR)-Strahlrohr der *Metrology Light Source* (MLS) aufgebaute Messplatz für Nahfeldmikroskopie und -spektroskopie wurde um eine weitere Laserquelle erweitert. Mit den nun zur Verfügung stehenden beiden durchstimmbaren CO- bzw. CO<sub>2</sub>-Gaslasern können die Wellenlängenbereiche von 5,2 µm bis 6,1 µm bzw. 9,4 µm bis 10,9 µm für nahfeldmikroskopische Untersuchungen abgedeckt werden. Die im Vergleich zu den beiden Lasersystemen wesentlich breitbandigere Synchrotronstrahlung ermöglicht es, neben hochaufgelösten Oberflächenscans auch interessante Probenbereiche spektroskopisch zu charakterisieren. Bei den Messungen an verschiedenen strukturierten Halbleiterproben mit Synchrotronstrahlung konnte eine laterale Auflösung von unter 50 nm erreicht werden. Zudem erlaubt die hohe Sensitivität die IR-spektroskopische Untersuchung

von 10 nm dünnen Schichten. (P. Hermann, FB 7.2, peter.hermann@ptb.de)

### **Inbetriebnahme eines neuen SAN-Speichersystems**

Zur Speicherung der immer umfangreicheren Messdaten wurde am Standort Adlershof ein neues SAN-Speichersystem mit hoher Skalierbarkeit in Betrieb genommen. Damit kann in Zukunft sehr flexibel auf einen erhöhten Speicherbedarf reagiert werden. Besonders die immer häufiger verwendeten hochauflösenden Detektoren, aber auch die Erfassung der Betriebsparameter der *Metrology Light Source* erfordern die Speicherung großer Datenmengen. (J. Eden, FB 7.2, jens.eden@ptb.de)

### **Neue Plasmaätzanlage für SQUID-Mikrofabrikation**

Für die Entwicklung und Herstellung von SQUID-Sensoren wurde eine neue Plasmaätzanlage in Betrieb genommen. Diese Anlage erlaubt das reaktive Ätzen mit Chlorgasen und wird die Herstellung von SQUID-Sensoren ermöglichen, die nahezu vollständig aus Aluminium aufgebaut sind. Diese neuen Bauelemente werden speziell für SQUID-Anwendungen bei sehr tiefen Temperaturen  $T \ll 1$  K entwickelt. Ziel ist es, neue „All-Aluminium-SQUIDs“ zu entwickeln und herzustellen, die das in Niob-basierten SQUIDs bei Arbeitstemperaturen von  $< 1$  K auftretende Zusatzrauschen nicht aufweisen. (M. Regin, FB 7.2, marcel.regin@ptb.de)

### **Charakterisierung des Undulators an der *Metrology Light Source* (MLS) für die Kalibrierung von Einzelphotonendetektoren**

Die Photonen-Emissionsstatistik einer Strahlungsquelle ist eine wesentliche Einflussgröße bei der radiometrischen Kalibrierung von Einzelphotonendetektoren. Sie wurde für den Undulator U180 der MLS durch Koinzidenzmessungen mit supraleitenden Einzelphotonendetektoren bestimmt. Die emittierten Photonen im NIR unterliegen der Poissonstatistik. (I. Müller, FB 7.3, ingmar.mueller@ptb.de)

### **Kalibrierung von fasergekoppelten Einzelphotonendetektoren bei der Telekommunikationswellenlänge 1,55 $\mu\text{m}$**

Im Rahmen des EMRP-Projektes JRP IND06 „Metrology for industrial quantum communication technologies“ wurde an der *Metrology Light Source* die spektrale Empfindlichkeit fasergekoppelter supraleitender Einzelphotonendetektoren rückgeführt auf ein Kryoradiometer kalibriert. Die erreichten relativen Messunsicherheiten von unter 2 % stellen einen deutlichen Fortschritt bei der Kalibrierung von

Einzelphotonendetektoren im NIR dar. (I. Müller, FB 7.3, ingmar.mueller@ptb.de)

### **EMRP-Projekt „New primary standards and traceability for radiometry“ gestartet**

Das gestartete EMRP-Projekt JRP SIB57 „New primary standards and traceability for radiometry“, an dem Partner aus 12 Ländern teilnehmen, hat zum Ziel, die Messunsicherheiten in der Radiometrie und Photometrie durch die Entwicklung eines neuen Primärnormals auf Basis von Photodioden deutlich zu verringern. Der Fachbereich 7.3 ist an allen Arbeitspaketen des Projekts beteiligt und leitet das Arbeitspaket zur experimentellen Validierung des neuen Primärnormals. (L. Werner, FB 7.3, lutz.werner@ptb.de)

### **Bestimmung der Nichtlinearität von Terahertz-Spektrometern**

Für die quantitative THz-Spektroskopie ist die genaue Kenntnis der Nichtlinearität des Nachweissystems eine wichtige Voraussetzung. Im Rahmen des EMRP-Projektes JRP NEW07 „THz Security“ wurde mit der monochromatischen Strahlung eines THz-Molekülgaslasers die nichtlineare Antwort eines Fourier-Transform-Spektrometers im Ferninfrarot bestimmt. Durch die gut fokussierbare THz-Laserstrahlung konnte das Auftreten von höheren Harmonischen in gemessenen Spektren durch Beugung und Reflexion in einem kommerziellen Spektrometer geklärt und so ein wesentlicher Beitrag zur Messunsicherheit identifiziert werden. (A. Steiger, FB 7.3, andreas.steiger@ptb.de)

### **Reduktion von Platindioxid**

Die Abhängigkeit der Oxidation von Platin bzw. der Reduktion von Platindioxid vom Sauerstoffpartialdruck und der Temperatur ist der größte Unsicherheitsbeitrag bei der Interpolation mit Platin-Widerstandsthermometern zwischen den Fixpunkten der Internationalen Temperaturskala von 1990 im Temperaturbereich von 200 °C bis 660 °C. Daher wurde die Reduktion von Platindioxid in synthetischer Luft und in Helium mittels Thermogravimetrie, dynamischer Differenzkalorimetrie und Massenspektrometrie untersucht und der für Platin-Widerstandsthermometer relevante Reduktionsmechanismus aufgeklärt. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

### **Verbesserte Präzisionsbestimmung der Boltzmann-Konstante in der PTB**

Durch zahlreiche Verbesserungen am Aufbau des Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometers konnte die Boltzmann-Konstante am Wassertripelpunkt

mit einem Wert von  $1,3806509 \cdot 10^{-23}$  J/K und einer relativen Unsicherheit von 4,3 ppm bestimmt werden. Gegenüber der ersten Präzisionsbestimmung im Jahre 2011 wurde die Unsicherheit damit um mehr als den Faktor 2 verringert. Wesentlich hierfür war die kleinere Unsicherheit der effektiven Kompressibilität des Messkondensators durch den Einsatz von Wolframcarbid statt Edelstahl als Elektrodenmaterial. (T. Zandt, FB 7.4, thorsten.zandt@ptb.de)

### **Präzisionsbestimmung der Virialkoeffizienten von Helium**

Mit der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie konnten neben der Boltzmann-Konstante auch Teilchenwechselwirkungen der Gase in Form von Virialkoeffizienten experimentell bestimmt werden. Erstmals wurde am Wassertripelpunkt der zweite Virialkoeffizient von Helium auf bisher nicht erreichtem Niveau gemessen (relative Standardunsicherheit  $2 \cdot 10^{-4}$ ). Die perfekte Übereinstimmung mit den neuesten Ab-initio-Theorien ist ein zusätzlicher Gütebeweis des Datensatzes, der zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante verwendet wurde. (Ch. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

### **Verbesserte Druckmesstechnik für die Thermometrie**

Sowohl bei der Dampfdruckthermometrie als auch bei der Gasthermometrie benötigt man Druckmessungen oberhalb von 100 Pa auf höchstem metrologischen Niveau. Messungen bis zu solch niedrigen Drücken sind nun durch eine neubeschaffte Druckwaage möglich, deren Unsicherheit im Absolutmodus mit (8 mPa + 30 ppm der Anzeige) spezifiziert ist. Die Druckwaage erlaubt insbesondere, die Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie zur Bestimmung thermodynamischer Temperaturen von 25 K bis 300 K einzusetzen. (Ch. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

### **„Berechenbares“ Magnetfeld-Fluktuations-Thermometer**

Das EMRP-Projekt JRP SIB01 „Implementing the new Kelvin“ wird neue Daten für den Vergleich der Internationalen Temperaturskalen ITS-90 und PLTS-2000 mit der thermodynamischen Temperatur liefern. Für die PLTS-2000 unterhalb 1 K wurde ein Konzept für ein Magnetfeld-Fluktuations-Thermometer erstellt, um es als primäres Rauschthermometer einzusetzen. Neuentwickelte Spulensysteme mit einer angepassten Geometrie des Rauschsensors gestatten, die Rauschsignale in situ zu kalibrieren und die elektrische Leitfähigkeit des Sensors zu bestimmen. Die gewählte Geometrie erlaubt eine ma-

thematische Modellierung und somit Überprüfung der Rauschmessungen. Zwei Kanäle für die Messung der Rauschsignale minimieren den Einfluss nichtthermischer Rauschquellen. Das Thermometer soll im nächsten Jahr einsatzbereit sein. (A. Kirste, FB 7.4, alexander.kirste@ptb.de)

### **Dynamisches Normal für sich schnell ändernde Drücke im Vakuum in Betrieb**

Im Rahmen des Projekts EMRP JRP IND12 „Vacuum metrology for production environments“ wurde ein dynamisches Drucknormal aufgebaut, in dem sich der Druck von 100 kPa auf 100 Pa innerhalb 20 ms stufenartig oder in einem etwas längeren Zeitraum innerhalb 1 s in zu jedem Zeitpunkt vorhersehbarer Weise ändern kann. Die Expansion wird über ein sich innerhalb 4,6 ms schnell öffnendes Ventil erzeugt, welches einen Rohrdurchmesser von 40 mm freigibt. Für die Erzeugung der Druckstufe wird der volle Durchmesser genutzt, für langsamere Expansionen wird eine Blende oder eine Lavaldüse vorgeschaltet. Erste Experimente konnten zeigen, dass speziell für das Projekt entwickelte Vakuummeter eine Antwortzeit von kleiner als 1,3 ms liefern können. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)

### **Stereo Particle Image Velocimetry als Methode zur Strömungsdiagnose etabliert**

In der PTB hat sich in den letzten Jahren neben der Laser Doppler Velocimetry (LDV) die Stereo Particle Image Velocimetry (SPIV) als laser-optisches Messverfahren für die Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung strömender Fluide in Rohrleitungen etabliert. Während es sich bei der LDV um ein Einpunktverfahren handelt, bei der die einzelnen Punkte der Strömung nacheinander vermessen werden, kann mit der SPIV zu einem Zeitpunkt das gesamte Geschwindigkeitsfeld vermessen werden. So können zeitliche Änderungen im Strömungsbild festgestellt werden. Im Vergleich zur LDV benötigt die SPIV eine um rund einen Faktor 250 geringere Messzeit und liefert dabei einen um rund einen Faktor 10 größere Ortsauflösung. Auch dynamische Änderungen der Strömung können mit rund 5 Hz aufgelöst werden und schaffen so einen Zugang zur Charakterisierung turbulenter Strömungen. Der direkte Vergleich von SPIV und LDV ergab eine maximale Abweichung der gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen von  $< 1$  %. (T. Eichler, FB 7.5, thomas.eichler@ptb.de)

### **Computational Fluid Dynamics (CFD) in der Durchflusssmesstechnik**

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Messunsicherheit von Durchflusssmessgeräten ist das Strömungsprofil, das in der Regel unbekannt ist. Mittels CFD-Simulationen können Voraussagen über das Strömungsprofil getroffen werden, auch an Stellen, an denen Messungen nicht möglich sind. Dabei gibt es bisher keinerlei Aussagemöglichkeit über die zu erwartende Unsicherheit der CFD-Berechnungen. Ziel der PTB ist es, durch Validierungsmessungen die Verfahrensunsicherheit für die CFD zu bestimmen. Dazu werden typische Strömungsprofile mittels CFD simuliert und diese mit auf laseroptischen Methoden beruhenden Präzisionsmessungen verglichen. (A. Weissenbrunner, FB 7.5, andreas.weissenbrunner@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Hohe Beugungseffizienz bei beschichteten Laminalgittern**

Am „Institut d’Optique“ in Frankreich wurde ein Laminalgitter hoher Liniendichte ( $2400 \text{ mm}^{-1}$ ) mit einer speziell dimensionierten Multilayer-Beschichtung entwickelt, um eine hohe Beugungseffizienz auch bei Photonenenergien oberhalb von 2 keV zu erzielen. Bei 2,2 keV wurde dazu in Zusammenarbeit mit der französischen Synchrotronstrahlungsquelle SOLEIL im PTB-Labor bei BESSY II eine für diesen Energiebereich außerordentlich hohe Beugungseffizienz von 27 % gemessen. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

#### **Vergleichende Untersuchung von Photomasken mit EUV-Scatterometrie und AFM**

Im Rahmen des EMRP-Projektes „Scatterometry“ und in Zusammenarbeit mit der PTB-Abteilung 5 wurden die Messergebnisse von EUV-Scatterometrie und Rasterkraftmikroskopie (AFM) zu Liniennprofilen auf EUV-Photomasken (Breite, Höhe, Kantenwinkel) miteinander verglichen. Durch die Übereinstimmung im Rahmen der kombinierten Messunsicherheiten wurden damit die Auswerteverfahren für die EUV-Scatterometrie validiert. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

#### **Umzug des EUV-Reflektometers an die *Metrology Light Source***

Europäische Firmen sind weltweit führend bei der Entwicklung der EUV-Lithografie (EUVL) zur Herstellung von Halbleiterchips bei einer Wellenlänge von 13,5 nm ab voraussichtlich 2016. Die PTB unterstützt seit vielen Jahren diese Entwicklung mit Synchrotronstrahlungsmesstechnik. Durch den

Umzug des EUV-Reflektometers der PTB von BESSY II an das EUV-Strahlrohr der *Metrology Light Source* (MLS) können diese Messungen nun ohne Unterbrechung durch Shutdown-Perioden von BESSY II kontinuierlich angeboten werden, z. B. um die Qualität von Optiken der Firma Carl Zeiss in den Lithografie-Maschinen des niederländischen Weltmarktführers ASML weiter zu verbessern. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

#### **273. PTB-Seminar**

Am 24. und 25. Oktober 2013 fand das 273. PTB-Seminar „VUV and EUV Metrology“ im Hörsaal des Helmholtz-Zentrums Berlin am Elektronenspeicherring BESSY II in Berlin-Adlershof statt. An zwei Tagen diskutierten mehr als 110 Teilnehmer aus Industrie und Forschung aktuelle Entwicklungen von Anwendung, Instrumentierung und Messtechnik in den Spektralbereichen des Vakuum- und Extrem-Ultraviolett. Die Durchführung wurde von zahlreichen Unternehmen (Carl Zeiss SMT, ASML, BESTEC, Bruker, Iszgro Diodes, Optixfab, Rigaku, Technoexan) sowie dem Helmholtz-Fonds unterstützt. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

#### **Nanometrologie für zerstörungsfreie Grenzschichtanalytik**

Neuartige nanoskalige Schichtsysteme sind durch eine komplexe Struktur charakterisiert, deren Eigenschaften maßgeblich durch das Verhalten an den Grenzschichten beeinflusst werden. Im DFG-Vorhaben „Grenzschichtspeziation“ wurde eine zerstörungsfreie Methodik zur Bestimmung chemischer Bindungszustände der Bestandteile von Grenzschichten entwickelt, die im EMRP-Vorhaben IND07 „Thin Films“ für Si-Photovoltaiken qualifiziert wurde. Der gewählte Ansatz verbindet Röntgenfluoreszenzanalyse unter streifendem Einfall mit Röntgenabsorptionsspektroskopie (NEXAFS) unter Nutzung radiometrisch kalibrierter Instrumentierung. (B. Pollakowski, FB 7.2, beatrix.pollakowski@ptb.de)

#### **FTIR-Mikrospektroskopie an der *Metrology Light Source* für die Bio- und Prozessanalytik**

Im Rahmen des EMRP-Projektes „BioOrigin“ wurden die Sekundärstruktur motive von Modell-Peptiden, die verschiedene Interaktionsmechanismen mit artifiziellen Membransystemen (Liposomen) ausüben können, untersucht. Hauptziel dieses Forschungsvorhabens ist es, die aus weiteren bioanalytischen Methoden (NMR, CD, CLSM) hervorgehenden Resultate in Molekular-Dynamik-Simulationen einfließen zu lassen, um die Wirkstoffeigenschaften der Peptide zu validie-

ren. Das diesjährig angelaufene EMRP-Vorhaben „Q-AIMDS“ hat die Charakterisierung von Biomedizinprodukten (Stent-Systemen, Implantaten) unter prozessanalytischen Aspekten zum Ziel. Die Bestimmung der elementaren Zusammensetzung von Implantatmaterialien sowie der Nachweis von Oberflächenkontaminationen im Spurenbereich erfolgen mithilfe röntgenanalytischer Verfahren. Zusätzlich wird eine Methodvalidierung infolge der Untersuchungen an den Modellsystemen und Real-Materialsystemen angestrebt. (A. Hornemann, FB 7.2, andrea.hornemann@ptb.de)

### **Röntgenspektrometrie für die Charakterisierung von Lithium-Schwefel-Batterien**

Die zuverlässige Charakterisierung von Lithium-Schwefel-Batteriematerialien stellt aufgrund ihrer hohen Reaktivität eine Herausforderung für analytische Verfahren dar. Im Rahmen eines Vorhabens aus dem DFG-Schwerpunktprogramm 1473 „Werkstoffe mit neuem Design für verbesserte Lithium-Ionen-Batterien“ wurde eine neue Messzelle mit einem druckfesten, nur 1 µm dicken Fenster entwickelt. Diese erlaubt den Nachweis von Schwefelverbindungen, welche für Degradationsprozesse verantwortlich zeichnen können. Die hierfür verwendete Röntgenspektrometrie wird unter Vakuumbedingungen durchgeführt, während die neuen Messzellen es ermöglichen, das Batteriematerial selbst während Messung und Probenvorbereitung ununterbrochen in inerter Schutzatmosphäre (Ar) zu halten und Umwelteinflüsse auf das Material zu minimieren. (M. Müller, FB 7.2, matthias.mueller@ptb.de)

### **Terahertz-Lücke in der Radiometrie geschlossen**

Durch die spektrale Charakterisierung der optischen Verluste eines speziell für THz-Strahlung entwickelten Referenzempfängers konnte die weltweit einzigartige Kalibriermöglichkeit der Empfindlichkeit von Terahertz-Detektoren in der PTB auf den gesamten Spektralbereich von 1 THz bis 5 THz eines THz-Molekülgaslasers erweitert werden. Gleichzeitig konnte die relative Standardmessunsicherheit der spektralen Empfindlichkeit auf unter 2 % verringert werden. (A. Steiger, FB 7.3, andreas.steiger@ptb.de)

### **Prototyp eines TES-Bolometers für die Fourier-Transform-Spektroskopie aufgebaut**

Gemeinsam mit dem FB 7.2 wurde ein Transition-Edge-Superconducting (TES)-Bolometer auf der Basis dreier in der PTB lithografisch hergestellter und optimierter Bauteile entwickelt: eines Absorbers aus strukturierten dünnen Metallschichten auf

einer Siliziumnitrid-Membran, eines Aluminium-Niob-Bilayers als eigentlicher TES-Sensor sowie eines SQUIDs als Stromsensor. Dieser Detektor für den FIR- und THz-Spektralbereich zeichnet sich nach ersten elektrischen Charakterisierungen insbesondere durch seinen gegenüber herkömmlichen Bolometern wesentlich größeren Linearitätsbereich aus. (M. Kehrt, FB 7.3, mathias.kehrt@ptb.de)

### **Mobile Kalibrierquelle verbessert die Temperaturmessung für das Laserstrahlhärten**

Beim Laserstrahlhärten von hochlegierten Stahlwerkstoffen oder Gusseisen im Temperaturbereich bis 1300 °C ist eine Temperaturregelung innerhalb weniger Kelvin notwendig, um die gewünschten Härteeigenschaften eines Werkstoffs (Randhärte, Restaustenitgehalt, Einhärtetiefe) prozesssicher zu erzielen. Im Rahmen des EMRP-Projekts JRP IND01 „High temperature metrology for industrial applications (>1000 °C)“ wurde ein mobiler Kalibrierfixpunktstrahler speziell für den Anwendungsbereich des Laserstrahlhärtens gemeinsam mit dem Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) entwickelt. Die gute Praxistauglichkeit des Kalibrierstrahlers konnte an mehreren Härtereianlagen von Fraunhofer IWS und der Firma Alotec, Dresden, nachgewiesen werden. (K. Anhalt, FB 7.3, klaus.anhalt@ptb.de)

### **Bestimmung des spektralen Emissionsgrads bei hohen Temperaturen**

Im Temperaturbereich oberhalb von 1000 °C ist der spektrale Emissionsgrad für die berührungslose industrielle Temperaturmessung (z. B. zur Optimierung von Gasturbinen) und die angewandte Grundlagenforschung (z. B. in der Fusionsforschung bei der Simulation des Wärmeaustauschs) ein wichtiger Materialparameter. Im Rahmen des EMRP-Projekts JRP ENG06 „Powerplants“ wurde an der PTB ein neuartiges dynamisches Verfahren zur Bestimmung des spektralen Emissionsgrades im Hochtemperaturbereich bis 1600 °C erfolgreich entwickelt und im Vergleich mit dem französischen Staatsinstitut LNE evaluiert. Die Messmethode beruht auf einer Weiterentwicklung des etablierten Laser-Flash-Verfahrens zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit. (S. Krenek, FB 7.3, stephan.krenek@ptb.de)

### **MNPQ-Projekt „Kamerabasierte Temperaturmessung im visuellen Spektralbereich“ abgeschlossen**

Gemeinsam mit der TechnoTeam GmbH, Ilmenau, wurden im Rahmen des BMWi-geförderten MNPQ-Projekts „Kamerabasierte Temperaturmessung im visuellen Spektralbereich“ radiometrische

Verfahren für die Charakterisierung von bildgebenden Messsystemen entwickelt, mit dem Ziel, die bildgebenden Strahldichtemesssysteme der Techno-Team GmbH zukünftig auch für eine rückgeführte Temperaturmessung im Temperaturbereich zwischen 900 °C und 2000 °C einsetzen zu können. (L. Bünger, FB 7.3, lars.buenger@ptb.de)

### **Abschluss des EMRP-Projekts „Metrology for Energy Harvesting“**

Im August 2013 wurde das Projekt JRP ENG02 „Metrology for Energy Harvesting“ mit einer öffentlichen Veranstaltung unter Beteiligung aller Projektteilnehmer und vieler Stakeholder erfolgreich abgeschlossen. In Diskussionen und Workshops wurden die Ergebnisse der dreijährigen metrologischen Forschungsarbeit präsentiert. Die erzielten Ergebnisse lassen den Blick in die Zukunft optimistisch ausfallen: Die Leistungsfähigkeit von Energy-Harvesting-Systemen dürfte sich noch deutlich steigern lassen, und die PTB liefert mit ihren Referenzmaterialien dazu eine messtechnische Basis. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

### **Multiple Fixpunktzelle zur Kalibrierung von Thermoelementen**

Ein neues Fixpunktzellendesign wurde entwickelt, das die gleichzeitige und kostengünstige Kalibrierung von Thermoelementen bei verschiedenen Fixpunkttemperaturen erlaubt. Grundlage ist eine aus Reinstgraphit gefertigte zylindrische Basiseinheit mit auswechselbaren rohrförmigen Graphiteinsätzen. Diese sind mit verschiedenen eutektischen Metall-Kohlenstoff-Legierungen gefüllt, mit denen sich Schmelztemperaturen im Temperaturbereich zwischen 1320 °C und 1660 °C realisieren lassen. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

### **Schallgeschwindigkeit in Ozeanwasser**

Im Rahmen des EMRP-Projektes JRP ENV05 „Metrology for oceanic salinity and acidity“ wurde ein Messplatz für die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten aufgebaut. Damit wurde mit akustischen Sensoren die Schallgeschwindigkeit temperatur- und salinitätsabhängig in Lösungen verschiedener Salze und in Meerwasserproben nach dem Flugzeitprinzip bestimmt. Die erreichten Reproduzierbarkeiten sind sehr hoch (< 50 ppm) und ermöglichten die Identifizierung kleiner systematischer Flugzeitabweichungen. Die Ergebnisse sind Grundlage für einen verbesserten Einsatz der Sensoren in der Ozeanografie sowie für akustische Temperaturmessungen in Flüssigkeiten. (C. v. Rohden, FB 7.4, christoph.v.rohden@ptb.de)

### **Neue Kalibrierdienstleistung für den Tieftemperaturbereich**

Rückgeführte Temperaturmessungen im Tieftemperaturgebiet sind noch immer eine Herausforderung für Anwender aus vielen Bereichen wie der Physik, der Astronomie oder dem Quantencomputing. Mit dem Magnetfeld-Fluktuations-Thermometer (MFFT), das in Zusammenarbeit zwischen den Fachbereichen 7.2 und 7.4, der Firma Magnicon und der Universität Heidelberg entwickelt wurde, steht ein praktisches Thermometer für einen extrem breiten Temperaturbereich zur Verfügung. Ab sofort bietet die PTB eine auf die PLTS-2000 rückgeführte Kalibrierung von MFFTs an, die Temperaturmessungen bis in den mK-Bereich mit einer Unsicherheit von  $\leq 1\%$  ermöglicht. (J. Engert, FB 7.4, jost.engert@ptb.de)

### **Linearitätstest von Quadrupolmassenspektrometern**

Die AG *Vakuummetrologie* hat eine neue Methode zur Prüfung der Linearität von Quadrupolmassenspektrometern entwickelt. Dabei wird ein Standardleckelement mit konstantem Gasfluss verwendet und die Flussrate um den konstanten Wert mit einem primären Gasdosiersystem variiert. Drei verschiedene Quadrupolmassenspektrometer wurden mit der Methode untersucht und Nichtlinearitäten von Heliumpartialdrücken zwischen  $10^{-9}$  Pa und  $10^{-4}$  Pa schon bei relativ kleinen Druckänderungen von 10 % festgestellt. Diese Untersuchungen dienen den Vorbereitungen für Aufgaben des Work Package 3 des Projekts EMRP JRP IND12 „Vacuum Metrology“. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Größenbestimmung von Mikrovesikeln mit Röntgenkleinwinkelstreuung**

Die Untersuchung von Mikrovesikeln in Körperflüssigkeiten soll die Früherkennung von Krankheiten erleichtern. Dazu ist eine genaue Größenbestimmung notwendig, die kürzlich an Erythrozytvesikeln mithilfe von Röntgenkleinwinkelstreuung im PTB-Labor bei BESSY II gelungen ist. Im Rahmen des EMRP-Projekts METES und in Zusammenarbeit mit dem „Amsterdam Medical Center“ und dem Zentrum für Naturwissenschaften der ungarischen Akademie der Wissenschaften wurde dabei ein neuer großflächiger Hybrid-Pixel-Röntgendetektor („Pilatus“) verwendet. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

### **Funktionalisierte Nanopartikel als Biosensoren**

Mit Proteinen funktionalisierte Oberflächen von Nanopartikeln können verwendet werden, um biologisch relevante Moleküle nachzuweisen. Deren Anlagerung führt zu einer Größenzunahme der Nanopartikel, die für Polystyren-Nanopartikel im PTB-Labor bei BESSY II mithilfe von Röntgenkleinwinkelstreuung nachgewiesen werden konnte. Im Rahmen des EMRP-Projekts *BioSurf* wurde dabei ein neuer großflächiger Hybrid-Pixel-Röntgendetektor („Pilatus“) verwendet. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

### **Oberflächenuntersuchungen am Undulatorstrahlrohr der *Metrology Light Source***

Mit dem ISAS-Institut für Analytische Wissenschaften und der TU Berlin wurden Vereinbarungen zur quantitativen Untersuchung von Oberflächen mit Ellipsometrie und Elektronenspektroskopie getroffen. Am Undulatorstrahlrohr der *Metrology Light Source* (MLS) konnten dazu erste Ergebnisse an organo-metallischen Schichtsystemen erzielt werden, die z. B. in den Bereichen Optoelektronik und Photovoltaik eine Rolle spielen. Die Arbeiten sollen u. a. in dem neuen EMRP-Projekt „ThinErgy“ fortgesetzt werden. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

### **Großer Vakuumtank zur Kalibrierung von Weltrauminstrumentierung**

In Vorbereitung auf geplante umfangreiche Kalibrierungen von Spektrometern für die Solar-Orbiter-Mission der ESA wurde ein Kalibriermessplatz aufgebaut und in Betrieb genommen, welcher die technischen Voraussetzungen für die Charakterisierung großer Instrumente bis 1,20 m Länge unter Ultrahoch-Vakuum schafft. (M. Kolbe, FB 7.1, michael.kolbe@ptb.de)

### **Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS)**

Mit dem MPS wurde ein Kooperationsvertrag zur Charakterisierung des SPICE-Spektrografen für die Solar-Orbiter-Mission der ESA abgeschlossen. Unter Verwendung von berechenbarer Synchrotronstrahlung an der *Metrology Light Source* (MLS) sollen dazu ab 2014 umfangreiche Messungen sowohl mit dem Entwicklungs- als auch mit dem Flugmodell durchgeführt werden. (R. Klein, FB 7.1, roman.klein@ptb.de)

### **Detektorgestützte radiometrische Rückführung für das Institut für Methodik der Fernerkundung des DLR**

Im Rahmen einer Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) konnte, ergänzend zu der bereits bestehenden strahlergestützten radiometrischen Rückführung der „Calibration Home Base“ (CHB) des Instituts für Methodik der Fernerkundung in Oberpfaffenhofen auf die PTB, erstmalig auch eine detektorgestützte Rückführung im Spektralbereich von 300 nm bis 3 µm mittels fünf an der PTB absolut kalibrierter Filterradiometer sichergestellt werden. Die CHB ist damit über unabhängige Rückführungsketten an die zwei Primärnormale der PTB, Kryoradiometer und Schwarzer Körper, angebunden. (R. D. Taubert, FB 7.3, dieter.taubert@ptb.de)

### **Transfornormal variabler Strahldichte für die Erdfernerkundung und bildgebende Radiometrie**

Für die radiometrische Charakterisierung und Kalibrierung von bildgebenden Detektorsystemen, insbesondere für Instrumentierungen im Bereich der Erdfernerkundung, steht auf der Basis einer Ulbrichtkugel ein neuartiges Transfornormal variabler Strahldichte zur Verfügung, dessen Strahldichte sich über mehr als zwei Größenordnungen ohne signifikante Änderung der spektralen Verteilung variieren lässt. Die im Spektralbereich von 400 nm bis 1100 nm auf das Primärnormal Schwarzer Körper rückgeführte Strahlungsquelle besitzt eine strahlende Fläche von 40 cm Durchmesser bei einer Strahldichtehomogenität von besser als 1 %. (R. D. Taubert, FB 7.3, dieter.taubert@ptb.de)

### **Emissionsgradmessung bei tiefen Temperaturen und großen Wellenlängen**

Die beiden Emissionsgradmessplätze der PTB an Luft und unter Vakuum erlauben jetzt Materialuntersuchungen ab 25 °C (Messplatz an Luft) bzw. ab -40 °C (Messplatz unter Vakuum) bis zu Temperaturen von 600 °C und Wellenlängen von 100 µm. Emissionsgradmessungen bei Raumtemperatur an Luft sind wichtig für industriennahe Untersuchungen etwa des Emissionsgrads von Textilien oder von Materialien im Automobilbau. Messungen bei sehr tiefen Temperaturen und großen Wellenlängen sind relevant für die Charakterisierung von Beschichtungen von Referenzstrahlungsquellen für die Erdfernerkundung. (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)



geführte Vergleich bestätigte die PTB als eines der führenden Staatsinstitute in diesem Temperaturbereich. (B. Gutschwager, FB 7.3, berndt.gutschwager@ptb.de)

### **Rückführung des Emissionsgrads für das CENAM**

Im Rahmen der technischen Zusammenarbeit wurden während des Aufenthalts eines Gastwissenschaftlers vom mexikanischen Staatsinstitut CENAM Referenzproben für die Emissionsgradbestimmung hergestellt und mit geringen Unsicherheiten vermessen, um so die Vergleichbarkeit von Emissionsgradmessungen am CENAM sicherzustellen. (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)

### **Begutachtung von Staatsinstituten**

Kernbestandteil der Vereinbarung zur gegenseitigen Anerkennung von Kalibrier- und Prüfzertifikaten Nationaler Metrologieinstitute bzw. Designierter Institute (CIPM-MRA) ist die gegenseitige Begutachtung der metrologischen Dienstleistungen. In diesem Jahr wurden die Dienstleistungen im Bereich Berührungsthermometrie im National Institute of Metrology China (NIM), National Institute of Metrology Thailand (NIMT), in der Firma Roth (Schweiz) und im National Research Institute of Metrology Kuba (INIMET) begutachtet. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

### **„Mise en Pratique“ für die Darstellung der Basiseinheit Temperatur**

Die „Mise en Pratique“ (MeP) ist ein Leitfaden für die Darstellung einer Einheit. Im Mai 2013 hat das beratende Komitee für Thermometrie (CCT) eine MeP angenommen, welche die geplante Neudefinition der Basiseinheit Temperatur über die Festlegung der Boltzmann-Konstante berücksichtigt. Diese MeP wurde von der Arbeitsgruppe 1 des CCT unter Leitung der PTB ausgearbeitet. Neben den Internationalen Temperaturskalen lässt sie auch die Anwendung von thermodynamischen Temperaturmessmethoden (Strahlungsthermometrie, Gasthermometrie) zu. (B. Fellmuth, FB 7.4, bernd.fellmuth@ptb.de)

### **CCT-Arbeitsgruppe zur Neudefinition der SI-Basiseinheit Kelvin**

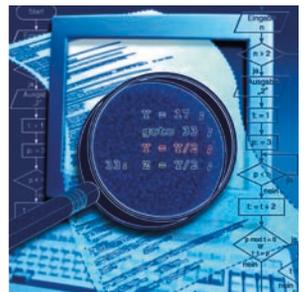
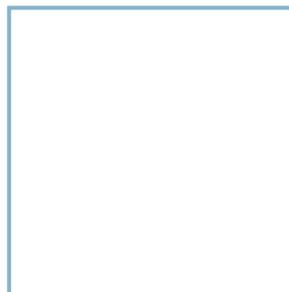
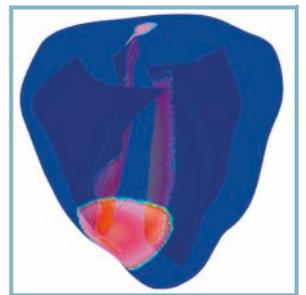
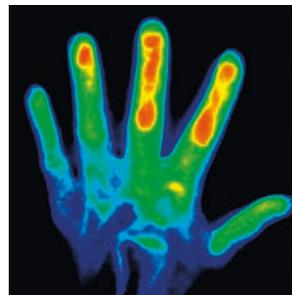
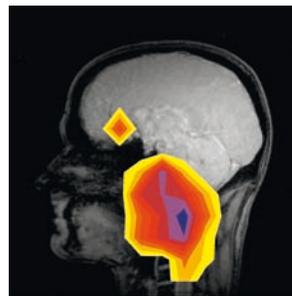
Die Arbeitsgruppe des Beratenden Komitees für Thermometrie zur Neudefinition des Kelvin (CCT-TG-SI) traf sich im März 2013 in der PTB in Berlin. Unter der Leitung der PTB wurde ein Überblick zum Stand der Bestimmung der Boltzmann-Konstante erarbeitet und an das CCT berichtet. Die Unsicherheit eines ausgeglichenen Wertes der Boltz-

mann-Konstante wäre mit 0,5 ppm ausreichend für eine Neudefinition des Kelvins. Erstmals steht mit den neuesten Ergebnissen der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie der PTB eine unabhängige Methode zur Verfügung, um die anderen, mit akustischer Gasthermometrie bestimmten Werte abzusichern. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)



# Abteilung 8

## Medizinphysik und metrologische Informationstechnik



## Einleitung

Einer gewissen Tradition folgend beginnt der Jahresbericht der Abteilung mit einem Ereignis, das den gesamten Berliner Standort betrifft: In diesem Jahr wird wieder in einem markanten Neubau die Arbeit aufgenommen. Das sogenannte Technikum fügt sich an der nördlichen Ecke zur Abbe- und Guerickestraße in den Masterplan der Liegenschaft ein, der in seiner nordwestlichen Bebauungsschiene die Unterbringung der infrastrukturellen Technik vorsieht. Die wesentlichen Bestandteile des neuen Gebäudes sind Pförtnerloge und Lager-, Werkstatt- und Schulungsräume sowie diverse Anlagen der Haus- und Versorgungstechnik gemäß den Erfordernissen der Infrastruktur.

Städtebaulich nimmt das Technikum mit seiner Längsseite die Bauflucht von Gerätebau und Chemiegebäude ein. Die Trauflinie richtet sich am benachbarten Gerätebau aus. Die Wertigkeit und Materialität wird durch die gelben Klinker der historischen Bestandsgebäude beeinflusst. Der Neubau soll sich in den Bestand einpassen, seiner Bedeutung als Eckbebauung gerecht werden, sich aber gegenüber den wissenschaftlichen Hauptgebäuden zurücknehmen.

Besonders hervorzuheben ist eine hier neu eingerichtete hochwertige Kunststoffbearbeitungswerkstatt, die es gestattet, die sehr dezidierten Anforderungen für Versuchsaufbauten zu erfüllen, wie sie z. B. die SQUID-Messtechnik, der Biomagnetismus oder die Magnetresonanzexperimente erfordern. Die Werkstatt wird von einem abteilungsübergrei-



Titelbild:

Piktogramme, die die fünf Fachbereiche der Abteilung symbolisieren. Sie schmücken den Treppenaufgang des Observatoriums, des ältesten Gebäudes der PTB, in dem Hermann von Helmholtz wirkte.

fenden Team zusammen mit dem Gerätebau Berlin betrieben.

Gerade die hochprofessionellen Werkstätten der PTB sind eine grundlegende Voraussetzung für die Durchführung einer der Kernaufgaben der PTB: „Messungen an der Grenze des Messbaren“.

Die Aufgaben der PTB sind äußerst vielfältig, besonders auch in der Abteilung *Medizinphysik und Metrologische Informationstechnik*; der Name der Abteilung müsste eigentlich noch um die Begriffe Mathematik, Datenanalyse und Modellierung erweitert werden. Ein wenig wird dieses breite Aufgabenspektrum durch die Schlagzeilen am Ende des Berichts angedeutet. Hier im Bericht selbst werden pro Fachbereich zwei Themen exemplarisch hervorgehoben:

## Metrologie für die Patientensicherheit bei MR-Untersuchungen

Im Rahmen des seit April 2012 vom Fachbereich *Medizinische Messtechnik* koordinierten EMRP-



Bild 1: Außenansicht des Technikums (links) und Blick in die Kunststoffbearbeitungswerkstatt (rechts)

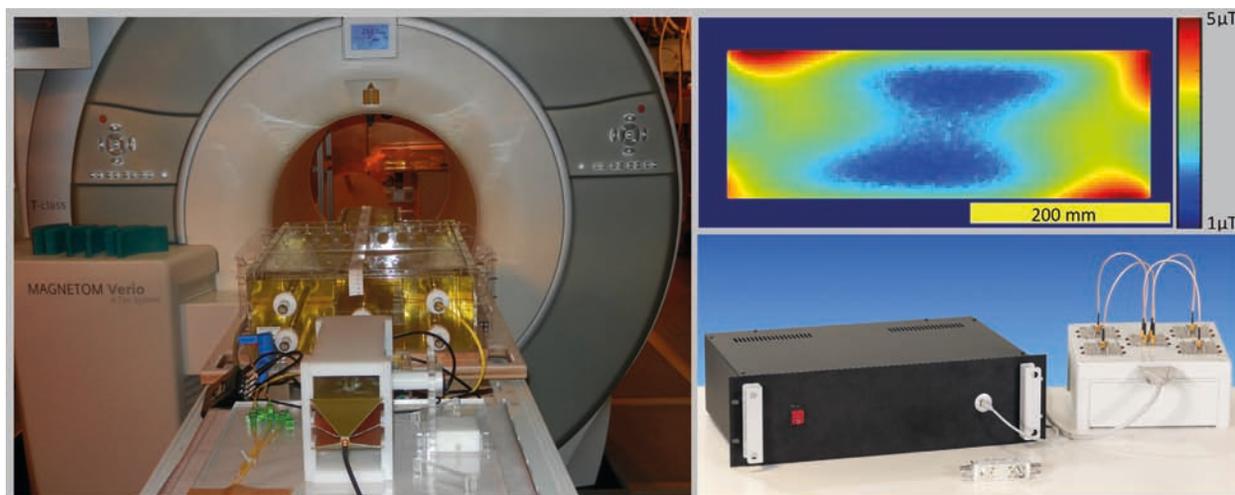


Bild 2: links: Ganzkörper-Phantom im 3-Tesla-MRT der PTB mit Gantry zur Messung hochfrequenter E- und H-Felder im MRT mittels elektrooptischer Feldsonden; die Kalibration erfolgt mit einer verbesserten MR-TEM-Zelle mit Rückführung auf das gyromagnetische Verhältnis von Wasserprotonen. Rechts oben: Mit MR-Methoden im Ganzkörper-Phantom gemessene Feldverteilung der magnetischen Hochfrequenzkomponente  $B_1^+$  für eine nominelle Leistung von 1 kW am Spuleneingang. Rechts unten: Aufbau zur In-situ-Messung der S-Matrix von Sende-Spulen-Arrays.

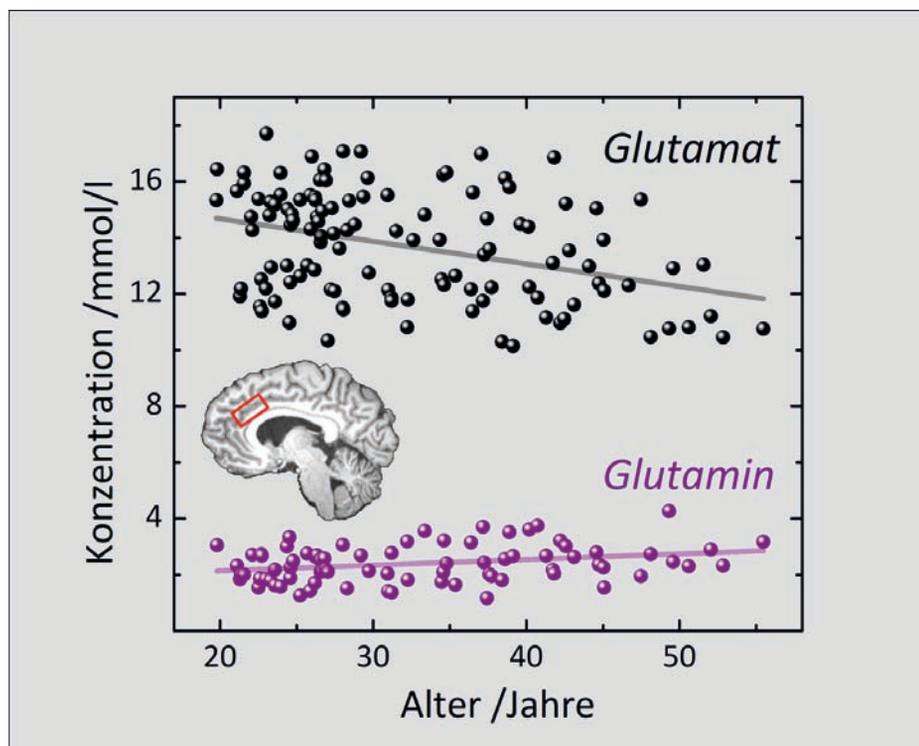
im MRT experimentell validiert werden, wobei großer Wert auf eine von Hersteller und Feldstärke des Tomografen unabhängige Implementierung gelegt wurde. Das Erreichen dieses für alle Projektpartner wichtigen Meilensteins ermöglicht eine metrologisch fundierte Untersetzung zukünftiger MR-Sicherheitsstandards und ist daher für die zweite Projektphase von entscheidender Bedeutung.

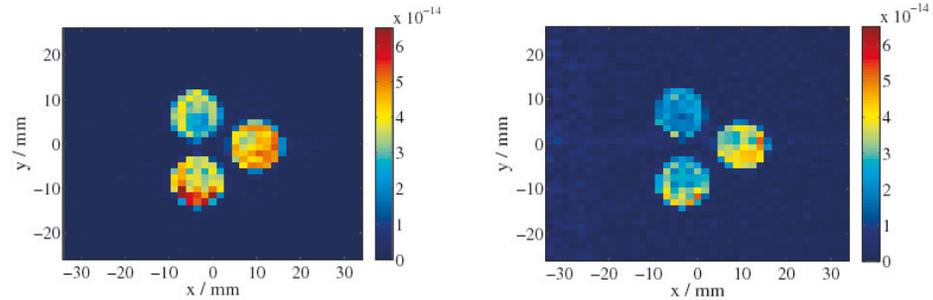
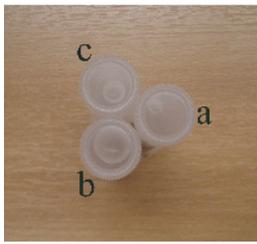
Projektes „Metrology for next generation safety standards and equipment in MRI“ wurden planmäßig eine Reihe von experimentellen Aufbauten zur rückführbaren Messung u. a. von Hochfrequenzfeldverteilungen innerhalb und außerhalb eines Magnetresonanztomografen (MRT) realisiert. Mit Hilfe dieser Messvorrichtungen können insbesondere die Ergebnisse numerischer Feldsimulationen

### Magnetresonanzspektroskopie an Neurotransmittern

Die Konzentrationen von Neurotransmittern und anderen Biomolekülen im Humangehirn sowie ihre Entwicklung über die Lebensspanne sind für Diagnostik und Therapie zum Beispiel von neurodegenerativen Erkrankungen von großer Bedeutung. Ein im Fachbereich 8.1 entwickeltes MR-spektrosko-

Bild 3: Signifikante Veränderung der Konzentrationen von Glutamat und Glutamin mit dem Alter im anterioren Gyrus cinguli (kleines eingefügtes Bild), gemessen mit MR-Spektroskopie bei 3 Tesla. Diese Abbildung zeigt den Effekt für die gesamte Kohorte, d. h. nicht nach Geschlecht unterschieden. Die Messunsicherheiten betragen im Mittel 1,5 mmol/l für Glutamat und 0,4 mmol/l für Glutamin, die Streuung der Daten wird dominiert von physiologischem Rauschen.





pisches Verfahren erlaubt die Quantifizierung solcher Konzentrationen in vivo mit guter Präzision. Im Rahmen umfangreicher Studien gemeinsam mit der Charité-Universitätsmedizin Berlin wurden an 118 gesunden 20- bis 55-Jährigen – die Hälfte davon Frauen – die Spiegel einer Reihe von Substanzen in zwei wichtigen Gehirnregionen quantitativ bestimmt. Dabei konnte eine Verringerung der Konzentration des wichtigsten anregenden Neurotransmitters Glutamat sowie eine signifikante Zunahme von Glutamin, das sowohl an der Bildung als auch am Abbau von Glutamat entscheidend beteiligt ist, mit zunehmendem Alter nachgewiesen werden. Interessanterweise ist der Alterseffekt auf Glutamat bei weiblichen Versuchspersonen stärker ausgeprägt. Geschlechtsspezifische Unterschiede wurden auch in den nicht altersabhängigen Konzentrationen von Gesamtkreatin und Cholin enthaltenden Substanzen gefunden, die den Energiestoffwechsel und zellmembranspezifische Umbauprozesse widerspiegeln.

Neben der originären wissenschaftlichen Bedeutung dieser Ergebnisse für das Verständnis von Alterungsprozessen im Gehirn können die Daten auch als Referenzinformation für zukünftige MRS-Studien mit ganz anderer Zielsetzung dienen, indem dort der Einfluss der Alters- und Geschlechtsverteilung in der untersuchten Kohorte auf die gemessenen Metabolitkonzentrationen quantitativ herausgerechnet werden kann.

## Magnetresonanzbildgebung bei niedrigen Feldern

In der Magnetresonanzbildgebung gibt es seit Langem einen allgemeinen Trend zu immer höheren Magnetfeldstärken. Das hat seinen guten Grund, denn mit der Feldstärke wächst die Signalintensität und damit die räumliche Auflösung. Das gilt aber nicht unbedingt für das andere Kriterium, das die Bildqualität bestimmt: den Kontrast. Hier hat beispielsweise eine Studie der Universität Berkeley gezeigt, dass sich im Ultra-Niedrigfeld bei 132  $\mu\text{T}$  die T1-Relaxationszeiten von Krebsgewebe der menschlichen Prostata und umliegendem gesunden Gewebe etwa um einen Faktor 2 unterscheiden.

Bild 4: Links: Fotografie und ULF MR-Bilder eines Probenphantoms a) Wasser, b)  $\text{CuSO}_4$  in wässriger Lösung und c)  $\text{CuSO}_4$  in wässriger Lösung und Hydroxyethylcellulose. Mitte: Bild bei 17,7  $\mu\text{T}$  (731 Hz). Rechts: Bild bei 2,3  $\mu\text{T}$  (100 Hz), Farbskalen in Tesla, die räumliche Auflösung beträgt 1,8 mm x 1,4 mm.

Bei diesen extrem niedrigen Feldstärken kann also mit der T1-gewichteten Bildgebung Tumorgewebe sichtbar gemacht werden, was bei höheren Feldstärken nicht oder nur unzureichend gelingt.

Um diese singuläre Beobachtung in einen größeren Zusammenhang zu stellen, wird im Fachbereich *Biosignale* untersucht, wie sich in der Kernmagnetischen Resonanz (NMR) die T1- und T2-Relaxationszeiten verschiedener Substanzen und Gewebeproben bei extrem niedrigen Magnetfeldern verhalten. Dazu wurde ein Ultra-Niedrigfeld-NMR-Messplatz für einen Magnetfeldbereich von 100 nT bis etwa 200  $\mu\text{T}$  aufgebaut. Wie schon im Jahresbericht 2012 berichtet, wurden damit bereits in reinem Wasser überraschende Beobachtungen gemacht, die sich mit den etablierten physikalischen Modellen nicht interpretieren ließen.

Gegenwärtig stehen Proben im Vordergrund, die in ihren physikalischen Eigenschaften den physiologischen Gegebenheiten näher kommen, wie z. B. Agarosegele mit verschiedenen Viskositäten. Zukünftig ist angedacht, Krebsgewebe der Prostata sowie der Leber aus einem Tiermodell zu untersuchen. Vorrangiges Ziel dieser Studien wäre es, den Feldbereich zu identifizieren, in dem eine optimale tumorspezifische Bildgebung möglich ist.

Aufgrund des physikalisch bedingten geringeren Signal-zu-Rausch-Verhältnisses wird die Bildgebung im extrem niedrigen Feld in Bezug auf die räumliche Auflösung nie mit der Hochfeld-Bildgebung konkurrieren können. Es könnte sich aber herausstellen, dass der verbesserte Kontrast im extrem niedrigen Feld auf andere Weise einen Informationsgewinn ermöglicht, der der Magnetresonanzbildgebung neue diagnostische Anwendungen eröffnet.

## Magnetische Nanopartikel in der medizinischen Messtechnik

Neben neuen Diagnoseverfahren spielt die sensible magnetische Messtechnik der PTB auch bei der Entwicklung neuer Tumortherapien eine große Rolle. Bei diesen neuen Therapieansätzen kommen eisenoxidbasierte magnetische Nanopartikel zum Einsatz, die mithilfe eines äußeren Magnetfeldes spezifisch im Tumorgewebe angereichert werden können.

Bindet man vor der Injektion krebszerstörende Medikamente oder spezielle Nukleinsäuren an die Nanopartikel, so werden diese ihre Wirkung vorrangig im Tumorgewebe entfalten, und schädliche Nebenwirkungen auf den Gesamtkörper können verringert werden. Über ein von außen aufgebracht magnetisches Wechselfeld können die Nanopartikel zusätzlich gezielt erhitzt werden, um so den Untergang der Tumorzellen zu beschleunigen.

Bei der Entwicklung der neuen Therapien muss geklärt werden, unter welchen Bedingungen sich möglichst viele Nanopartikel tatsächlich im Tumor anlagern. Dazu ist es nötig, auf nichtinvasivem Weg die Verteilung der Nanopartikel im Organismus zu ermitteln.

Mit der früher im Fachbereich entwickelten Messmethode der Magnetrelaxometrie im homogenen Feld war es bereits möglich, die Gesamtmenge der magnetischen Nanopartikel im Organismus und den Schwerpunkt ihrer Verteilung quantitativ anzugeben.

In einer Weiterentwicklung werden nun mehrere sequenzielle Magnetrelaxometrie-Messungen mit stark inhomogenen Anregungsfeldern genutzt. Im Ergebnis lässt sich die Verteilung des Gewebegehalts an magnetischen Nanopartikeln über einen größeren Volumenbereich orts aufgelöst quantitativ rekonstruieren.

Zur Demonstration der Methode wurde ein Phantom eines Organismus' aus 54 Gipswürfeln mit der Kantenlänge 1 cm hergestellt. 12 dieser Würfel wurden mit jeweils 5 mg magnetischen Nanopartikeln beladen, die anderen Würfel blieben unbeladen. Dieses Phantom wurde nacheinander von 48 verschieden im Raum angeordneten Feldspulen magnetisiert, und nach Abschalten des Magnetisierungsfeldes wurde jeweils die Amplitude der zerfallenden Magnetisierung mit einem Mehrkanal-SQUID-System bestimmt. Die Dauer der gesamten Messung betrug dabei wenige Minuten.

Durch das neue Rekonstruktionsverfahren konnte der Nanopartikelgehalt in den einzelnen Würfeln mit einer Unsicherheit von 50 µg rekonstruiert werden.

Gegenwärtig arbeitet die PTB daran, den Messaufbau und die Phantome zu vergrößern, um möglichst realistische Untersuchungsbedingungen für den Einsatz der Tumortherapie beim Menschen anbieten zu können.

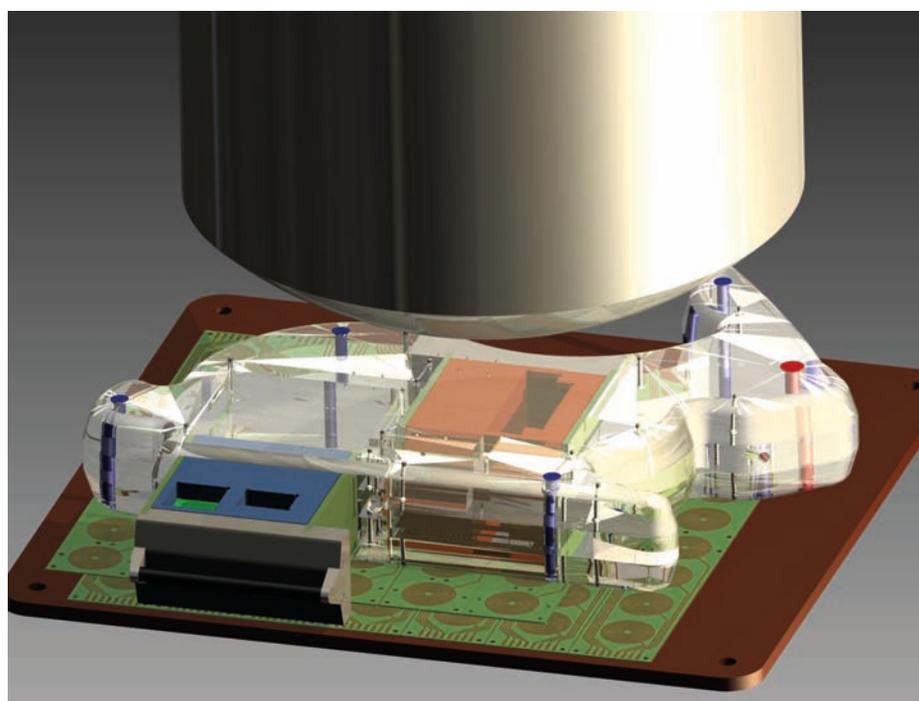


Bild: 5: Messaufbau für Phantommessungen zur nichtinvasiven Bildgebung von magnetischen Nanopartikeln

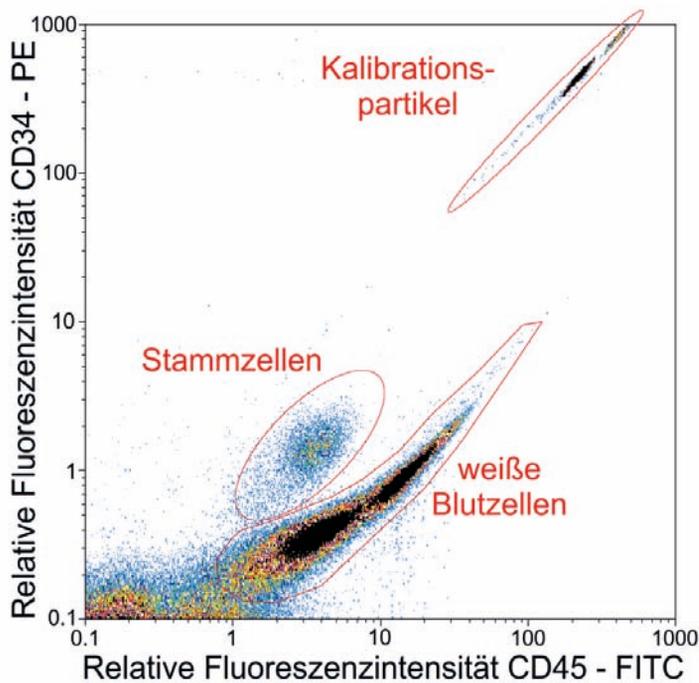


Bild 6: Fluoreszenzstreudiagramm zur Konzentrationsbestimmung von (CD34-positiven) Stammzellen durch Relativzählung bezogen auf Kalibrationspartikeln

**Rückführbarkeit von Messungen biologisch relevanter Objekte durch Zählung**

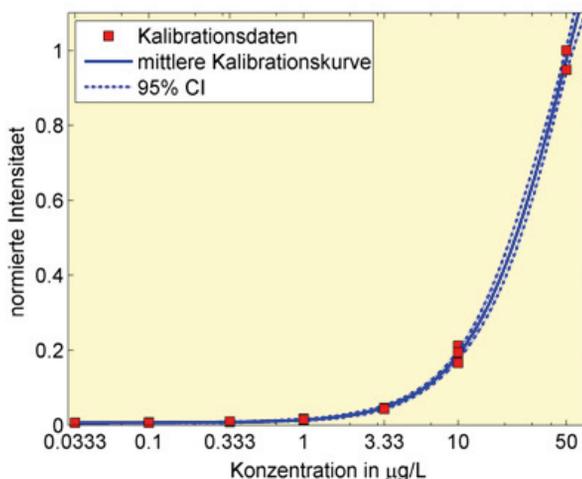
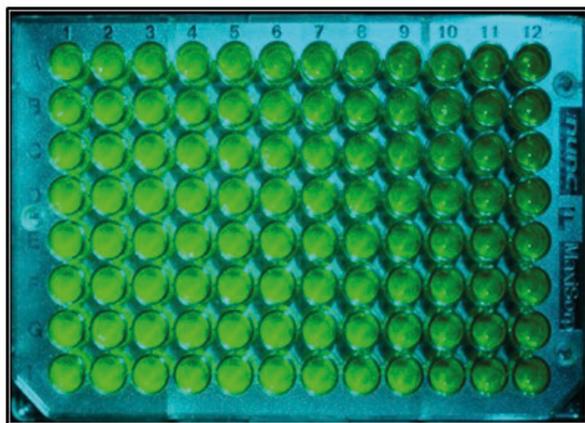
Messverfahren, die darauf beruhen, biologisch relevante Objekte wie Zellen oder Moleküle, aber auch Mikroorganismen wie Viren oder Bakterien direkt zu zählen, können unter bestimmten Bedingungen unmittelbar zur Realisierung der SI-Einheit für die Stoffmenge herangezogen werden. Die Rückführbarkeit entsprechender Messungen in der Medizin, der Biologie sowie auch in den Bereichen Umwelt und Ernährung könnte in diesem Sinne durch die Zahl der Objekte als Basiseinheit realisiert werden. Messverfahren zur Zählung biologisch relevanter Objekte werden deshalb als Schlüsseltechnologie zur Etablierung der Rückführbarkeit auf das SI-Einheitensystem in den genannten Bereichen angesehen.

Im Fachbereich *Biomedizinische Optik* der PTB werden auf diesem Gebiet seit vielen Jahren metrologische Pionierarbeiten zur Entwicklung und Bereitstellung von Messverfahren für die absolute Zählung von Zellen als Referenzmessmethoden für die Laboratoriumsmedizin durchgeführt. Hierzu zählen insbesondere durchflusszytometrische Messverfahren zur Zählung und Konzentrationsbestimmung von Zellen im Blut und anderen Körperflüssigkeiten, aber auch mikroskopische Zählverfahren. Mithilfe der von der PTB durch Zellzählung ermittelten Referenzmesswerte wird auf diese Weise für bestimmte Messgrößen bereits heute die Rückführbarkeit im Rahmen gesetzlich vorgeschriebener

Vergleichsmessungen in der Laboratoriumsmedizin gewährleistet.

Im EMRP-Projekt „Metrology for monitoring infectious diseases, antimicrobial resistance, and harmful micro-organisms“ werden neben molekularbiologischen Verfahren wie der digitalen Polymerasekettenreaktion u. a. von der PTB durchflusszytometrische und mikroskopische Zählverfahren weiterentwickelt, um deren Vorteile und Potenzial auch zur genaueren Konzentrationsbestimmung von Viren und Bakterien einsetzen zu können. Diese Arbeiten werden zusammen mit europäischen Partnern vom Laboratory of the Government Chemist (LGC), UK, der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), dem Joint Research Centre (JRC) der EU, dem Nacionalni Inštitut za Biologijo (NIB), Slowenien, dem Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK UME), Türkei, sowie mit Arbeitsgruppen des University College London (UCL) und der Universitätsmedizin Charité Berlin durchgeführt.

Die Eignung absoluter Zählverfahren als Referenzmessmethoden höherer Ordnung hängt allerdings von zwei wesentlichen Voraussetzungen ab: erstens von der möglichst genauen Kenntnis der Zählunsicherheit (Stichprobenunsicherheit), zweitens von der möglichst genauen Definition und Identifizierung der relevanten Zielobjekte (Identifikationsunsicherheit). Während die stochastischen Unsicherheiten durch Zählung einer Stichprobe mithilfe bekannter statistischer Methoden in der Regel gut geschätzt werden können, ist die Unsicherheit



durch Definition und Identifikation der Objekte bisher kaum untersucht. Mit der Erforschung dieser grundlegenden Fragestellung über die Eignung von Zählverfahren zur Rückführbarkeit von Messungen biologisch relevanter Objekte beschäftigt sich ein weiteres EMRP-Projekt mit dem Titel „Traceability for biologically relevant molecules and entities“, welches vom Laboratory of the Government Chemist (LGC), UK, koordiniert wird und an dem der Fachbereich der PTB neben dem Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Italien, das Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), Frankreich, das Nacionalni Inštitut za Biologijo (NIB), Slowenien, und das Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK UME), Türkei, mitarbeiten. Neben den primären Referenzmessverfahren, bei denen auch die Volumina der verdünnten Proben direkt bestimmt werden, werden weiterhin auch sekundäre Referenzmessverfahren unter Verwendung von Relativmessungen in diesem Projekt validiert. Diese Messverfahren lassen sich einfach von Herstellern und Endanwendern einsetzen, sodass Messungen höherer Genauigkeit damit auch in Kliniken möglich sind. Abbildung 6 zeigt als Beispiel ein Fluoreszenzstreudiagramm, aus dem die Konzentration von CD34-positiven Stammzellen relativ zur bekannten Konzentration einer Kalibrationspartikelsuspension bestimmt werden kann.

Die Ergebnisse dieses Verbundvorhabens sollen Einflussgrößen und Messunsicherheiten für verschiedene Analyte (Zellen, DNA, Lipoprotein-Partikel) charakterisieren und damit Grundlagen schaffen, inwieweit sich die absolute Zählung für die Rückführung auf die SI-Einheit der Stoffmenge für biologisch relevante Objekte verwirklichen lässt.

Bild 7: Mikrotiterplatte eines ELISA Tests (eines bioanalytischen Tests, der u. a. in der Medizin eingesetzt wird, Quelle Voigt et al., 2008) und die unter Vorwissen geschätzte Regressionskurve

### Europäisches Projekt zu neuen Methoden für die Bestimmung von Messunsicherheiten

Im Rahmen des EMRP-Projektes „NEW 04 – Novel mathematical and statistical approaches to uncertainty evaluation“ werden in der PTB als Schwerpunkte neue Methoden zur Unsicherheitsauswertung für inverse Probleme und Regressionsverfahren entwickelt. Neben der Berücksichtigung aller Unsicherheiten ist ein wichtiger Teil bei der Bestimmung vertrauenswürdiger Unsicherheiten auch die Einbeziehung jeglichen Vorwissens. Dies wurde im Fachbereich für das Fallbeispiel der ELISA-Tests im aktuellen Jahr realisiert: Aus einer früheren internationalen Vergleichsstudie konnten informative A-priori-Verteilungen konstruiert werden, welche die Erfahrungen durch in der Vergangenheit analysierte ELISA-Tests formalisieren. Die entwickelten A-priori-Verteilungen ermöglichen zuverlässige Unsicherheitsauswertungen für verschiedenartige zukünftige ELISA-Tests (durchgeführt z. B. an verschiedenen Analyten in unterschiedlichen Laboratorien). Außerdem ermöglichen sie eine Regularisierung von Regressionsproblemen, z. B. wenn die Menge der Messdaten nicht ausreichend ist. Die entwickelte Methode erlaubt damit auch für ELISA-Tests eine Analyse, in denen bisher verwendete Methoden entweder kein oder nur ein (äußerst) ungenaues Ergebnis erzielen.

Ein weiterer Schwerpunkt des genannten EMRP-Projektes ist die Behandlung inverser Probleme für Systeme mit rechenaufwendigen Modellen. Ein prominentes Beispiel hierfür in der PTB ist die Auswertung von indirekten Messungen an Photomasken (Scatterometrie), die in der Halbleiterindustrie zur

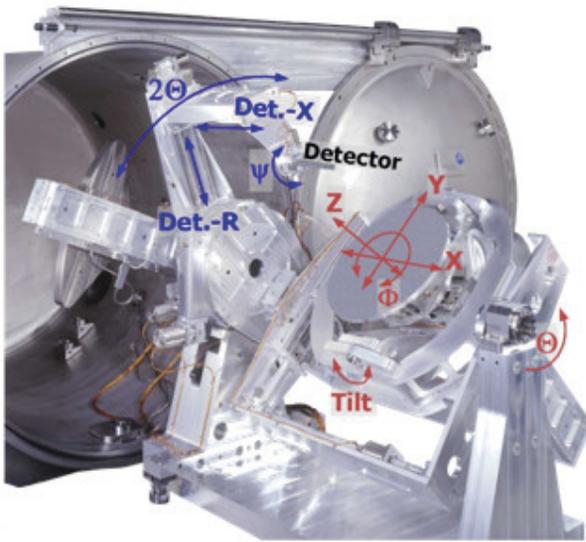
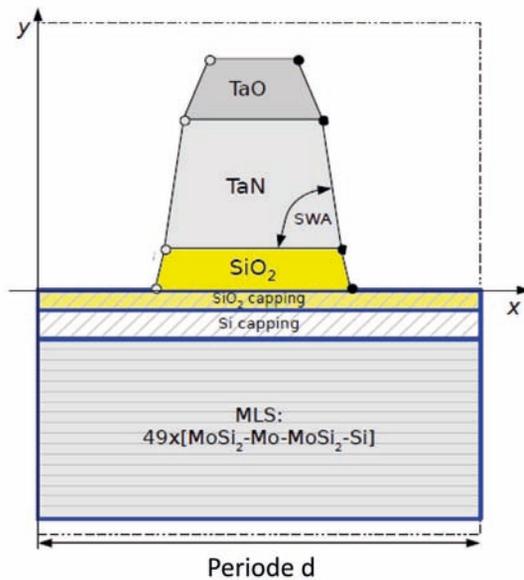
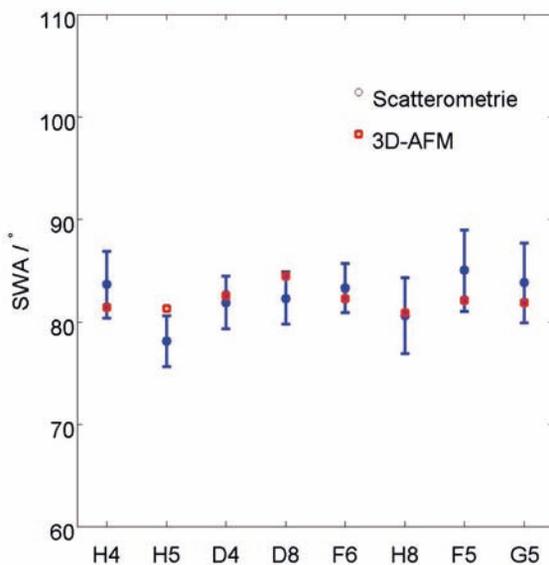


Bild 8: Schematische Zeichnung des Profils einer Periode einer Linienstruktur auf einer EUV-Maske (links) und aus der Lösung des inversen Problems bestimmte Werte des Seitenwinkels (SWA) mit Messunsicherheit (blau) für verschiedene Felder auf der EUV-Maske. Die Ergebnisse von Vergleichsmessungen an denselben Feldern mit dem Rasterkraftmikroskop (3D-AFM) sind als rote Punkte dargestellt.



Herstellung von Bauelementen verwendet werden. Die Auswertung der Daten geschieht dabei durch Vergleich von Messdaten mit Ergebnissen von Simulationen der Maxwell-Gleichungen mithilfe von Finite-Elemente-Verfahren (FEM). Dabei wird numerisch die Geometrie bestimmt, für die die Simulationsergebnisse am besten mit den originalen Messdaten übereinstimmen. Neben der Bestimmung von Geometrieparametern wie die kritischen Dimensionen (z. B. obere und untere Breite sowie Höhe einer Trapezstruktur in Abb. 8 mitte) und der Seitenwinkel (SWA derselben Abbildung) müssen dabei auch die Unsicherheiten dieser Parameter bestimmt werden. Im Rahmen des Projektes zeigte es sich, dass die Verbesserung des mathematischen Modells sowohl zu einer kleineren Unsicherheit der kritischen Dimensionen (< 2 Nanometer statt < 5 Nanometer) als auch zu einer guten Übereinstimmung des aus der Scatterometrie bestimmten Seitenwinkels mit den direkt aus Rasterkraftmikroskopie bestimmten Werten dieser Größe führt (siehe Abb. 8 unten). Zur Bestimmung der Messunsicherheit können neben Näherungsverfahren wie einer auf Linearisierung basierten Kovarianzmethode nun auch im Rahmen des Projektes entwickelte Surrogatmodelle eingesetzt werden, die auf dem Ansatz des sogenannten Polynomialchaos beruhen und durch ein gegenüber dem Originalmodell um drei bis vier Größenordnungen schnellere Rechengeschwindigkeit Monte-Carlo-Simulationen zur Bestimmung der Unsicherheiten erlauben.



### Initiative für ein europäisches Zentrum für Mathematik und Statistik in der Metrologie

Im laufenden EMRP-Projekt wird zurzeit auch das Konzept eines „European Centre for Mathematics and Statistics in Metrology“ erarbeitet, das nicht nur die wachsende europäische Zusammenarbeit der mathematischen Experten der europäischen Metrologieinstitute institutionalisieren soll, sondern vor allem auch das vorhandene und im Laufe von mehreren EMRP-Projekten neuentwickelte bzw. neuzuentwickelnde mathematische Know-How den interessierten Anwendern der europäischen Metrologieinstitute, der europäischen Industrie und europäischen und internationalen Organisationen z. B.

auf dem Gebiet der Normung und Standardisierung zur Verfügung stellen wird.

## Zuverlässigkeit von Messdaten in Energienetzen

Der Fachbereich *Metrologische Informationstechnik*, dessen Arbeitsschwerpunkt bei der Zuverlässigkeit und Sicherheit von metrologischer Software und Messdaten liegt, hat sich in besonderem Maße national und international für die Sicherheit von Messdaten in Energienetzen engagiert. Auf europäischer Ebene erfolgte eine Beteiligung am EMRP-Vorhaben „Metrology for Smart Electrical Grids“, das 2013 abgeschlossen worden ist. In diesem Rahmen ist vornehmlich konzeptionell gearbeitet worden. Dabei ist ein Sicherheitskonzept für messtechnische Komponenten in Smart Grids entstanden. Im Mittelpunkt des Konzeptes steht die Ende-zu-Ende-Sicherheit der Messdaten unter Beachtung der besonderen dynamischen Anforderungen an Messsysteme in Smart Grids. Die Aktivität erfolgte in Anlehnung an die Arbeiten in der von der EU-Kommission eingesetzten Task Force Smart Grid und der CEN/CENELEC/ETSI Smart Grid Coordination Group, an denen der Fachbereich aktiv beteiligt war.

Auf nationaler Ebene sollen in Zukunft Smart Meter Gateways das Kommunikationsbindeglied zwischen Energiemessgeräten und den über das Internet angeschlossenen Wirtschaftakteuren darstellen (siehe Bild 9). Gateways sind reine IT-Geräte mit umfangreichen metrologischen Funktionen und daher den Regelungen des gesetzlichen Messwesens unterworfen.

Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) sichert in Schutzprofilen und technischen Richtlinien die IT-Sicherheit und Interoperabilität der Gateways ab. Die Sicherheitsphilosophien, die IT-Sicherheitskonzepten und dem gesetzlichen Messwesen zugrunde liegen, unterscheiden sich jedoch und führten zur Notwendigkeit, ein ergänzendes, eng an die Dokumente des BSI angebundenes Anforderungsdokument zu erarbeiten.

Die konkreten metrologischen Anforderungen wurden federführend vom Fachbereich *Metrologische Informationstechnik* in intensiver Zusammenarbeit innerhalb des PTB-Arbeitskreises *Kommunikative Verbrauchszähler* entwickelt und in dem Dokument PTB-A50.8 als verlässliche Handlungshilfe für Herstellerunternehmen und Prüfinstitute niedergelegt. Mit dem BSI, den Eichbehörden und den betroffenen Wirtschaftsverbänden ist eine intensive Abstimmung erfolgt.

Wichtige Inhalte der PTB-A50.8, die über die allgemeinen Sicherheits- und Interoperabilitätsanforderungen im Schutzprofil und der Technischen Richtlinie hinausgehen, sind:

- Definition der Beziehungen des Gateways zu anderen technischen Einrichtungen wie Anzeigeeinheit, Zähler und Zeitserver
- Anforderungen an die Zeitsynchronisation und die sichere Bereitstellung der Zeit
- Anforderungen an die Fehlererkennung und an Aufzeichnung für eichtechnische Verwendungen

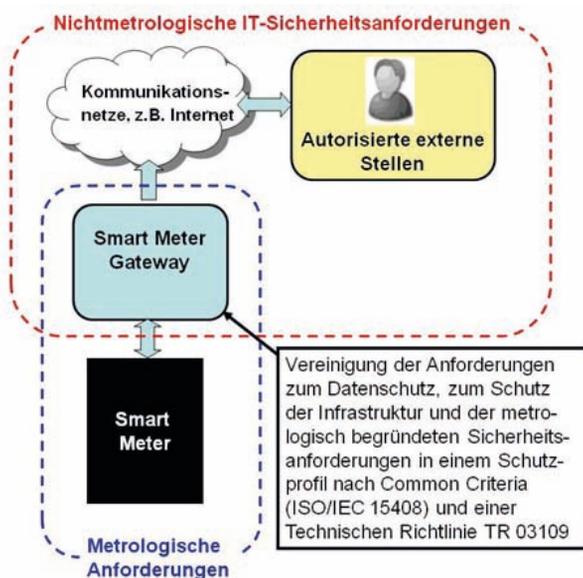


Bild 9: Einordnung der Smart Meter Gateways zwischen Zählern und offenen Kommunikationsnetzen

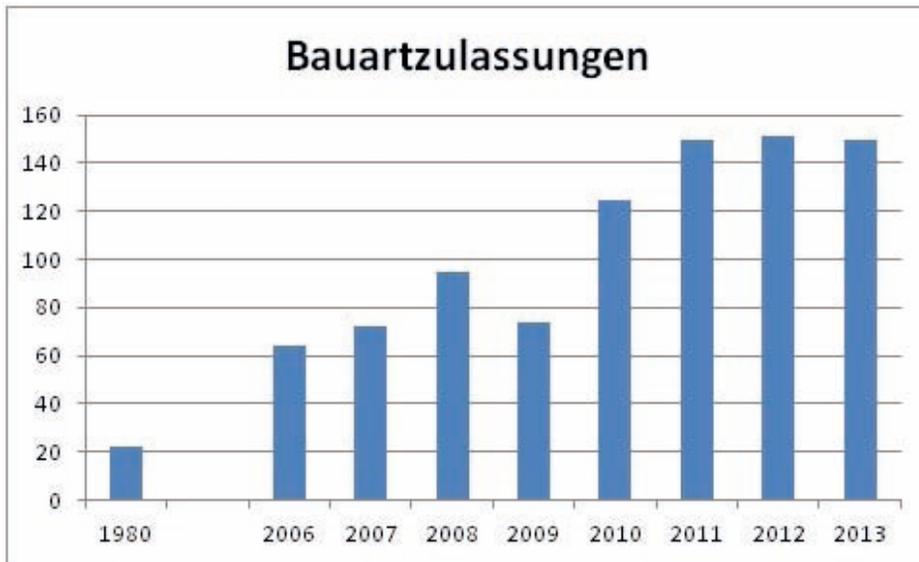


Bild 10: Entwicklung der Bauartzulassungen.

- Rück- und Nebenwirkungsfreiheit von Software-schnittstellen
- Anforderungen an die Datenakquisition und an die Bildung neuer Messgrößen
- Anforderungen an Inhalte und Varianten der Anzeigen, an die Speicherung und an die Anzeige von abrechnungsrelevanten Informationen.

## Neue Herausforderungen bei der Spielgeräte-technik

Das Interesse der Industrie an der Vermarktung neuer Spielgerätekategorien hält seit einigen Jahren ungebrochen an. Bild 10 zeigt die Entwicklung der Bauartzulassungen in den letzten Jahren. Förderlich für die schnelle Entwicklung neuer Bauarten ist die Computerisierung der Spielgeräte und damit die weitgehende Verlagerung der Spielgerätekategorienentwicklung auf die Schaffung neuer Software. Alle wesentlichen Spielabläufe finden auf Computern statt und werden auf hochwertigen Bildschirmen dargestellt. Neue Bauarten entstehen daher häufig nur durch die Weiterentwicklung der Software.

Die Nutzung eingebetteter IT-Systeme („Embedded Systems“) ist aber nicht nur ein Phänomen, das sich auf die Anzahl der Bauarten auswirkt, sondern auch qualitativ neue Ansprüche an die Zulassungsprüfung stellt. Das trifft in besonderem Maße für den Schutz der Geräte vor unerlaubten Eingriffen zu, denn mit den Vorteilen, die der Einsatz von gängiger Informationstechnologie und Software mit sich bringt, übertragen sich auch deren Risiken.

Im Jahre 2013 hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) einen Entwurf für die Novellierung der Spielverordnung vorgelegt, mit

dem erhebliche Verbesserungen des Spielerschutzes erreicht werden sollen. Um bei den gerätebezogenen Zulassungsanforderungen die erwünschte Wirkung zu erzielen, müssen die Besonderheiten der IT-basierten Spielgeräte in geeigneter Weise beachtet werden. Hier ist der Fachbereich *Metrologische Informationstechnik*, der sich laufend durch die Zulassungstätigkeit die entsprechende Expertise erarbeitet, beratend für das BMWi tätig geworden.

Im Zuge der Beratung wurden zielführende, gerätebezogene Anforderungen identifiziert und deren prüftechnische Umsetzung untersucht. Die Abbildung politischer Ziele auf von einer Zulassungsbehörde prüfbar Parameter ist ein wichtiges Kriterium für die Erreichbarkeit der angestrebten Ziele.

Schwerpunkte der Untersuchung waren

- die Einführung einer periodischen Spielpause mit Rückversetzung des Spielgerätes in einen definierten Anfangszustand
- die Sicherung von Daten, die vom Spielgerät generiert werden und insbesondere für die steuerlichen Erhebungen, auch außerhalb der Geräte, benötigt werden
- eine vergleichende Analyse von verschiedenen Varianten einer Spielkarte zur Unterbindung der Gerätenutzung durch Personen unter 18 Jahren und zur Eindämmung der Mehrfachbespielung.

Die dahinter stehenden technischen Konzepte werden in einer zukünftigen technischen Richtlinie, die einer Novellierung der Spielverordnung folgen wird, detailliert darzulegen sein.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de))

### Grundlagen der Metrologie

#### EMRP-Projekt zur Quantifizierung biologisch relevanter Moleküle und Entitäten

Das Zählen biologischer Entitäten mit größtmöglicher Genauigkeit ist grundlegend für Anwendungen in verschiedenen Bereichen wie der Medizin, dem Umweltschutz, der Biotechnologie und der Lebensmittelsicherheit. Allerdings sind für viele dieser Messgrößen noch keine Referenz-Messverfahren verfügbar. Ziel des europäischen EMRP-Projekts ist es, Verfahren zur Herstellung und Charakterisierung von hochreinen Kalibrationsmaterialien zu entwickeln und entsprechende Messverfahren zur Rückführung biologischer Messgrößen durch die Zählung der entsprechenden Ziel-Entitäten zu etablieren. (M. Kammel, FB 8.3, [martin.kammel@ptb.de](mailto:martin.kammel@ptb.de); A. Kummrow, FB8.3, [andreas.kummrow@ptb.de](mailto:andreas.kummrow@ptb.de); J. Neukammer, FB8.3, [joerg.neukammer@ptb.de](mailto:joerg.neukammer@ptb.de))

#### Quantifizierung der Konzentration von Viren und Bakterien im Rahmen des EMRP-Projektes INFECT-MET

Der Verlauf von Infektionskrankheiten hängt wesentlich von der Konzentration der Krankheitserreger im Patienten ab. Der empfindliche Nachweis und die Quantifizierung der in einer Probe vorhandenen Anzahl von Viren und Bakterien sind mittels der Polymerase-Ketten-Reaktion (PCR) möglich. Die PTB untersucht im Rahmen des EMRP-Projektes INFECT-MET die Nachweisgrenze für die Quantifizierung der Virenkonzentration mit verschiedenen PCR-Verfahren. (M. Hussels, FB 8.3, [martin.hussels@ptb.de](mailto:martin.hussels@ptb.de); A. Kummrow, FB 8.3, [andreas.kummrow@ptb.de](mailto:andreas.kummrow@ptb.de); J. Neukammer, FB 8.3, [joerg.neukammer@ptb.de](mailto:joerg.neukammer@ptb.de))

#### Rückführung photometrischer Absorptionsmessungen für die Bestimmung des Gesamt-Hämoglobingehaltes im Blut

Die Bestimmung der Konzentration des Hämoglobins im Blut ist eine der am häufigsten durchgeführten labormedizinischen Untersuchungen. Im Rahmen des EMRP-Projektes „Metalomics“ wurden die verschiedenen Beiträge zur kombinierten Messunsicherheit für das spektrale Absorptionsmaß der Messlösungen bestimmt. (K. Witt, FB 8.3, [klaus.witt@ptb.de](mailto:klaus.witt@ptb.de); A. Kummrow, FB 8.3, [andreas.kummrow@ptb.de](mailto:andreas.kummrow@ptb.de); J. Neukammer, FB 8.3, [joerg.neukammer@ptb.de](mailto:joerg.neukammer@ptb.de))

#### Charakterisierung der $^{129}\text{Xe}$ -Spinrelaxation in Glaszellen

Die drei PTB-Fachbereiche 8.1, 8.2 und 8.4 arbeiten im Rahmen einer Kooperation mit der TU München (Prof. Fierlinger) daran, hochgenau die Spinpräzession von hyperpolarisiertem  $^3\text{He}$  und  $^{129}\text{Xe}$  zu messen. In der ersten Projektphase werden die Polarisationsverluste durch Wechselwirkung der Xe-Atome mit Gefäßwänden untersucht. (W. Kilian, FB 8.1, [wolfgang.kilian@ptb.de](mailto:wolfgang.kilian@ptb.de))

#### Feldgesteuerte Partikel-Matrix-Wechselwirkungen

In der Krebstherapie können magnetische Nanopartikel als lokale Vermittler oder Akteure eingesetzt werden, die z. B. Tumorgewebe erhitzen oder eine Anreicherung von Therapeutika oder Genmaterial unterstützen sollen. Im Rahmen des neu eingerichteten Schwerpunktprogramms 1681 der DFG werden insbesondere Wechselwirkungen der Nanopartikel mit dem Gewebe untersucht, bei denen Transport und Erwärmung in ruhenden und strömenden Medien eine Rolle spielen. (D. Eberbeck, FB 8.2, [dietmar.eberbeck@ptb.de](mailto:dietmar.eberbeck@ptb.de))

#### Mikroskopie an fluoreszenz-markierten Peptiden in lebenden Zellen

Die Untersuchung der Wechselwirkung von Peptiden mit biologischen Membranen stellt einen zentralen Punkt des EMRP-Projektes „Metrology for biomolecular origin of disease“ dar. Der Fachbereich 8.3 der PTB beteiligt sich daran mit fluoreszenzmikroskopischen Untersuchungen an lebenden Zellen. Ziel sind quantitative Aussagen zu den Beziehungen zwischen strukturellen Parametern der Peptide und ihren pathologischen Wirkungen. Die Arbeiten dienen weiterhin der Unterstützung einer NMR-Biosensor-Entwicklung in der Arbeitsgruppe *MR-Messtechnik* (8.11) der PTB. Die Fluoreszenzmikroskopie ermöglicht hier die Zuordnung von  $^{129}\text{Xe}$  NMR-Signalen markierter Peptide zu unterschiedlichen Anordnungen dieser Peptide in Zellen. (O. Hirsch, FB 8.3; [ole.hirsch@ptb.de](mailto:ole.hirsch@ptb.de), L. Mitschang, FB 8.1, [lorenz.mitschang@ptb.de](mailto:lorenz.mitschang@ptb.de))

#### Äquivalenz zweier statistischer Methoden für Ringvergleiche

Analysen von Ringvergleichen sind entscheidend, insbesondere wenn Messungen möglicherweise inkonsistent sind. Eine statistische Methode für solche Analysen ist Bayesian Model Averaging. (K. Klau-

enberg, FB 8.4, katy.klaunenberg@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Kritische Analyse bestehender Richtlinien zur Auswertung von „key comparisons“**

Die Auswertung von „key comparisons“ ist wesentlich für die Sicherstellung der Äquivalenz zwischen den Metrologieinstituten weltweit. Das „CIPM mutual recognition arrangement“ schreibt zu großen Teilen die Art dieser Auswertung vor. In einer gemeinsamen Analyse mit einer Kollegin vom NIST sind diese Vorgaben unter statistischen Gesichtspunkten kritisch untersucht worden. Als Ergebnis wurde aufgezeigt, dass die Vorgaben im Allgemeinen nicht kompatibel mit gängigen Methoden der Statistik zur Auswertung von Ringvergleichen sind. (C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Umgebung für High-Performance-Computing (HPC) in metrologischen Anwendungen aufgebaut**

Die Auswertung von Daten und die Bestimmung der Messunsicherheit in der metrologischen Forschung erfordern zunehmend die numerische Behandlung computeraufwendiger mathematischer Modelle. Im Laufe der letzten Jahre wurde daher in der PTB ein Parallelrechen-Cluster mit 384 Prozessorkernen etabliert und für zahlreiche Anwendungen wie z. B. Monte-Carlo-Simulationen oder Modellierung von turbulenten Strömungen nutzbar gemacht. (G. Lindner, FB 8.4, gert.lindner@ptb.de)

### **Neues Verfahren zur Bestimmung von Priorverteilungen für Messunsicherheitsanalysen**

Zur Konstruktion von Priorverteilungen gibt es ein in der Statistik anerkanntes Verfahren, das sogenannte Referenzpriors erzeugt. Das Verfahren ist jedoch kompliziert und gestattet nur in einfachen Fällen eine analytische Lösung. An der PTB ist es gelungen, für dieses Verfahren eine alternative Berechnungsmethode zu entwickeln, die die analytische Berechnung der Priors vereinfachen kann. (O. Bodnar, FB 8.4, Olha.Bodnar@ptb.de, C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Robuste Überwachung der Kovarianzmatrix**

Für die Detektion von Änderungen in der zugrundeliegenden Variabilität von multivariaten normalverteilten Beobachtungen ist gemeinsam mit der Humboldt Universität Berlin und der Universität Augsburg ein neues Verfahren entwickelt worden. Die Methode ist sequenziell und kann die Stabilität der Kovarianzmatrix bereits auf der Basis einer einzelnen multivariaten Beobachtung beurteilen. (O. Bodnar, FB 8.4, olha.bodnar@ptb.de)

### **Vergleich mit AFM bestätigt Genauigkeit scatterometrischer Mess- und Auswerteverfahren**

Erstmals wurden die in der EUV-Scatterometrie untersuchten Lithografiemasken zusätzlich mit einem Atomkraftmikroskop (AFM) der PTB vermessen, was eine zuverlässige Aussage über die Qualität der inversen Messung ermöglicht. Der Vergleich zeigt eine wachsende Übereinstimmung der kritischen Dimensionen der Lithografiemaske mit zunehmender Komplexität des scatterometrischen Auswertemodells. (M. A. Henn, FB 8.4, mark-alexander.henn@ptb.de, H. Groß, FB 8.4, hermann.gross@ptb.de, S. Heidenreich, FB 8.4, sebastian.heidenreich@ptb.de, C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de, M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

### **Vereinfachte Auswerteverfahren für die Magnetfeldfluktuationsthermometrie**

Für die Magnetfeldfluktuationsthermometrie wurden vereinfachte Auswerteverfahren entwickelt, die anstelle einer numerisch aufwendigen Methode beruhend auf dem Prinzip der Bayes'schen Inferenz eingesetzt werden können. Für die neuen Verfahren wurden einfach anwendbare analytische Ausdrücke zur Temperaturbestimmung und zur Bestimmung der zugehörigen Messunsicherheit entwickelt. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de, C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **EMRP-Vorhaben „Metrology for Smart Electrical Grids“ abgeschlossen**

Mit dem Projektabschluss steht ein weiterentwickeltes Verfahren zur Beobachtung von lokalen Energienetzen mit unvollständiger Messinfrastruktur zur Verfügung. Dabei wurde ein Algorithmus zur Online-Überwachung in Mittelspannungsnetzen erarbeitet, der Schätzgrößen aller Netzparameter berechnet. In Kooperation mit dem National Physical Laboratory (NPL) wurden begleitende Messungen am Labornetz der Universität Strathclyde durchgeführt. Weiterhin wurde ein Sicherheitskonzept entwickelt, mit dem eine echte Ende-zu-Ende-Sicherheit erreicht wird. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Start des ZIM-Projektes „Neue nanopartikuläre Kontrastmittel für das Magnetic Particle Imaging“**

Seit diesem Jahr arbeitet die PTB an einem vom Bundesministerium für Wirtschaft über zwei Jahre geförderten ZIM-Projekt zur Erforschung neuer nanopartikulärer Kontrastmittel für das Magnetic Particle Imaging (MPI) mit. Mit dieser neuen Bild-

gebungsmethode sollen in Zukunft der Blutfluss in den großen Blutgefäßen oder die Ausdehnung von Tumorgewebe nichtinvasiv dargestellt werden. Weitere Partner des Konsortiums sind die nano-PET Pharma GmbH und die Technische Universität Braunschweig. (U. Steinhoff, FB 8.2, uwe.steinhoff@ptb.de)

## **EMRP-Projekt IND52 „Multidimensionelle Reflektometrie für die Industrie“**

Im Rahmen des von 9 europäischen Partnern durchgeführten EMRP-Projektes IND52, das am 1.9.2013 gestartet wurde, werden Verfahren zur messtechnischen Charakterisierung der visuellen optischen Eigenschaften von Oberflächen untersucht. Im FB 8.4 werden mathematische Modelle, virtuelle Experimente sowie Analyseverfahren für die im Rahmen des Projektes eingesetzten komplexen optischen Messverfahren entwickelt. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de, M. Langovoy, FB 8.4, mikhail.langovoy@ptb.de)

## **Entwicklung neuer Sensoren für die durchflussszytometrische Zellzählung**

Die Durchflussszytometrie wird in der medizinischen Diagnostik zur Bestimmung der Konzentration von Zellen routinemäßig eingesetzt. Im Rahmen eines MNPQ-Projektes wird mit der Firma Partec GmbH untersucht, ob der Einsatz der Vektorimpedanzanalyse bei Anlegen hochfrequenter Wechselspannungen ausgenutzt werden kann, um weitere spezifische Informationen über verschiedene Zellpopulationen zu erhalten und möglicherweise auf teure und langwierige immunologische Markierungen verzichten zu können. (P. Simon, FB 8.3, peter.simon@ptb.de; M. Frankowski, FB 8.3, marcin.frankowski@ptb.de; R. Häfner, Technischer Gerätebau, robert.haefner@ptb.de; A. Kuhn, Technischer Gerätebau, axel.kuhn@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

## **Abschluss des MNPQ-Projektes „Aufbau eines pädiatrischen EKG-Referenzsystems zur Funktionserweiterung Automatisierter Externer Defibrillatoren“**

In diesem vom Bundesministerium für Wirtschaft über drei Jahre geförderten Projekt erstellte die PTB in Kooperation mit der Metrax GmbH einen Datensatz von pädiatrischen Elektrokardiogrammen (EKGs), mit dem die immer häufiger installierten automatisierten externen Defibrillatoren auf ihre Eignung zur korrekten Arrhythmieerkennung auch bei Kindern getestet werden können. (U. Steinhoff, FB 8.2, uwe.steinhoff@ptb.de)

## **Entwicklung einer mathematischen Methode zur spektralen Entfaltung**

In Zusammenarbeit mit der Firma TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH wurde ein mathematisches Verfahren entwickelt, um Strahlungsverteilungskurven hinsichtlich der Einflüsse des verwendeten Monochromators zu korrigieren. Das entwickelte Verfahren beruht auf der iterativen Lucy-Richardson-Methode aus der Bildverarbeitung, welche um ein automatisches Kriterium für die Bestimmung der optimalen Anzahl der Iteration erweitert wurde. (S. Eichstädt, sascha.eichstaedt@ptb.de, FB 8.4, F. Schmähling, franko.schmaehling@ptb.de, FB 8.4)

## **Neues MNPQ-Projekt: „Entwicklung von Verfahren zur Charakterisierung integraler Größen aus differentiellen optischen Messungen“**

In der industriellen optischen Messtechnik werden zunehmend differentielle Messverfahren eingesetzt, die eine vollständige Charakterisierung des Messobjektes z. B. in Form von Temperatur- oder Leuchtdichteverteilungen liefern. Aus den differentiellen Messungen können integrale Größen berechnet werden, die eine Rückführung auf SI-Basiseinheiten ermöglichen. Im Rahmen eines MNPQ-Projektes werden Verfahren entwickelt, die eine routinemäßige Charakterisierung der Genauigkeit der integralen Größen ermöglichen. (G. Wübbeler, FB 8.4 gerd.wuebbeler@ptb.de, Franko Schmähling, FB 8.4, franko.schmaehling@ptb.de)

## **Genauere Modellierung des Tilted-Wave-Interferometers durch die Simulationsumgebung**

Im Rahmen des laufenden ERMP-Projektes IND10 wurde für das Tilted-Wave-Interferometer (TWI) die an der PTB entwickelte Simulationsumgebung erweitert. Als Ergebnis können nun TWI-Experimente in noch realistischerer Weise auf dem Computer modelliert und zu Sensitivitäts- und Genauigkeitsuntersuchungen genutzt werden. (M. Stavridis, FB 8.4, manuel.stavridis@ptb.de, I. Fortmeier, FB 8.4, ines.fortmeier@ptb.de)

## **Bestimmung der Rauheit von Linienprofilen mithilfe der Scatterometrie**

In der Scatterometrie können kritische Strukturgrößen von lithografischen Masken indirekt vermessen werden. Mit einem erweiterten Auswerteverfahren konnte erstmals auch die Kantenrauheit von Linien aus Scatterometriedaten bestimmt und mit vorhandenen direkten rastermikroskopischen Messungen verglichen werden. (M. A. Henn, FB 8.4, mark-alexander.henn@ptb.de, S. Heidenreich, FB 8.4, sebastian.heidenreich@ptb.de, F. Scholze, FB 7.1, frank.

scholze@ptb.de, H. Groß, FB 8.4, hermann.gross@ptb.de, M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

### **Mobile Messtechnik für Elektrofahrzeuge im Straßenverkehr**

Nach erfolgreichem Abschluss der ersten Förderphase des Vorhabens On-Board-Metering, bei dem für die PTB die Integration von Messtechnik in die Fahrzeuge als Bestandteil eines neuartigen Ladekonzepts für Elektrofahrzeuge im Vordergrund stand, werden seit September 2012 im Anschlussvorhaben On-Board-Metering II umfangreiche Feldtests durchgeführt und die Integration der gesetzlich geregelten abrechnungsrelevanten Prozesse in die sich noch im Aufbau befindliche Systemarchitektur vom Ladepunkt bis zum Anbieter der Ladeenergie bzw. Fahrzeugbetreiber untersucht. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de; J. Weil, FB 8.5, jan.weil@ptb.de)

### **Lizenzvereinbarung PTB und D-Trust über Nutzung von INSIKA-Software**

Die D-Trust GmbH, ein Tochterunternehmen der Bundesdruckerei GmbH, und die PTB haben eine Lizenzvereinbarung zur Nutzung einer von der PTB gemeinsam mit Partnern im Rahmen des vom BMWi geförderten MNPQ-Vorhabens „Integrierte Sicherheitslösung für messwertverarbeitende Kassensysteme“ (INSIKA) entwickelten Software abgeschlossen. Diese Software ermöglicht eine manipulations- und nachweissichere Aufzeichnung von Messdaten und Transaktionen. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)

### **Metrologische Anforderungen an Smart Meter Gateways**

Zusätzlich zu den vom Bundesamt für die Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) für Smart Meter Gateways entwickelten Anforderungsdokumenten (Schutzprofil nach ISO/IEC 15408 und Technische Richtlinie TR 03109), die vornehmlich auf Datenschutz und IT-Sicherheitsaspekte abzielen, sind ergänzende metrologische Anforderungen als PTB-A 50.8 spezifiziert worden. (U. Grottker, FB 8.5, ulrich.grottker@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Funktionelle Magnetresonanztomografie im visuellen Kortex**

Verglichen mit klinischen Magnetresonanztomografen (MRT) bieten Ultrahochfeld-MRT gerade für die MR-Spektroskopie (MRS) spezifische Vorteile. In Kooperation mit dem MPI für Bildungsforschung, Berlin, sollen diese Eigenschaften genutzt

werden, um die sehr kleinen Konzentrationsänderungen bestimmter Neurotransmitter im Gehirn nachzuweisen, die als Reaktion auf kognitive Reize erwartet werden. (R. Mekle, FB 8.1, ralf.mekle@ptb.de)

#### **Effizientes Verfahren zur Bestimmung von Leistungsgrenzwerten für mehrkanalige MR-Sendespulen**

Aufgrund der Vielzahl der Ansteuerparameter erfolgt die Festlegung sicherer Betriebsmodi von mehrkanaligen Sendespulen für die Magnetresonanztomografie (MRT) derzeit anhand sehr vereinfachter Modelle. Auf der Basis eines neuentwickelten Verfahrens gelingt nunmehr die effektive und zuverlässige Abschätzung der maximalen lokalen  $SAR_{10g}$  (Spezifische Absorptionsrate in W/kg, gemittelt über 10 g Körpergewebe). (Frank Seifert, FB 8.1, frank.seifert@ptb.de)

#### **HF-Kopfspule bei 7 Tesla**

Für den 7-Tesla-MR-Tomografen wurde eine Hochfrequenzspule entwickelt, die die artefaktarme MR-spektroskopische Quantifizierung von Metaboliten im menschlichen Gehirn erlaubt. Die Zertifizierung der Spule für Humanuntersuchungen erfolgte durch eine Benannte Stelle, wobei erstmalig auch der Betriebsmodus „Mehrkanaliges Senden“, d. h. die unabhängige Ansteuerung beider Sendekanäle, mit zugelassen wurde. (H. Pfeiffer, FB 8.1, harald.pfeiffer@ptb.de)

#### **Messungen zur Erwärmung an implantierten EEG-Elektroden bei MR-Untersuchungen**

Zusammen mit Wissenschaftlern der AG Neuro-radiologie der Charité – Universitätsmedizin Berlin wurden am 3-T-MRT der PTB Messungen durchgeführt, die Aufschluss über die Erwärmung des Hirngewebes bei implantierten EEG-Elektroden während einer MRT-Messung geben sollen. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse sehr empfindlich von der genauen Kabelführung innerhalb des Magnet-tunnels abhängen und dass bei bestimmten Konfigurationen an den Elektrodenenden durchaus gefährliche Temperaturerhöhungen auftreten können. (Ihlenfeld, FB 8.1, albrecht.ihlenfeld@ptb.de)

#### **Ringvergleich an lebendigen und künstlichen Prüfkörpern**

Um die Vergleichbarkeit der MR-Messdaten aus einer multizentrischen Studie zu untersuchen und möglichst zu verbessern, wurden an acht 3-Tesla-MRT-Scannern (vier verschiedene Modelle, drei verschiedene Hersteller) Vergleichsmessungen ausgeführt. Zwei PTB-Wissenschaftler reisten mit drei

Phantomen zu den acht beteiligten europäischen Instituten und führten dort vergleichende MR-Scans durch, wobei nicht nur die Phantome, sondern auch die Wissenschaftler selbst als Referenzmessobjekt dienten. (R. Brühl, FB 8.1, ruediger.bruehl@ptb.de)

## **Mobiler $^{129}\text{Xe}$ -Polarisator im Feld**

Der im vergangenen Jahr fertiggestellte mobile  $^{129}\text{Xe}$ -Polarisator ist in verschiedenen Forschungsprojekten (BMBF, EMRP, DFG) in Labors sowohl an der PTB als auch vor Ort in den Instituten der Kooperationspartner, beispielsweise des Leibniz-Instituts für molekulare Pharmakologie (FMP), erfolgreich eingesetzt worden. Dafür sind die neben der Kompaktheit und Transportierbarkeit der Messapparatur auch ihre Flexibilität bei der Anwendung für unterschiedliche Untersuchungsziele maßgeblich gewesen. (S. Korchak, FB 8.1, sergey.korchak@ptb.de)

## **Verbesserung der Signalstärke von hyperpolarisiertem $^{129}\text{Xe}$ -Gasstrom**

Zur Umsetzung der PTB-Schutzrechtsanmeldung „Kryogenfreies Aufkonzentrieren eines hyperpolarisierten Gases in einem kontinuierlich fließenden Gasstrom“ wurde eine Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH (HZG) eingegangen. Nach Einbau der vom HZG entwickelten Gastrennmembranen in ein speziell zu fertigendes Kunststoffgehäuse sollen Funktionstests am  $^{129}\text{Xe}$ -Polarisator durchgeführt werden. (W. Kilian, FB 8.1, wolfgang.kilian@ptb.de)

## **Charakterisierung eines $^{129}\text{Xe}$ -NMR- und Fluoreszenz-Biomarkers**

Das im vergangenen Jahr gestartete europäische Verbundprojekt EMRP HLT-10 „BiOrigin“, an dem PTB-seitig Wissenschaftler aus den Abteilungen 3, 7 und 8 beteiligt sind, hat die Aufklärung des Zusammenhangs der Primärstruktur von Peptiden mit ihrer Funktionalität bei der Interaktion mit biologischen Membransystemen zum Ziel. Nach der Untersuchung künstlicher Membranmimiken sind kürzlich Experimente mit hyperpolarisiertem  $^{129}\text{Xe}$  aufgenommen worden. Ziel sind quantitative Aussagen zu den Beziehungen zwischen strukturellen Parametern der Peptide und ihren pathologischen Wirkungen. (L. Mitschang, FB 8.1, lorenz.mitschang@ptb.de)

## **Kleintierbeatmungssystem für hyperpolarisiertes $^{129}\text{Xe}$ -Gas**

Im Rahmen eines BMBF-Verbundprojektes gemeinsam mit der AG Freund (Proteinbiochemie) an der FU Berlin wurde ein Beatmungssystem aufgebaut und kalibriert, das es ermöglicht, im Rahmen von Tierstudien hyperpolarisiertes  $^{129}\text{Xe}$ -Gas in reproduzierbaren Atemboli zu verabreichen. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, erstmalig In-vivo-Experimente zur molekularen Bildgebung mit hyperpolarisiertem  $^{129}\text{Xe}$  durchzuführen. (W. Kilian, FB 8.1, wolfgang.kilian@ptb.de)

## **Infraschallquelle für den magnetisch/akustischen Abschirmraum**

Im Rahmen des EMRP-Projektes „EARS“ wurde eine vom FB 1.6 angefertigte Infraschallquelle an dem akustisch und magnetisch geschirmten Raum des FB 8.2 installiert. Es können störungsfrei Magnetfelder gemessen werden, die vom Gehirn als Reaktion auf einen von der kalibrierten Infraschallquelle erzeugten akustischen Reiz ausgebildet werden. (T. Sander-Thömmes, FB 8.2, tilmann.sander-thoemmes@ptb.de)

## **Fötale Magnetokardiogramme mittels mehrerer optisch gepumpter Mikro-Magnetometer**

„Chip Scale Atomic Magnetometer“ sind neuartige flexible Magnetfeldsensoren, die im NIST in der Technologie miniaturisierter Atomuhren entwickelt wurden. Mit diesen Sensoren wurden im BMSR-2 der PTB die magnetischen Herzsignale einer Schwangeren untersucht. Neben dem Herzsignal der Mutter wurde dabei auch ein klares Signal des Fötus, das sogenannte fetale Magnetokardiogramm (fMKG) detektiert. (T. Sander-Thömmes, FB 8.2, tilmann.sander-thoemmes@ptb.de)

## **Kann man Hirnströme in Magnetresonanzbildern sehen?**

Im Rahmen eines BMBF-geförderten Projekts wurde untersucht, ob eine Wirkung von Hirnströmen in der magnetischen Resonanz in einem Feld von einigen Mikrottesla sichtbar sein könnte. Als physiologisches Modell wurde eine neuronale Aktivität gewählt, die durch Reizung eines peripheren Artnervs im Gehirn entsteht. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine derartige Aktivität einen messbaren Einfluss auf das Magnetresonanzsignal haben kann. (Rainer Körber, FB 8.2, rainer.koerber@ptb.de)

### **Einsatz der Nahinfrarotspektroskopie für die Untersuchung physiologischer Vorgänge in der Kleintieriere**

Die Untersuchung der Hämodynamik und der Oxygenierung von Nierengewebe in vivo für verschiedene Belastungssituationen ist von großer Bedeutung für das Verständnis pathophysiologischer Mechanismen, die zu akutem Nierenversagen führen können. Als neue Untersuchungsmethode wurde ein optisches Verfahren entwickelt, bei dem unter Verwendung einer Fasersonde der Zeitverlauf der Hämoglobin-Konzentration und der Sauerstoffsättigung des Blutes in der Niere von Kleintieren in vivo gemessen werden können. (D. Grosenick, FB 8.3, dirk.grosenick@ptb.de)

### **Einfluss der Gewebeabsorption auf die Bestimmung der Farbstoffkonzentration mittels Fluoreszenzmessungen in Reflexionsgeometrie**

Für die Erkennung von Wächterlymphknoten wird an der PTB ein Verfahren entwickelt, bei dem die Anreicherung des Fluoreszenzfarbstoffes Indocyaningrün in den Lymphknoten in der Nähe des Tumors durch Fluoreszenzmessungen mit einer CCD-Kamera beobachtet wird. Mithilfe von Simulationsrechnungen und Messungen an gewebeähnlichen Phantomen wurde untersucht, wie die gemessene Fluoreszenzintensität durch die Gewebe-Eigenabsorption reduziert wird. (L. Szyk, FB 8.3, D. Grosenick, FB 8.3, lukasz.szyk@ptb.de)

### **Effiziente zeitaufgelöste optische Hirnbildgebung größerer Areale**

Ein neuentwickeltes Konzept erlaubt die Erhöhung der Zahl der Sendeoptoden und die optische Bildgebung dynamischer physiologischer Prozesse im Gehirn. Die Methode wurde erfolgreich in einem In-vivo-Experiment mit verschiedenen Typen motorischer Aktivierung demonstriert. (H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

### **General-Linear-Model-Analyse von In-vivo-Messungen zur motorischen Aktivierung des Gehirns mit zeitaufgelöster Nahinfrarotspektroskopie (NIRS)**

In Kooperation mit Dr. E. Molteni (Politecnico di Milano) wurden Zeitreihen der hämodynamischen Antwort auf motorische Stimulation (Fingerbewegungen) bei gesunden Probanden und Schlaganfallpatienten mittels einer statistischen GLM (General Linear Model)-Analyse untersucht. Die Messungen erfolgten in Kooperation mit der Charité und dem FB 8.2. Dabei wurde bestätigt, dass die zeitaufgelöste NIRS-Methode in der Lage ist, die funktionelle Aktivierung im Gehirn von Schlaganfallpatienten

nachzuweisen. (H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

### **Absolutbestimmung der Quantenausbeute von fluoreszierenden Nanomaterialien**

Mit dem zunehmenden Einsatz von Nanomaterialien in den verschiedensten Bereichen gewinnen Methoden an Bedeutung, mit denen sich diese Materialien charakterisieren und insbesondere auch in biologischen Matrizen verfolgen lassen. Im EMRP-Projekt „Chemical and Optical Characterisation of Nanomaterials in Biological Systems“ werden zur Entwicklung entsprechender Nachweisverfahren zunächst einige Metall-Oxid-Nano-Referenzmaterialien und ein Quantenpunkt-Material hergestellt sowie anschließend deren Wechselwirkung mit biologischen Systemen untersucht. (O. Hirsch, FB 8.3; ole.hirsch@ptb.de).

### **Erfolgreicher Abschluss des Projekts zum Transfer von F&E-Ergebnissen zur Bestimmung von Zellkonzentrationen in Körperflüssigkeiten**

Die Rückführung von Zellkonzentrationsbestimmungen auf das SI-Einheitensystem ist im klinischen Umfeld derzeit nur indirekt über die Teilnahme bei Ringversuchen zur externen Qualitätssicherung möglich. In einem vom BMWi geförderten Projekt wurde neben der Weiterentwicklung bestehender primärer Referenzmessverfahren auch ein sekundäres, auf Relativmessungen beruhendes Referenzmessverfahren in Zusammenarbeit mit der Deutschen Vereinten Gesellschaft für Klinische Chemie und Laboratoriumsmedizin (DGKL) und dem städtischen Klinikum Karlsruhe erprobt. (M. Kammel, FB 8.3, martin.kammel@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

### **Temperaturverteilung in großen Lagertanks**

Im Rahmen eines PTB-Projekts mit Partnern von Eichdirektion, Industrie und Universität wurden Temperaturverteilungen in Tanks für Normal- und Extremsituationen beim Nachfüllen und bei zeit- und ortsabhängigen Umgebungstemperaturen simuliert. Durch die virtuellen Experimente auch für Flüssigkeiten mit stark von Wasser abweichenden Materialeigenschaften konnten Messverfahren für die mittlere Tanktemperatur und damit die Massebestimmung des Tankinhalts validiert werden. (S. Schmelter, FB 8.4, sonja.schmelter@ptb.de; R. Model, FB 8.4, regine.model@ptb.de; G. Wendt, FB 1.5, gudrun.wendt@ptb.de)

## **Dreidimensionale Simulation turbulenter aktiver Flüssigkeiten**

Aktive Flüssigkeiten wie Bakteriensuspensionen oder Suspensionen aus chemisch selbstangetriebenen Schwimmern haben wegen ihrer besonderen Eigenschaften ein hohes Potenzial für künftige Anwendungen. Zur Bestätigung eines hydrodynamischen Modells für solche Fluide wurden dreidimensionale Simulationen durchgeführt und mit experimentellen Daten für schwimmende Bakterien in einer detaillierten Turbulenzanalyse erfolgreich verglichen. (S. Heidenreich, FB 8.4, sebastian.heidenreich@ptb.de)

## **Modellierung von Deformationswellen in biologischen Zellen**

In Mikrotropfen, die aus Protoplasma des Schleimpilzes *Physarum Polycephalum* bestehen, wurden laufende und rotierende Deformationswellen sowie irreguläre Kontraktionsmuster gefunden. Wissenschaftlern der PTB ist es gelungen, ein realistisches Modell zu entwickeln, das diese Muster quantitativ reproduziert. (S. Alonso, FB 8.4, sergio.alonso@ptb.de, M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

## **Helmholtz-Seminar zur Berechnung der Messunsicherheit in der Praxis**

Am 19. und 20. März 2013 fand in der PTB Berlin zum dritten Mal das Seminar „Berechnung der Messunsicherheit – Empfehlungen für die Praxis“ statt. Die Veranstaltung wendet sich an Mitarbeiter in Prüf- und Kalibrierlaboratorien und wird gemeinsam mit der BAM und dem DAkkS durchgeführt. 144 Besucher nahmen teil. (S. Mieke, FB 8.4, stephan.mieke@ptb.de)

## **Moderne Regelung für die Softwareaktualisierung in Messgeräten**

Der Fachbereich 8.5 hat das BMWi bei der Entwicklung und Abstimmung von Verfahren zur Aktualisierung von Software in Messgeräten im Rahmen der Novelle des Mess- und Eichgesetzes (MessEG) intensiv beraten und Lösungsentwürfe, die den oben genannten Zielen entsprechen, erarbeitet. Dabei entstanden zwei innovationsoffene Regelungsentwürfe in der Mess- und Eichverordnung, die moderne Verfahren der Softwareaktualisierung abbilden. (F. Thiel, FB 8.5, florian.thiel@ptb.de; U. Grottker, FB 8.5, ullrich.grottker@ptb.de; D. Richter, FB 8.5, dieter.richter@ptb.de)

## **Komplexe Softwarearchitekturen in modernen Messsystemen**

Software in Messsystemen erreicht inzwischen oft einen Komplexitätsgrad, der höchste Ansprüche an die Prüfung der metrologischen Eigenschaften stellt. Bei einem zu prüfenden Geschwindigkeitsmessgerät wurde erstmalig eine Softwarearchitektur vorgestellt, die objektorientiert und auf Nachrichten basierend aufgebaut war (ein sogenannter Softwarebus). Für die Analyse des Quellcodes führten die Prüfer gemeinsame Reviews mit dem Hersteller durch, um Anomalien im Datenfluss zu entdecken, die ausreichende Sicherung der relevanten Parameter zu überprüfen und die ordnungsgemäße Bildung von Prüfsummen zu kontrollieren. (R. Meyer, FB 8.5, reinhard.meyer@ptb.de; U. Grottker, FB 8.5, ullrich.grottker@ptb.de; J. Kupper, FB 1.3, johannes.kupper@ptb.de)

## **Unterstützung bei der Entwicklung neuer Vorgaben für Geldspielgeräte**

Das für die Spielverordnung zuständige Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie hat im Jahre 2013 einen Novellierungsentwurf für die Spielverordnung vorgelegt, in dem erhebliche Verbesserungen des Spielerschutzes angestrebt sind. Um den Vollzug der Bauartzulassung, d. h. insbesondere die Prüfbarkeit der neuen Anforderungen, zu gewährleisten, ist der für die Zulassung der Geldspielgeräte zuständige Fachbereich 8.5 der PTB beratend hinzugezogen worden. (D. Richter, FB 8.5, dieter.richter@ptb.de; F. Thiel, FB 8.5, florian.thiel@ptb.de; R. Kuschfeldt, FB 8.5, reiner.kuschfeldt@ptb.de)

## **Internationale Angelegenheiten**

### **Wissenschaftlich-technologische Zusammenarbeit zwischen der PTB und der Universität Tandil, Argentinien**

Im Rahmen eines vom BMBF unterstützten Projektes zur Förderung der Wissenschaftlich-technologischen Zusammenarbeit (WTZ) mit Argentinien werden zusammen mit dem Institut für Physik der Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires in Tandil F&E-Arbeiten zur Nah-Infrarot-Spektroskopie für die nicht-invasive Erfassung und Charakterisierung von Biomarkern in biologischem Gewebe durchgeführt. (R. Macdonald, FB 8.3, rainer.macdonald@ptb.de, D. Grosenick, FB 8.3, dirk.grosenick@ptb.de)

### **PTB-Messverfahren zur Zellzählung vom Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine (JCTLM) als Referenzmessmethode anerkannt**

Das von der PTB für die Bestimmung der Konzentration von Blutplättchen eingesetzte und in einer entsprechenden DIN-Norm beschriebene Zellzählverfahren wurde vom Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine (JCTLM) als erstes Referenzmessverfahren dieser Art überhaupt in die Datenbank „Higher-order reference materials, measurement methods / procedures and services“ aufgenommen. (M. Kammel, FB 8.3, martin.kammel@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

---

# Kuratorium

Präsident des Kuratoriums

**Dr. Sven Halldorn**

Abteilungsleiter Technologiepolitik,  
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie,  
Berlin

Stellvertretender Präsident des Kuratoriums

**Prof. Dr. h. c. mult. Dr. Klaus von Klitzing**

Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

**Prof. Dr. Gisela Anton**

Physikalisches Institut IV der Universität Erlangen

**Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Auweter-Kurtz**

German Aerospace Academy, Böblingen

**Prof. Dr.-Ing. Winfried Büttner**

Leiter Corporate Intellectual Property and Functions  
in der Zentralabteilung / Corporate Technology  
Siemens AG, München

**Dr. Norbert Burger**

Bundesvereinigung der Firmen im  
Gas- und Wasserfach e. V., Köln

**Dr. Markus Dilger**

CTO der duagon GmbH,  
Dietikon (Schweiz)

**Prof. Dr. Olaf Dössel**

Institut für Biomedizinische Technik,  
Universität Karlsruhe

**Prof. Dr. Wolfgang Ertmer**

Institut für Quantenoptik,  
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

**Dr. Petra Gowik**

Leiterin der Referatsgruppe „Untersuchungen“,  
Bundesamt für Verbraucherschutz und  
Lebensmittelsicherheit, Berlin

**Prof. Dr. Axel Haase**

Direktor des Zentralinstituts für Medizintechnik,  
Technische Universität München, Garching

**Prof. Dr. h. c. mult. Dr. Theodor W. Hänsch**

Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching,  
und Ludwig-Maximilians-Universität, München

**Prof. Dr. Klaus-Peter Jäckel**

Oberkirch

**Prof. Dr.-Ing. Anke Kaysser-Pyzalla**

Wissenschaftliche Geschäftsführerin,  
Helmholtz-Zentrum Berlin

**Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Kowalsky**

Leiter des Instituts für Hochfrequenztechnik,  
Technische Universität Braunschweig

**Dr. Gerald Linke**

Leiter Kompetenz-Center Gastechnik,  
E.ON Ruhrgas AG, Essen

**Dipl.-Phys. Veronika Martens**

Leiterin des Metrologiezentrum Sartorius  
Weighing Technology GmbH, Göttingen

**Prof. Dr. Jürgen Mlynek**

Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft, Berlin

**Dr.-Ing. Eberhard Petrit**

Direktor des Landesbetriebs Mess- und Eichwesen  
Nordrhein-Westfalen

**Prof. Dr.-Ing. Joachim Scheuren**

Geschäftsführer der Müller-BBM GmbH, Planegg

**Dr. Thomas Sesselmann**

Geschäftsführer Dr. Johannes Heidenhain GmbH,  
Traunreut

**Dr. Augustin Siegel**

Oberkochen

**Prof. Dr. Dipl.-Chem. Lothar Siekmann**

Institut für Klinische Biochemie, Universität Bonn

**Ind.-Kfm. Peter von Siemens**

München

**Prof. Dr. h. c. mult. Dr. Joachim Treusch**

Bremen

**Prof. Dr. Eberhard Umbach**

Präsident des Karlsruher Institut für Technologie

Ehrenkurator

**Prof. Dr. h. c. mult. Dr. Heinz-Georg Wagner**

Institut für Physikalische Chemie,  
Universität Göttingen

**Prof. Dr. Martin Winterkorn**

Vorstandsvorsitzender der Volkswagen AG,  
Wolfsburg

**Dr.-Ing. Klaus Rudolf Wurster**

Geschäftsführer National Rejectors Inc. GmbH,  
Buxtehude

Präsidium		
Präsident	Vizepräsident	Mitglied des Präsidiums
Prof. Dr. J. Ullrich ☎ 1000	Prof. Dr. M. Peters ☎ 2000	Dr. J. Stenger ☎ 3000

Fachbereich PST Präsidialer Stab
Dr. R. Wynands ☎ 1009

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Dr. Dr. J. Simon ☎ 3005

Abteilung 1 <b>Mechanik und Akustik</b>
Dr. R. Schwartz ☎ 1010

Abteilung 2 <b>Elektrizität</b>
Dr. U. Siegner ☎ 2010

Abteilung 3 <b>Chemische Physik und Explosionsschutz</b>
Prof. Dr. K.-D. Sommer ☎ 3010

Abteilung 4 <b>Optik</b>
Prof. Dr. F. Riehle ☎ 4010

Abteilung 5 <b>Fertigungsmesstechnik</b>
Dr. H. Bosse ☎ 5010

Fachbereich 1.1 Masse	Dr. D. Knopf ☎ 1100
Fachbereich 1.2 Festkörpermechanik	Dr. R. Kümme ☎ 1200
Fachbereich 1.3 Geschwindigkeit	Dr. T. Bruns ☎ 1300
Fachbereich 1.4 Gase	Dr. H. Többen ☎ 1400
Fachbereich 1.5 Flüssigkeiten	Dr. G. Wendt ☎ 1500
Fachbereich 1.6 Schall	Dr. C. Koch ☎ 1600
Fachbereich 1.7 Akustik und Dynamik	Prof. Dr. W. Scholl ☎ 1700

Fachbereich 2.1 Gleichstrom und Niederfrequenz	Dr. J. Melcher ☎ 2100
Fachbereich 2.2 Hochfrequenz und Felder	Dr. T. Schrader ☎ 2200
Fachbereich 2.3 Elektrische Energiesmesstechnik	Dr. M. Kahmann ☎ 2300
Fachbereich 2.4 Quantenelektronik	Dr. A. Zorin ☎ 2400
Fachbereich 2.5 Halbleiterphysik und Magnetismus	Dr. H. W. Schumacher ☎ 2500
Fachbereich 2.6 Elektrische Quantenmetrologie	Dr. F. J. Ahlers ☎ 2600

Fachbereich 3.1 Metrologie in der Chemie	Dr. B. Güttler ☎ 3100
Fachbereich 3.2 Gasanalytik und Zustandsverhalten	Prof. Dr. V. Ebert ☎ 3200
Fachbereich 3.3 Thermophysikalische Größen	Prof. Dr. R. Fernandes ☎ 3300
Fachbereich 3.4 Physikalische Chemie	*Prof. Dr. K.-D. Sommer ☎ 3010
Fachbereich 3.5 Explosionsschutz in der Energietechnik	Dr. U. Klausmeyer ☎ 3500
Fachbereich 3.6 Explosionssgeschützte Sensorik und Messtechnik	Dr. U. Johannsmeyer ☎ 3600
Fachbereich 3.7 Grundlagen des Explosionsschutzes	Dr. M. Beyer ☎ 3700

Fachbereich 4.1 Photometrie und angewandte Radiometrie	Prof. Dr. S. Kück ☎ 4100
Fachbereich 4.2 Bild- und Wellenoptik	Dr. E. Buhr ☎ 4200
Fachbereich 4.3 Quantenoptik und Längeneinheit	Dr. H. Schnatz ☎ 4300
Fachbereich 4.4 Zeit und Frequenz	Dr. E. Peik ☎ 4400

Fachbereich 5.1 Oberflächenmesstechnik	Dr. L. Koenders ☎ 5100
Fachbereich 5.2 Dimensionelle Nanometrologie	Dr. J. Flügge ☎ 5200
Fachbereich 5.3 Koordinatenmesstechnik	Dr. F. Härtig ☎ 5300
Fachbereich 5.4 Interferometrie an Maßverkörperungen	Dr. R. Schödel ☎ 5400
Fachbereich 5.5 Wissenschaftlicher Gerätebau	Prof. Dr. F. Löffler ☎ 5500

Benannte Stelle (Nummer 0102) nach  
 EG-Richtlinien 94/9/EG, 2009/23/EG,  
 2004/22/EG, 2006/42/EG

Zertifizierungsstelle
Dr. H. Stolz im Fachbereich Q.3 ☎ 8320

QUEST Institut an der PTB
Prof. Dr. P. O. Schmidt ☎ 4700

#### Ausschüsse

Personal	A-PE	Prof. Dr. Löffler	☎ 5500
Investitionen	A-IV	Prof. Dr. Peters	☎ 2000
IT-Infrastruktur	A-IT	Dr. Hackel	☎ 8400
Metrologische Dienstleistungen	A-MD	Prof. Dr. Peters	☎ 2000
Internationale Zusammenarbeit	A-IZ	Dr. Stenger	☎ 3000
Qualitätsmanagement	A-QM	Dr. Odin	☎ 8330
Forschungsprogramme	A-FP	Dr. Stenger	☎ 3000



# Organigramm

Stand: 1. Dezember 2013

## Vertreter d. Präsidenten in Berlin

Prof. Dr. H. Koch  
☎ (Ch) 7343

## Qualitätsmanager

Dr. A. Odin  
☎ 8330

## Interne Revision

B. Tafel  
☎ 9131

**Abteilung 6  
Ionisierende Strahlung**

Dr. H. Janßen  
☎ 6010

**Abteilung 7  
Temperatur und  
Synchrotronstrahlung**

Dr. G. Ulm  
☎ (Ch) 7312

**Abteilung 8  
Medizinphysik und  
metrologische  
Informationstechnik**

Prof. Dr. H. Koch  
☎ (Ch) 7343

**Abteilung Q  
Wissenschaftlich-  
technische  
Querschnittsaufgaben**

Dr. P. Ulbig  
☎ 8010

**Abteilung Z  
Verwaltungsdienste**

C. Tampier  
☎ 9010

**Fachbereich 6.1  
Radioaktivität**

Dr. D. Arnold  
☎ 6100

**Fachbereich 7.1  
Radiometrie mit  
Synchrotronstrahlung**

Prof. Dr. M. Richter  
☎ (Ad) 7100

**Fachbereich 8.1  
Medizinische  
Messtechnik**

Dr. B. Ittermann  
☎ (Ch) 7318

**Referat Q.11  
Wissenschaftliche  
Bibliotheken**

Dr. J. Meier  
☎ 8131

**Referat Z.11  
Haushalt und  
Beschaffung**

M. Wasmuß  
☎ 9110

**Fachbereich 6.2  
Dosimetrie für  
Strahlentherapie und  
Röntgendiagnostik**

Dr. U. Ankerhold  
☎ 6200

**Fachbereich 7.2  
Kryophysik und  
Spektrometrie**

Dr. T. Schurig  
☎ (Ch) 7290

**Fachbereich 8.2  
Biosignale**

Dr. L. Trahms  
☎ (Ch) 7213

**Fachbereich Q.3  
Gesetzliches Messwesen  
und Technologietransfer**

Dr. D. Ratschko  
☎ 8300

**Referat Z.12  
Personal**

S. Wiemann  
☎ 9120

**Fachbereich 6.3  
Strahlenschutzdosimetrie**

Dr. P. Ambrosi  
☎ 6300

**Fachbereich 7.3  
Detektorradiometrie und  
Strahlungsthermometrie**

Dr. J. Hollandt  
☎ (Ch) 7369

**Fachbereich 8.3  
Biomedizinische Optik**

Prof. Dr. R. Macdonald  
☎ (Ch) 7542

**Fachbereich Q.4  
Informationstechnologie**

Dr. S. Hackel  
☎ 8400

**Referat Z.13  
Justizariat**

M. Gahrens  
☎ 9130

**Fachbereich 6.4  
Ionen- und  
Neutronenstrahlung**

Dr. F. Wissmann  
Dr. H. Schuhmacher  
☎ 6400 / 6500

**Fachbereich 7.4  
Temperatur**

Dr. J. Fischer  
☎ (Ch) 7473

**Fachbereich 8.4  
Mathematische  
Modellierung und  
Datenanalyse**

Prof. Dr. M. Bär  
☎ (Ch) 7687

**Fachbereich Q.5  
Technische  
Zusammenarbeit**

Dr. M. Stoldt  
☎ 8200

**Referat Z.14  
Organisation und  
Controlling**

Dr. J. Jaspers  
☎ 9140

**Fachbereich 6.5  
Kernphysikalische  
Anwendungen**

\*Dr. H. Janßen  
☎ 6010

**Fachbereich 7.5  
Wärme und Vakuum**

Dr. T. Lederer  
☎ (Ch) 7230

**Fachbereich 8.5  
Metrologische  
Informationstechnik**

Prof. Dr. D. Richter  
Dr. F. Thiel  
☎ (Ch) 7479 / 7529

**Gruppe Q.6  
Technische Infrastruktur**

\*Dr. P. Ulbig  
☎ 8010

**Referat Z.15  
Verwaltung Berlin**

A. Lubinus  
☎ (Ch) 7449

**Fachbereich 6.6  
Grundlagen der  
Dosimetrie**

Dr. H. Rabus  
☎ 6600

**Fachbereich IB.T  
Technisch-wissensch.  
Infrastruktur Berlin**

Dr. F. Melchert  
☎ (Ch) 7446

**Referat Q.61  
Arbeitsschutz- und  
Sicherheitsmanagement**

M. Frühauf  
☎ 9170

**Referat Z.16  
Innerer Dienst**

A. Grote  
☎ 9160

**Referat 6.71  
Betrieblicher  
Strahlenschutz**

Dr. R. Simmer  
☎ 6710

**Referat Q.62  
Technischer Dienst  
Braunschweig**

U. Deventer  
☎ 9210

**Referat Z.17  
Ausbildung**

P. J. Dickers  
☎ 9240

**Referat Z.18  
Administrative IT-  
Anwendungen**

M. Battikh  
R. Ohl  
☎ 3597 / 8430

## Gesamtpersonalrat

S. Brandes ☎ 1098

**Örtlicher Personalrat Braunschweig** ☎ 1092

W. Krien ☎ 1092

**Örtlicher Personalrat Berlin** ☎ (Ch) 7337

R. Thomas ☎ (Ch) 7337

**Gleichstellungsbeauftragte** ☎ 9133

B. Behrens ☎ 9133

**Gesamtvertretung der Schwerbehinderten** ☎ 1097

R. Lütge ☎ 1097

**Vertretung der Schwerbehinderten Braunschweig** ☎ 1097

R. Lütge ☎ 1097

**Vertretung der Schwerbehinderten Berlin** ☎ (Ch) 7964

C. Aßmann ☎ (Ch) 7964

## Zeichenerklärung

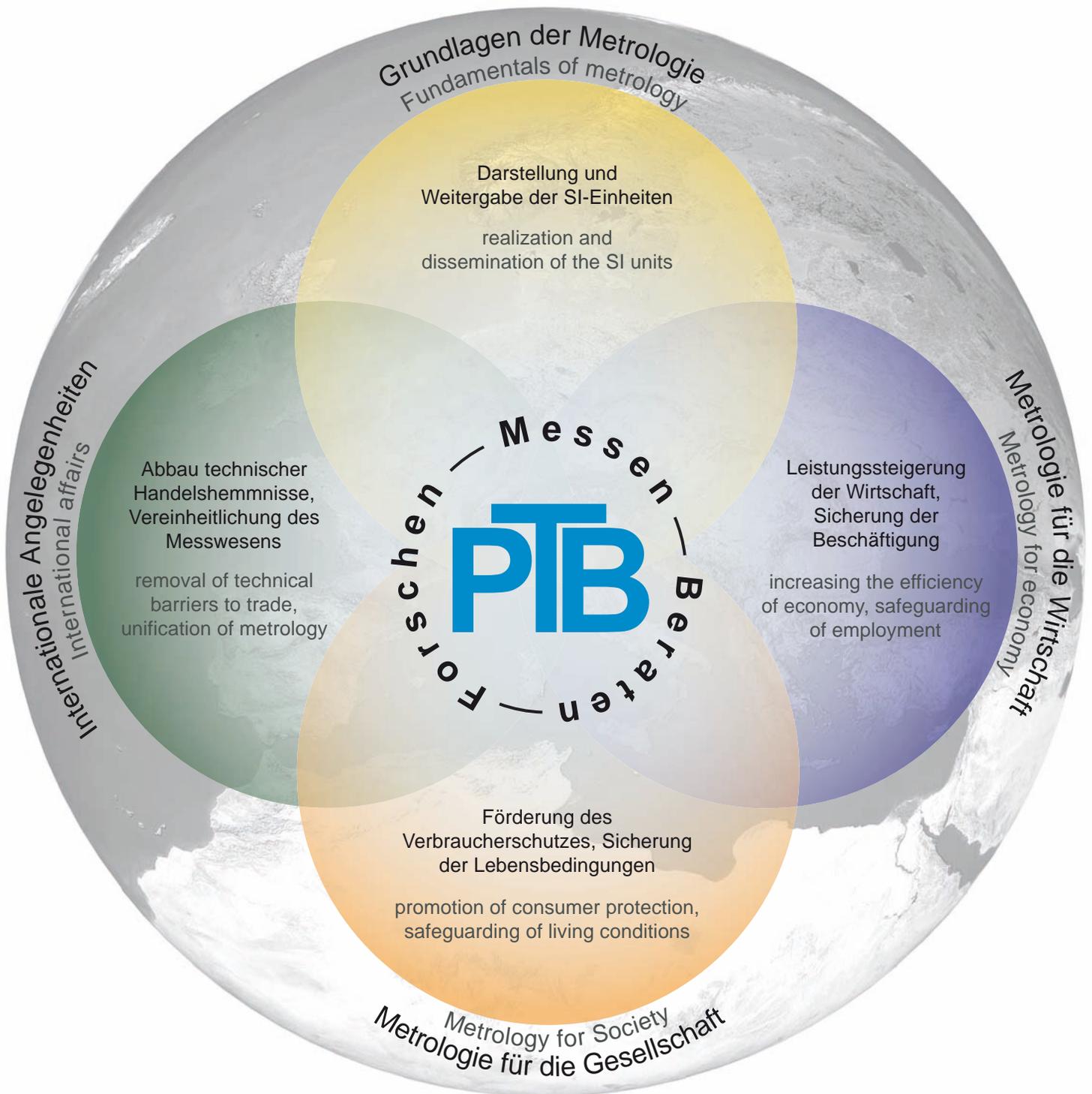
☎(0531) 592-0 Braunschweig/Durchwahl 592 ...

☎(030) 3481-0 Berlin Charlottenburg (Ch)/Durchwahl 3481 ...

☎(030) 3481-0 Berlin Adlershof (Ad)/Durchwahl 3481 ...

\*wahrgenommen durch

# Arbeitsgebiete und Ziele



### **Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) – das nationale Metrologie-Institut mit wissenschaftlich-technischen Dienstleistungsaufgaben**

Für einen modernen Industriestaat ist eine leistungsfähige Infrastruktur für das Messen, Normen, Prüfen und für die Qualitätssicherung eine Grundvoraussetzung. Nur eine optimierte messtechnische Infrastruktur ermöglicht den richtigen Einsatz der Technik zum Wohle des Menschen, die effektive und umweltschonende Nutzung von Energie und Rohstoffen sowie den Austausch von Gütern, auch über Ländergrenzen hinweg. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig und Berlin, die zum Dienstbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gehört, ist in der Bundesrepublik Deutschland mit dieser Aufgabe betraut.

Der Existenz von Bundesanstalten liegt ein staatlicher Auftrag zugrunde, festgelegt in Gesetzen und Verordnungen. Im Falle der PTB ist dies ein Auftrag von Verfassungsrang, abgeleitet aus der originären Verantwortung des Staates für die Einheitlichkeit des Messwesens sowie für die Sicherheit und den Schutz des Bürgers. Dabei geht es auch um das Vertrauen, das jeder Einzelne, ob als Verbraucher, Behörde oder Firma, in die Zuverlässigkeit und Unparteilichkeit von Messungen haben muss. Der spezifische staatliche Auftrag für die PTB ist es, eine international akzeptierte leistungsfähige messtechnische Infrastruktur für Gesellschaft, Handel und Wirtschaft gleichermaßen bereitzustellen. Forschung und Technologieentwicklung dienen dazu, diesen Auftrag verantwortungsvoll und kompetent auszuführen.

Der Anteil an Forschung und Entwicklung über alle vier Arbeitsgebiete beträgt rund zwei Drittel aller PTB-Aktivitäten.

### **Grundlagen der Metrologie**

Der Bereich „Grundlagen der Metrologie“ umfasst die in der Satzung verankerten Arbeiten zur Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten und der gesetzlichen Zeit. Hierzu gehören insbesondere die Entwicklung und Bereitstellung von Primärnormalen und Normalmesseinrichtungen und der gegebenenfalls für die Weitergabe der Einheiten benötigten Sekundär- und Transfornormale. Mission ist „die Schaffung des Fundaments für das nationale Messwesen, das den heutigen und für die Zukunft absehbaren Anforderungen genügt“.

Eine besondere Herausforderung stellen die Arbeiten zur Rückführung von SI-Einheiten auf Fundamentalkonstanten dar, wie dies für Sekunde, Meter, Volt und Ohm bereits gelungen ist, da man – zumindest nach unserem heutigen Verständnis der Physik – dann von einer von Ort und Zeit unabhängigen Realisierung der jeweiligen Einheit ausgehen kann. Durch den Beschluss des Comité International des Poids et Mesures (CIPM), vorbereitende Maßnahmen zur Neudefinition der Einheiten Ampere, Kelvin, Kilogramm und Mol auf der Basis von Fundamentalkonstanten einzuleiten, haben diese Arbeiten zusätzlich an Aktualität und Bedeutung gewonnen. Aber auch bei der Darstellung von Einheiten auf der Basis klassischer Prinzipien, z. B. für die dimensionelle Messtechnik, steigen die Anforderungen an die tolerierbaren Unsicherheiten stetig, sodass Technologien verbessert bzw. neuentwickelt und genutzt werden müssen. Zunehmende Bedeutung gewinnt die Rückführung von Messungen in der analytischen und speziell klinischen Chemie auf international anerkannte Normale oder Normalmesseinrichtungen, die für ausgewählte organische und anorganische Analyte in der PTB und ihren Kooperationspartnern (BAM, UBA, DGKL) entwickelt bzw. betrieben werden. Von besonderer gesellschaftlicher Bedeutung ist die Entwicklung von Normalen und Normalmesseinrichtungen für die medizinische Diagnostik und Therapiekontrolle, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung, die Ultraschall-Diagnostik oder optische, bioelektrische, biomagnetische und NMR-Diagnoseverfahren.

Ganz offensichtlich ist der Anteil an Forschung und Entwicklung in dem Bereich „Grundlagen der Metrologie“ besonders hoch, weit gespannt und deckt wesentliche Bereiche der modernen Natur- und Ingenieurwissenschaften ab. Die Ergebnisse bilden nicht nur die Voraussetzung für die Entwicklung und Realisierung genauer Normale, sondern liefern

auch – oft in Kooperation mit universitären und außeruniversitären Partnern – wesentliche Erkenntnisse für die Natur- und Ingenieurwissenschaften im Allgemeinen.

### **Metrologie für die Wirtschaft**

Für eine exportorientierte Volkswirtschaft wie die der Bundesrepublik Deutschland ist eine hochentwickelte metrologische Infrastruktur sowie die Verfügbarkeit metrologischen Know-hows auf höchstem Niveau zur Unterstützung der Entwicklung neuer Technologien eine unabdingbare Voraussetzung.

Die PTB hat seit ihrer Gründung im Jahre 1887 zum Nutzen der deutschen Wirtschaft nicht nur die Basiseinheiten durch metrologische Grundlagenforschung dargestellt, sondern durch technische Entwicklungen von Normalen, Normalmessgeräten und erprobten Messverfahren Grundlagen für genaue und zuverlässige Messungen und Prüfungen in Industrie und Handel geschaffen. Die Durchdringung der Produktionsprozesse mit einer Messtechnik, die allen internationalen Ansprüchen gerecht wird, ist eine entscheidende Voraussetzung für zuverlässig funktionierende Qualitätsmanagement-Systeme in der Wirtschaft. Dabei ist es unverzichtbar, alle Messergebnisse auf das SI zurückzuführen.

Die Weitergabe der Einheiten wird durch die Akkreditierungen des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD; seit 1. 1. 2010 Teil der DAkkS) größtenteils auf die Ebene der industriellen Messtechnik verlagert. Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden durch die Akkreditierungsstelle kompetent überwacht und in nationalen und internationalen Gremien vertreten.

Wissenschaft und Wirtschaft enger zu verzahnen ist eine politische Forderung, die von der PTB ernst genommen wird. Bei allen Forschungs- und Entwicklungsergebnissen prüft die PTB daher, ob diese auch als Schutzrechte, Patente bzw. Gebrauchsmuster oder durch Know-how-Verträge für eine Vermarktung durch Innovationen in Anspruch genommen werden können. Eine wichtige Rolle im Know-how-Transfer von der PTB in die deutsche Wirtschaft übernehmen Seminare und Fachtagungen, die wissenschaftlich-technische Entwicklungen wichtiger Arbeitsgebiete der PTB zum Thema haben. Speziell auf die Bedürfnisse von kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) ist das Mittelstandsforum der PTB ausgerichtet. Es stellt eine Internet-Plattform dar, welche die Dienstleistungsangebote der PTB

einschließlich der Patentdatenbank in übersichtlicher Form aufzeigt und insbesondere auch Kunden, die mit der Struktur der PTB nicht vertraut sind, Navigationshilfen anbietet, die zu den richtigen Informationen und Ansprechpartnern führen.

### **Metrologie für die Gesellschaft**

In weiten Bereichen des täglichen Lebens besteht ein besonderes öffentliches Interesse an richtigen Messergebnissen und zuverlässigen Messeinrichtungen. Die Metrologie für die Gesellschaft umfasst daher überwiegend Aufgaben, die gesetzlich geregelt sind. In einer Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen sind der PTB verschiedene Tätigkeiten zugewiesen; in vielen dieser Rechtsvorschriften wird sie als einzige Stelle genannt. Hierin liegt eine besondere Verantwortung. Es ist Aufgabe der PTB, „Messtechnik und -verfahren zum angemessenen Schutz der Verbraucher im geschäftlichen und amtlichen Verkehr, der arbeitenden Bevölkerung im beruflichen Umfeld, zum Erhalt und der Wiederherstellung der Gesundheit, für die persönliche und industrielle Sicherheit sowie zum Schutz der Natur und Umwelt“ zur Verfügung zu stellen und einzusetzen.

Ein Schwerpunkt in diesem Bereich ist die Bauartzulassung bzw. Baumusterprüfung von Messgeräten im Rahmen nationaler oder europäischer Rechtsvorschriften, zum Beispiel auf den Gebieten Energiemesstechnik für elektrische Energie, Gas und Wasser (Wärme, Kälte), Sicherheit im Straßenverkehr (Geschwindigkeitsüberwachung, Atemalkohol), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und Umweltmesstechnik (Absolutmessungen in der Schadstoff- und Spurenanalyse, Lärmschutz etc.). Die meisten Bauartzulassungen erfüllt die PTB auf der Grundlage des Eichgesetzes. Bedingt durch die Umsetzung der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) werden das Eichgesetz und die Eichordnung novelliert. Die PTB ist inzwischen als Benannte Stelle nach europäischem Recht anerkannt, sodass den Kunden aus der Industrie die von der MID geforderten Konformitätsbewertungsverfahren angeboten werden können.

Die PTB ist gemäß Medizinproduktegesetz zuständig für die Sicherstellung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Medizin. So entwickelt die PTB neue oder verbessert bereits existierende Messverfahren für Diagnostik und Therapiekontrolle. Zum anderen leistet die PTB entscheidende Beiträge durch Entwicklung von Normalen und Normalmeseinrichtungen, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung oder für medizinische

Geräte mit Messfunktion, sowie durch Arbeiten zur Rückführung von analytischen Messungen in der klinischen Chemie auf die SI-Einheiten bzw. Normalmessverfahren.

In Absprache und Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ist die PTB auf den wirtschaftlich und vor allem gesellschaftlich wichtigen Gebieten der physikalischen Sicherheitstechnik und des Explosionsschutzes elektrischer Betriebsmittel tätig. Aufgrund ihrer Kompetenz fällt ihr dabei eine internationale Referenzfunktion zu. Gleiches gilt für die Arbeiten auf dem Gebiet des Strahlenschutzes.

### **Internationale Angelegenheiten**

Mit der Gründung der Meterkonvention im Jahre 1875 wurde auf höchster staatlicher Ebene manifestiert, dass Metrologie eine internationale Angelegenheit ist. Durch die zunehmende Globalisierung von Wirtschaft und Handel hat diese Aufgabe in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Im Geschäftsbereich „Internationale Angelegenheiten“ ist es Aufgabe der PTB, „zur internationalen Einheitlichkeit des Messwesens und damit zum Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse beizutragen“. Hierzu dienen Kooperationen mit anderen nationalen Metrologieinstituten, maßgebliche Mitarbeit in den internationalen Gremien und technisch-ökonomische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern.

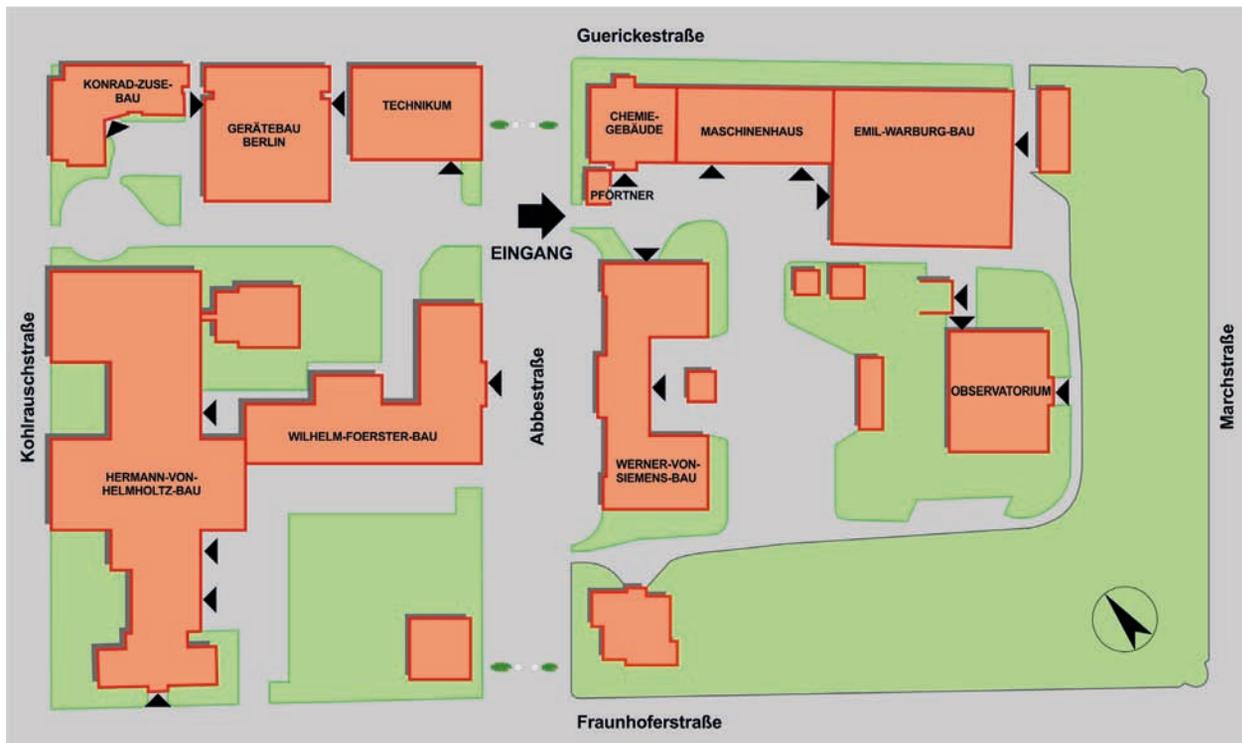
Wesentliches Element der Kooperation mit Partnerinstituten sind internationale „Key Comparisons“ von Normalen und Normalmesseinrichtungen und sich daraus ableitende F&E-Arbeiten. Im Rahmen der internationalen Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Messergebnissen und Zertifikaten der nationalen Metrologieinstitute und der akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien kommt diesen Vergleichen besondere Bedeutung zu.

Die Anforderungen an die Metrologie werden in Zukunft sowohl vom Umfang als auch von der Komplexität her stetig wachsen, sodass ein einzelnes Institut nicht sämtlichen Ansprüchen auf Dauer genügen kann. Koordination und Kooperation bei F&E und Dienstleistungen sind daher unumgänglich. Die rechtsfähige europäische Metrologieorganisation EURAMET stellt hier die erforderlichen Strukturen zur Durchführung eines europäischen Metrologieforschungsprogramms zur Verfügung.

Neben ihrem europäischen Engagement arbeitet die PTB ebenfalls maßgeblich in allen internationalen Metrologieorganisationen mit, zu einem erheblichen Teil in leitender Funktion. Außerdem leistet die PTB einen wesentlichen Beitrag zur internationalen Normung durch Mitarbeit in Gremien von ISO, IEC, CEN, CENELEC. Die weltweite Angleichung von Anforderungen und Prüfvorschriften im gesetzlichen Messwesen dient dem Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse und damit der exportorientierten deutschen Messgeräteindustrie. Mit diesen Zielen arbeitet die PTB aktiv in OIML und WELMEC mit.

Einen erheblichen Umfang nimmt die Technische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern ein. Die PTB gibt ihre Erfahrungen weiter und leistet aktive Hilfe beim Aufbau der technischen Infrastruktur für die Metrologie sowie für das Normen-, Prüf- und Qualitätswesen einschließlich der Akkreditierung und der Zertifizierung. Die finanziellen Mittel werden überwiegend vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) sowie weiteren nationalen und internationalen Gebern, wie der EU und der Weltbank, zur Verfügung gestellt.

# Geländeplan Berlin-Charlottenburg



## Gebäude in Braunschweig

### Gebäude (Building):

Abbe-Bau (V)  
 Annahme und Versand  
 (Delivery and Shipment) (A)  
 Bessel-Bau (M)  
 Bibliothek (Library) (K)  
 Bothe-Bau (S)  
 Bereitstellungslager (P)  
 Bunsen-Bau (Q)  
 Betriebswerkstätten  
 (Workshops) (T)  
 Chadwick-Bau (G)  
 Elster-Geitel-Bau (S)  
 Einstein-Bau (C)  
 Explosionsprüfstand  
 (Explosion test rig) (Q)  
 Fahrbereitschaft  
 (Driver pool) (R)  
 Gauss-Bau (V)  
 Gästehaus  
 (Guest House) (V)  
 Geiger-Bau (S)  
 Glocker-Bau (T)  
 Giebe-Bau (L)  
 Gumlich-Haus (P)  
 Hahn-Bau (L)  
 Heisenberg-Bau (C)  
 Helmholtz-Bau I (K)  
 Helmholtz-Bau II (K)

Hertz-Bau (K)  
 Hörsaal (Auditorium) (C)  
 Kasino (K)  
 Kids & Co-Bau  
 (Kita and Wissensforscher) (L)  
 Kohlrusch-Bau (C)  
 Kopfermann-Bau (U)  
 v.-Laue-Bau (V)  
 Leibniz-Bau (U)  
 Meissner-Bau (K)  
 Meitner-Bau Gerätebau (Q)  
 Meitner-Bau Laborgebäude (Q)  
 Meitner-Bau Galvanik (Q)  
 Meitner-Bau Materiallager (Q)  
 Schlichting-Bau (R)  
 Nernst-Bau (R)  
 Ohm-Bau (C)  
 Paschen-Bau (L)  
 Personalrat (Staff Council) (E)  
 Planck-Bau (H)  
 Prandtl-Bau (R)  
 Röntgen-Bau (S)  
 Reinraumzentrum  
 (Clean Room Centre) (C)  
 Raumzellen-Bau 4 (RZB 4) (Q)  
 Raumzellen-Bau 6 (RZB 6) (S)  
 Schering-Bau (R)  
 Seminarzentrum  
 (Conference Centre) (C)  
 Sicherheitstechnik  
 (Safety Technology) (F)

Vieweg-Bau (B)  
 Weber-Bau (R)  
 Werkfeuerwehr (Fire Brigade) (R)  
 Wohnhaus Ost  
 (Residential Building East) (E)  
 Wohnhaus West  
 (Residential Building West) (A)  
 Willy-Wien-Turm (R)  
 Zentralgebäude  
 (Central Building) (K)

### Einrichtungen / Institute auf dem Gelände (External Facilities and Institutions):

- Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS), Vieweg-Bau (B)
- EURAMET e.V., Zentralgebäude (Central Building) (K)
- QUEST@PTB, v.-Laue-Bau (V)
- Underwriters Laboratories (UL), Raumzellen-Bau 4 (Q)
- VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH, Weber-Bau (R)



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie**

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

#### **Anschriften der PTB**

Standort Braunschweig:  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

Standort Berlin-Charlottenburg:  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Abbestraße 2–12  
10587 Berlin

E-Mail: [info@ptb.de](mailto:info@ptb.de)  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)

#### **Impressum**

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin  
Braunschweig, April 2014  
Satz, Gestaltung: PTB, Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Übersetzung: PTB-Sprachendienst  
Druck: westermann druck GmbH, Braunschweig  
Nachdruck mit Quellenangabe gestattet.