



JAHRESBERICHT

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT, BRAUNSCHWEIG UND BERLIN

JAHRESBERICHT / ANNUAL REPORT

2011



Physikalisch- Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin

Jahresbericht 2011



Vorwort

Im vergangenen Jahr konnte das Nachbesetzungsverfahren für das Amt des PTB-Präsidenten mit einem glücklichen Ende abgeschlossen werden. Gewisse Turbulenzen hatten dazu geführt, dass ich meine Dienstzeit bis zum Ende des Jahres 2011 verlängert habe. Ich habe das gerne getan – hat mir doch die Arbeit in der PTB über nun fast 17 Jahre bis zum letzten Tag (meistens) großen Spaß gemacht. Ab dem 1. Januar 2012 übernimmt Professor Joachim Ullrich das Amt, der vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg zur PTB wechselt. Die PTB freut sich auf ihren neuen Präsidenten und ich wünsche ihm in seiner neuen Aufgabe viel Erfolg und Freude.

Aber nicht alles ist zu einem glücklichen Ende gekommen: So hat uns die eigentlich unerwartete Fortschreibung des Abbaus der Planstellen im letzten Jahr fast jeden Gestaltungsspielraum genommen, neue Herausforderungen, z. B. im Energie-, Umwelt- oder Gesundheitsbereich, aufzugreifen. Unsere strategischen Planungen mussten sich größtenteils auf das Beenden von Aufgaben beschränken, wobei sich nach nunmehr fast 20 Jahren andauernden Stellenabbaus – wie schon in den letzten Jahren – schmerzliche Einschnitte auch in das Kerngeschäft nicht mehr vermeiden lassen, mit entsprechend unerfreulichen Reaktionen unserer Kunden. Daran ändert auch die über die Jahre erfreuliche Zunahme der aus Drittmitteln finanzierten und befristet beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter nichts; für Kernaufgaben können und dürfen diese nicht eingesetzt werden. Hinsichtlich der eingeworbenen Drittmittel ist das von der Europäischen Union geförderte Metrologie-Forschungsprogramm auch aus strategischen Gründen für uns von besonderer Bedeutung.

Jenseits dessen jedoch befördert die inhaltliche Arbeit der PTB – zum Glück – weiterhin ihre nun bald 125-jährige Erfolgsgeschichte. Die Ergebnisse, die in dem jetzt vorliegenden Jahresbericht dargestellt werden, sind für mich erneut Anlass zu Freude und Stolz. An allererster Stelle geht mein Dank dafür an alle „PTBisten“. Aber auch „unserem“ Ministerium, dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, schulde ich Dank für die solide Finanzierung und für die Unterstützung auf politischer

Ebene. Ebenso geht mein Dank an alle jetzt nicht einzeln aufgeführten Drittmittelgeber.

Unsere drei großen Projekte zur Neudefinition der Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems („Avogadro“, „Boltzmann“, „Ampere und metrologisches Dreieck“) haben große Fortschritte gemacht und werden einen ganz wesentlichen Beitrag zur endgültigen neuen Festlegung der Basiseinheiten leisten. Aber auch in vielen anderen Bereichen sind in der metrologischen Forschung und Entwicklung große Fortschritte erzielt worden. Beispielhaft möchte ich die Konstruktion und Verwendung eines kryogenen, einkristallinen Silizium-Resonators zur Frequenzstabilisierung von Lasern erwähnen, die erstmalige Realisierung eines Quantennormals für die elektrische Spannung auf der Basis eines Halbleiters (anstatt eines Supraleiters), die aufregenden NMR-Experimente an Wasser in extrem kleinen Magnetfeldern bis herab zu $0,1 \mu\text{T}$ (!) oder – last but not least – die bahnbrechende Entwicklung neuer mathematischer und statistischer Methoden für die Analyse dynamischer Messungen.

Aus dem letzten Jahr hervorzuheben sind auch die Veränderungen im gesetzlichen Messwesen durch die Umsetzung der Europäischen Messgeräte-richtlinie (MID). Die daraus resultierenden Strukturänderungen sind weitestgehend problemlos umgesetzt und etabliert. Dazu hat auch die über viele Jahre gewachsene, vertrauensvolle Zusammenarbeit mit den Messgeräte-Herstellern einerseits und den Eichbehörden der Länder andererseits maßgeblich beigetragen. Auch dafür bedanke ich mich.

Da ich mich in meinem Vorwort zum letztjährigen Jahresbericht ja bereits verabschiedet habe, belasse ich es an dieser Stelle dabei, der PTB und all ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern alles Gute und auch für die nächsten 125 Jahre viel Erfolg zu wünschen – im Sinne unserer Mission: „Fortschritt und Zuverlässigkeit im Messwesen für Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft“.



Foreword

Last year, the search for a successor to the office of PTB president was successfully concluded. Certain turbulences had led to my extending my term as president until the end of 2011. This I was happy to do, as the work at PTB has brought me (mostly) great pleasure for over 17 years – to the last day. Starting from 1 January 2012, Professor Joachim Ullrich is assuming this office. He is coming to PTB from the Max-Planck-Institut für Kernphysik (Max Planck Institute for Nuclear Physics) in Heidelberg. PTB welcomes its new president and I wish him much joy and success in his new office.

However, not everything has come to a good conclusion: Thus the actually unexpected continuation of the reduction of permanent posts last year has taken away nearly every leeway to take on new challenges, e.g. in the fields of energy, environment or health. Our strategic planning has had to be largely restricted to concluding tasks, whereby after almost 20 years of post reductions – as has already been the case in recent years – it has no longer been possible to avoid painful cuts also in the core service, with correspondingly unpleasant reactions from our customers. This situation has not at all been remedied by the welcome increase in the number of staff members with short-term contracts funded by third parties; they could not and must not be employed with core tasks. With regard to the funds raised through third parties, the Metrology Research Programme funded by the European Union is of special importance to us for strategic reasons.

Beyond that, however, the work content of PTB – fortunately – continues to promote its now approaching 125-year-old success story. The results presented in this Annual Report again fill me with pride and joy. Above all, my thanks go to all “PTBists”. But thanks are also due to “our” ministry, the Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Federal Ministry for Economics and Technology) for its solid funding and for its support at the political level. Likewise, my thanks go to all third-party donors not listed individually here.

Our three largest projects on the redefinition of the base units of the International System of Units (“Avogadro”, “Boltzmann”, “Ampere and the Metrology Triangle”) have made great progress and will make quite a substantial contribution to the final redetermination of the base units. But also in many other fields, great progress has been made in metrological research and development. By way of example, I would like to mention the design and utilization of a cryogenic, single-crystal silicon resonator for the frequency stabilization of lasers, the first-time-ever realization of a quantum standard for electrical voltage on the basis of a semi-conductor (instead of a superconductor), the exciting NMR experiments in water in extremely small magnetic fields down to 0.1 μT (!) and – last but not least – the groundbreaking development of new mathematical and statistical methods for the analysis of dynamic measurements.

Also outstanding last year are the changes in legal metrology through the implementation of the European Measuring Instruments Directive (MID). It was possible to implement and establish the resulting structural changes largely without problem. The close cooperation –

increasing in the course of many years – with the manufacturers of measuring instruments, on the one hand, and the verification authorities of the federal states, on the other hand, has contributed considerably here. I am thankful for this too.

Since I have already said my good-byes in last year’s annual report, at this point I will restrict myself merely to expressing my best wishes to PTB and its employees and to wish them much success also for the next 125 years – true to our mission: “Progress and reliability in metrology for science, society, and the economy”.



Der gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2011. Den kompletten Jahresbericht mit Nachrichten und speziellen Listen finden Sie auf den Internetseiten der PTB (unter www.ptb.de im Bereich „Publikationen“).

Außerdem führen wir Sie von dort zur Datenbank Publica, in der bibliographische 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
- Kuratorium
- Organigramm (Stand: Dezember 2011)
- Zahlen und Fakten
 - Aktuelle Statistiken
- Anhang
 - Arbeitsgebiete und Ziele
 - Seminare/Workshops/Konferenzen
 - Kolloquien
 - Zulassungen des Eichwesens
 - Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien
 - Externe Lehrtätigkeit
 - Promotionen
 - Projekte der Technischen Zusammenarbeit
- Datenbank Publica
 - Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Inhaltsverzeichnis

Vorwort • Foreword

Nachrichten des Jahres • News of the year 6

Fachabteilungen • Scientific Divisions 7

Theoretische Physik • Theoretical Physics 14

Kuratorium • Advisory Board 16

Präsidium • Presidential Board 18

Qualitätsmanagement • Quality Management 20

Gesetzliches Messwesen • Legal Metrology 22

Technische Zusammenarbeit • Technical Cooperation 25

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit • Press and Information Office 28

Promotionen • Doctorates 29

Zahlen und Fakten • Figures and facts 30

Berichte der Abteilungen

Mechanik und Akustik 39

Elektrizität 55

Chemische Physik und Explosionsschutz 69

Optik 83

Fertigungsmesstechnik 97

Ionisierende Strahlung 107

Temperatur und Synchrotronstrahlung 119

Medizinphysik und metrologische Informationstechnik 135

Anhang

Kuratorium 153

Organigramm 154

Arbeitsgebiete 156

Geländepläne 160

Nachrichten des Jahres • News of the year

Wechsel an der Spitze der PTB

Nach über 16-jähriger Amtszeit ging Prof. Dr. Ernst O. Göbel zum Ende des Jahres 2011 in den Ruhestand. Ernst Göbel forcierte in seiner Amtszeit die Einbindung der PTB in das europäische und das internationale Umfeld. Er engagierte sich kontinuierlich für die internationale Meterkonvention, deren Präsident er zudem von 2004 bis 2010 war. Die Gründung von EURAMET e. V. und die Aufstellung und Umsetzung eines gemeinsamen europäischen Metrologieforschungsprogramms (EMRP) waren wichtige Beiträge zu einer vertieften Kooperation und Arbeitsteilung der europäischen Metrologieinstitute. Ernst Göbels Nachfolger im Amt des PTB-Präsidenten wurde der Physiker Prof. Dr. Joachim Ullrich, der vom Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK), Heidelberg, zur PTB wechselte. Joachim Ullrich, der zuletzt am MPIK die Abteilung „Experimentelle Mehrteilchen-Quantendynamik“ leitete, ist der 14. Präsident in der 125-jährigen Geschichte der PTB. Er erhielt seine offizielle Ernennungsurkunde zum PTB-Präsidenten am 19. Dezember 2011 im Rahmen einer turnusmäßig stattfindenden Direktorenkonferenz der PTB, bei der er als Gast teilnahm. Überreicht wurde Joachim Ullrich die Urkunde von Dr. Sven Halldorn, dem Leiter der Abteilung „Technologiepolitik“ im Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Mit Joachim Ullrich setzt die PTB die seit der Zeit ihres Gründungspräsidenten Hermann von Helmholtz gepflegte Tradition fort, an ihre Spitze einen namhaften Wissenschaftler zu berufen.

Ernst Göbel hinterlässt seinem Nachfolger eine PTB, die international bestens aufgestellt und für die anstehenden Aufgaben gut gerüstet ist.

Der neue und der scheidende Präsident: Prof. Dr. Joachim Ullrich (PTB-Präsident ab 2012) und Prof. Dr. Ernst O. Göbel (PTB-Präsident von 1995 bis 2011)



Change at the head of PTB

After a term of office of 16 years, Prof. Dr. Ernst O. Göbel retired at the end of 2011. In his term of office, Ernst Göbel pushed the integration of PTB in the European and the international environment. He was continually involved in the international Metre Convention, whose president he also was from 2004 to 2010. The foundation of EURAMET e. V. and the establishment and realization of a mutual European Metrology Research Programme (EMRP) were important contributions to an intensified cooperation and division of labour of the European metrology institutes. Ernst Göbel's successor to the office of PTB president is the physicist Prof. Dr. Joachim Ullrich, who came to PTB from the Max Planck Institute for Nuclear Physics (MPIK) in Heidelberg. Joachim Ullrich, who at MPIK most recently headed the Department "Experimental Few-Particle Quantum Dynamics", is the 14th president in the 125-year history of PTB. He received his official certificate of appointment to the office of PTB president on 19 December 2011 within the scope of a regularly held PTB Directors Conference, which he attended as a guest. The certificate was presented to Joachim Ullrich by Dr. Sven Halldorn, the head of the "Technology Policy" Department at the Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Federal Ministry of Economics

and Technology) (BMWi). With Joachim Ullrich, PTB is carrying on a tradition which started during the time of its founding president Hermann von Helmholtz: that of appointing a renowned scientist at its head.

Ernst Göbel is leaving to his successor a PTB which is in the best position internationally and is well equipped for the present tasks.

The new and the departing presidents: Prof. Dr. Joachim Ullrich (PTB President from 2012) and Prof. Dr. Ernst O. Göbel (PTB President from 1995 to 2011)

Halbleiter-Quanten-Spannungsquelle

In der PTB konnte erstmals mit einer integrierten Halbleiterschaltung eine quantisierte Spannung erzeugt werden.

Der Widerstand wird in der Metrologie schon länger mithilfe von speziellen Halbleitern reproduziert, wobei aufgrund des Quanten-Hall-Effekts der Hall-Widerstand im Magnetfeld quantisiert ist und sein Wert allein durch die beiden Naturkonstanten h (Planck'sches Wirkungsquantum) und e (Elementarladung) bestimmt wird. Quantisierte Spannungen ließen sich dagegen bisher nur – unter Nutzung des Josephson-Effektes – mit Hilfe von supraleitenden Schaltungen erzeugen

Jetzt ist es in der PTB gelungen, Einzelelektronenpumpen, also halbleiterbasierte quantisierte Stromquellen, mit einem Quanten-Hall-Widerstand in einer integrierten Halbleiter-Quantenschaltung zu kombinieren und damit eine quantisierte Spannung zu erzeugen. Dazu wurden beide Bauteile in einem gemeinsamen Herstellungsverfahren aus einem Halbleiter-Schichtsystem auf einem Chip gefertigt. Zum Betrieb des Bauelements sind nur zwei Gleichspannungen sowie eine Hochfrequenz-Wechselspannung (AC) zur Kontrolle der Einzelelektronenpumpe nötig.

Die neuartige Halbleiter-Quanten-Spannungsquelle zeigt eine robuste Quantisierung der Ausgangsspannung bis zu Frequenzen von einigen GHz, wodurch Ausgangsspannungen bis zu $10\ \mu\text{V}$ erzeugt werden konnten. Durch Parallelschaltung mehrerer Einzelelektronenpumpen und Serienschaltung mehrerer Quanten-Hall-Widerstände auf dem Halbleiterchip kann die Ausgangsspannung im Prinzip um bis zu einem Faktor 1000 erhöht werden, was sich z. B. für grundlegende metrologische Experimente nutzen lässt.

Prinzipalskizze der Halbleiter-Quanten-Spannungsquelle.

Schematic diagram of the semiconductor quantum voltage source.

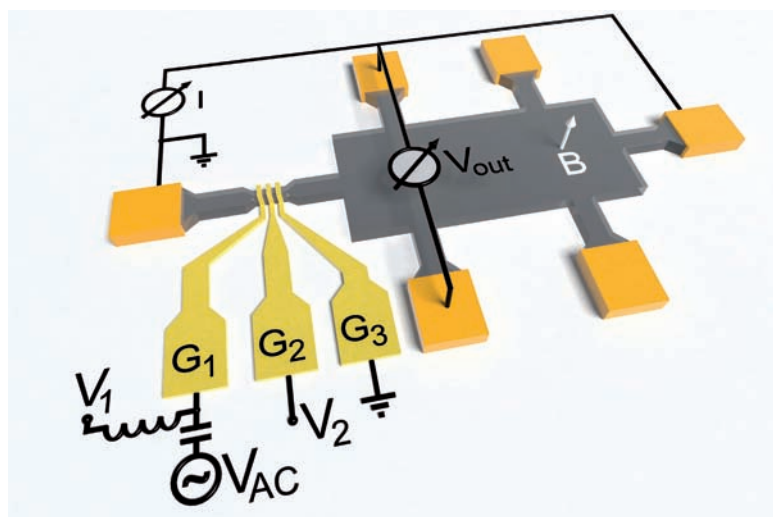
Semiconductor Quantum Voltage Source

At PTB, it has been possible for the first time to generate a quantized voltage with an integrated semiconductor circuit.

In metrology, resistance has, for a long time, been reproduced with the aid of special semiconductors, whereby the Hall resistance is – due to the quantum Hall effect – quantized in the magnetic field and its value is determined solely by the two fundamental constants h (Planck's constant) and e (elementary charge). Quantized voltages could, however, so far be generated only with the aid of superconducting circuits, making use of the Josephson effect.

Now PTB has succeeded in combining single-electron pumps – i.e. semiconductor-based current sources – with a quantum Hall resistor in an integrated semiconductor quantum circuit and in thus generating a quantized voltage. For this purpose, the two components were manufactured in a joint production process from a semiconductor layer system on a chip. To operate the component, only two DC voltages and a high-frequency AC voltage to control the single-electron pump are required.

The novel semiconductor quantum voltage source exhibits a robust quantization of the output voltage up to frequencies of a few GHz, which allowed output voltages of up to $10\ \mu\text{V}$ to be generated. By connecting several single-electron pumps in parallel and several quantum Hall resistors in series on the semiconductor chip, the output voltage can – in principle – be increased by up to a factor of 1000. This can, for example, be used for fundamental metrological experiments.



Optisches Primärverfahren für die Chemie bei internationaler Vergleichsmessung erfolgreich

In der PTB wurde ein Primärmessverfahren zur Bestimmung von Stoffmengenkonzentrationen entwickelt, das auf einer Methode der optischen Spektroskopie (Oberflächenverstärkte Ramanstreuung; Surface enhanced Raman Scattering, SERS) basiert. Kombiniert mit dem Prinzip der Isotopenverdünnung (isotope dilution, ID) wird eine hochgenaue und metrologisch rückführbare, quantitative Analytik ermöglicht. Das Verhältnis-Primärmessverfahren (IDSERS) stellt für viele klinisch-chemische Analyte erstmals eine Alternative zur Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie (IDMS) zur Verfügung. Als schwingungsspektroskopische Methode bietet es Vorteile, wie z. B. direkte strukturelle Informationen, die häufig für eine Identifizierung einer Substanz erforderlich sind.

Die Fähigkeit dieses Verfahrens wurde nun erstmals in einer internationalen Vergleichsmessung unter Beweis gestellt (RELA 2010, siehe <http://www.dgkl-rfb.de/>). Ziel war es, die Konzentration von Kreatinin, einem klinischen Marker, in zwei unterschiedlichen Serumproben zu bestimmen. Zehn der insgesamt zwölf teilnehmenden Laboratorien, darunter vier Metrologieinstitute, setzten dabei das aktuelle Referenzverfahren, die Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie (IDMS) ein. Die mit IDSERS ermittelten Serumkonzentrationen des Kreatinins stimmten in beiden Fällen sehr gut mit dem Mittelwert der durch IDMS gemessenen Werte überein. Die Eignung und Leistungsfähigkeit der Methode für die Metrologie in der Chemie wurde damit erfolgreich nachgewiesen.

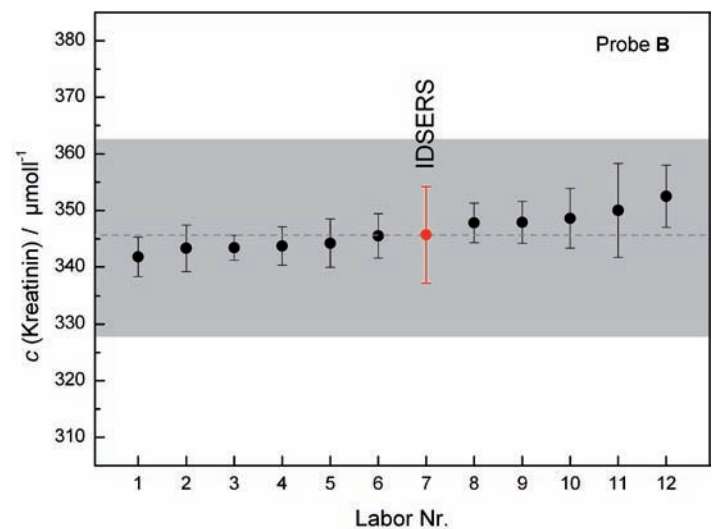
Mittelwert und erweiterte Messunsicherheit der ermittelten Kreatininkonzentration (Probe B) aller Ringvergleichsteilnehmer (gestrichelte Linie: Mittelwert aller mit IDMS gemessenen Werte).

Mean value and expanded measurement uncertainty of the creatinine concentration determined (sample B) of all comparison participants (dotted line: mean value of all the values measured by means of IDMS).

Optical primary procedure for chemistry successfully applied in international comparison measurement

A primary reference procedure for the determination of amount of substance concentrations has been developed at PTB. It is based on an optical spectroscopy method (Surface-enhanced Raman Scattering, SERS). In combination with the principle of isotope dilution (ID), it enables a metrologically traceable, quantitative analysis of high precision. With this primary ratio measurement procedure (IDSERS), for the first time an alternative to isotope dilution mass spectrometry (IDMS) has been made available for many clinical-chemical analytes. As a vibrational-spectroscopic method, it brings about various advantages, for example direct structural information, which is frequently needed to identify a substance.

The efficiency of this procedure has now been evidenced for the first time within the scope of an international comparison measurement (RELA 2010, see <http://www.dgkl-rfb.de/>). The aim of this was to determine the concentration of creatinine – a clinical marker – in two different serum samples. To this end, ten out of the twelve participating laboratories (among them 4 metrology institutes) thereby used the reference procedure that is currently valid – isotope dilution mass spectrometry (IDMS). The creatinine concentrations in serum obtained by means of IDSERS were in both cases in excellent agreement with the mean value of the values measured by means of IDMS. The suitability and efficiency of this method for metrology in chemistry has, thus, been successfully proved.



Silizium-Resonator macht Laser extrem stabil

Die besten Lasersysteme sind in ihrer Kurzzeitstabilität durch das thermische Rauschen der verwendeten Referenzresonatoren begrenzt. Ein neuer Resonator aus einkristallinem Silizium, entwickelt im Rahmen des Exzellenzclusters „Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research“ (QUEST) in Zusammenarbeit mit der University of Colorado und dem National Institute of Standards and Technology (NIST) in Boulder, USA, konnte die erreichbare Kurzzeitstabilität drastisch erhöhen.

In einkristallinem Silizium werden thermische Fluktuationen deutlich weniger angeregt als in den üblichen optischen Gläsern. Der in der PTB entwickelte optische Silizium-Resonator wird in einem Kryostaten am Minimum der thermischen Ausdehnung von Silizium bei einer Temperatur von 124 K betrieben. Auf diesen Resonator wurde die Frequenz eines Infrarotlasers stabilisiert. Um diesen Laser dann zu spezifizieren, ist ein direkter Frequenzvergleich zu einem Referenzsystem nötig. Da kein zweiter vergleichbar stabiler Laser zur Verfügung steht, war ein Dreiecksvergleich nötig. Dafür wurden zwei auf konventionellen Technologien basierende Laser bei einer Wellenlänge von 1,5 μm benutzt, die durch thermisches und technisches Frequenzrauschen auf eine relative Stabilität von einigen 10^{-16} limitiert sind. Dennoch lässt sich im Dreiecksvergleich aus dem heruntergemischten Schwebungssignal zwischen dem auf den Siliziumresonator stabilisierten Laser und einem der Referenzlaser bei einer Frequenz von 194 THz eine Laserlinienbreite von etwa 50 mHz für den ersten genannten Laser ableiten.

Damit steht für die Lasersysteme zum Betrieb der optischen Uhren der PTB eine weltweit einzigartig stabile Referenz zur Verfügung, die auch verlustfrei über das zukünftige Glasfasernetz auf dem PTB-Gelände verteilt werden kann.

Schwebungssignal zwischen dem Siliziumresonator-stabilisierten sowie einem der Referenzlaser. Kleines Bild: ermittelte Laserlinienbreite (ca. 50 mHz bei einer Frequenz von 194 THz).

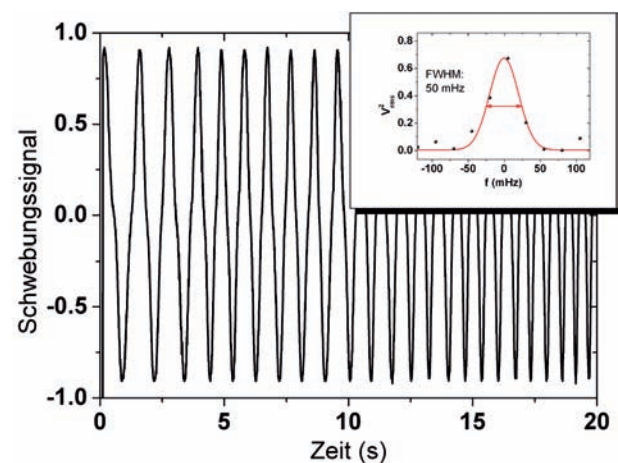
Beat signal between the silicon-resonator-stabilized laser and one of the reference lasers. Smaller image: Determined laser linewidth (approx. 50 mHz at a frequency of 194 THz).

Silicon resonator makes lasers extremely stable

The best laser systems are limited in their short-time stability by the thermal noise of the reference resonators used. A new resonator made of single-crystal silicon, developed within the scope of the Excellence Cluster “Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research” (QUEST) in cooperation with the University of Colorado and the National Institute of Standards and Technology (NIST) in Boulder, USA, allowed the achievable short-time stability to be drastically increased.

In single-crystal silicon, thermal fluctuations are excited to a clearly smaller degree than in usual optical glasses. The optical silicon resonator developed at PTB is operated in a cryostat at the minimum of the thermal expansion of silicon at a temperature of 124 K. On this resonator, the frequency of an infrared laser has been stabilized. Stabilization of this laser requires a direct frequency comparison with a reference system. As no second laser of comparable stability is available, a triangular comparison had to be carried out. For this purpose, two lasers based on conventional technologies, which are limited by thermal and technical frequency noise to a relative stability of a few 10^{-16} , were used at a wavelength of 1.5 μm . In spite of this, the triangular comparison allows a laser linewidth of approx. 50 mHz to be derived for the first-mentioned laser from the beat signal between the laser stabilized to the silicon resonator and one of the reference lasers at a frequency of 194 THz.

In this way, a worldwide unique stable reference for laser systems is available for the operation of the optical clocks at PTB, which can also be distributed without losses via the future optical fiber network on the PTB premises.



Nachnutzung des Forschungs- und Messreaktors

Der Umbau des ehemaligen Forschungs- und Messreaktors Braunschweig auf dem Gelände der PTB ist abgeschlossen und das Gebäude steht nun für den Wissenschaftlichen Gerätebau zur Verfügung.

Der 1967 in Betrieb genommene Forschungs- und Messreaktor mit einer Nennleistung von 1 MW wurde nach zahlreichen wissenschaftlichen Experimenten und Kalibrierungen von Messinstrumenten im Jahr 1995 aufgrund wirtschaftlicher Abwägungen abgeschaltet. Das umfangreiche atomrechtliche Genehmigungsverfahren für die Stilllegung und den anschließenden Rückbau des Gebäudekomplexes dauerte bis 2005. Danach wurde in einem ersten, knapp einjährigen Bauabschnitt das Laborgebäude u. a. für die Konstruktion, Elektronik, Mikrotechnik und Dünnschichttechnik umgebaut. 2006 wurde das ehemalige Maschinenhaus für die neue Galvanik, das Halbzeuglager sowie das Materiallager übergeben. Anschließend wurden weitere, nicht kontaminierte Reaktorkomponenten entfernt und es begann der Umbau der ehemaligen Experimentierhalle für die Arbeitsgruppen Messgerätebau und Komponentenfertigung. Mit einem Anbau Süd wurden klimatisierte Räume für die Fertigungsbereiche Erodieren, Schleifen, Präzisions- und Ultra-Präzisionsbearbeitung geschaffen. Als neue Mechanische Lehrwerkstatt dient nun ein neuer Anbau Nord.

Für den Wissenschaftlichen Gerätebau ergeben sich zahlreiche Vorteile: Alle Arbeitsbereiche liegen nahe beieinander, die Verkehrswege und Sozialräume entsprechen dem aktuellen Stand der Technik und die neuen Fertigungsbereiche sind voll klimatisiert. Nur so können die kontinuierlich ansteigenden Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit erreicht werden. In dem Brückengebäude des ehemaligen Reaktors wurde zudem für den Fachbereich Koordinatenmesstechnik eine Referenzwand errichtet, an der weltweit erstmalig eine hochgenaue, richtlinienkonforme Prüfung der messtechnischen Leistungsfähigkeit optischer 3D-Längenmessgeräte stattfinden kann.

Future use of the Experimental and Measurement Reactor

The reconstruction of the former Experimental and Measurement Reactor Braunschweig on the premises of PTB has been concluded and the building is now available to the "Scientific Instrumentation" Department.

After a great number of scientific experiments and calibrations of measuring instruments had been carried out in it, the Experimental and Measurement Reactor (nominal power: 1 MW) which had been put into operation in 1967 was shut down in 1995 due to economic considerations. The comprehensive approval procedure under the Atomic Energy Act for the decommissioning and the subsequent dismantling of the building complex lasted until 2005. After that, the laboratory building was converted – among other things – for the fields of construction, electronics, microtechnology and thin-film techniques, in a construction phase which took almost one year. In 2006, the former Machinery House for the new Electroplating Shop, the Semi-finished Products Store and the Materials Store were handed over. Subsequently, other non-contaminated reactor components were removed, and the conversion of the former Experimentation Hall into workspace for the Working Groups "Fabrication of Measuring Instruments" and "Manufacturing of Components" was started. With the Extension "South" to the existing building, air-conditioned rooms were made available for the production areas eroding, grinding, precision- and ultra-precision processing. A new Extension "North" now serves as a new Apprenticeship Workshop.

For the "Scientific Instrumentation" Department, a great number of advantages have opened up: All fields of work lie closely together, the routes within the building and the communal rooms comply with the latest state-of-the-art and the new manufacturing areas are fully air-conditioned. Only in this way can the continuously increasing requirements for production accuracy be met. In addition, a reference wall for the "Coordinate Metrology" Department has been established in the bridge building of the former reactor. On this wall, it is possible for the first time worldwide to carry out high-precision testing of the metrological efficiency of optical 3D length measuring instruments in accordance with the directives.



Erster Wert der PTB für die Boltzmann-Konstante

Im Zuge der Neudefinition der SI-Basiseinheiten über Naturkonstanten sind Forschergruppen aus aller Welt damit beschäftigt, den Wert der Boltzmann-Konstante k mit Unsicherheiten von wenigen ppm zu bestimmen. Gelingt dies, kann die Einheit Kelvin neu definiert werden. Die meisten Gruppen arbeiten mit der akustischen Gasthermometrie, die auch den bislang genauesten Wert mit etwa 1,2 ppm lieferte. Die PTB hat einen alternativen, komplett unabhängigen Weg eingeschlagen, um systematische Fehlerquellen erkennen und damit die Neudefinition auf eine solide Basis stellen zu können.

Sie setzt die Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie (DCGT) ein, die auf der Bestimmung der Dichte des Gases Helium beruht, das die Kapazität eines Kondensators ändert. Aus Kapazitätsmessungen bei konstanter Temperatur am Wassertripelpunkt und unterschiedlichen Drücken im Messkondensator kann k bestimmt werden. Die Methode stellt extreme Anforderungen an die Messtechnik und wurde in Kooperation verschiedener PTB-Abteilungen und externer Partner realisiert.

Der erste Wert für k von $1,380655 \cdot 10^{-23}$ J/K liegt um 4 ppm über dem neuesten CODATA-Wert und ist mit einer relativen Unsicherheit von knapp 8 ppm der erste Beweis, dass das DCGT zu einer k -Bestimmung auf höchstem Niveau in der Lage ist. Bis zur angestrebten Unsicherheit von 2 ppm sind noch einige Hürden zu nehmen. Über Verbesserungen in der Druckmessung sowie eine Optimierung von Design und Materialien der Kondensatoren kann der Weg für eine solide Neudefinition der Einheit Kelvin geebnet werden.

Kreuzkondensator und Abschirmung zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante sowie zugehöriges Druckgefäß. Die Konstruktion ist für geringstmögliche Verformungen beim erforderlichen Druck von bis zu 7 MPa ausgelegt.

Cross capacitor and shielding for the determination of the Boltzmann constant, as well as the apparatus pressure vessel. The design is conceived for the smallest possible deformation at the required pressure of up to 7 MPa.

PTB obtains first value for Boltzmann constant

Within the scope of the redefinition of the SI base units via fundamental constants, research groups from all over the world are working on the target of determining the value of the Boltzmann constant k with uncertainties of a few ppm. If they are successful, the unit "kelvin" could be redefined. Most groups apply acoustic gas thermometry, a method which has provided the most accurate value to date (approx. 1.2 ppm). PTB has chosen a different – and completely independent – path to detect systematic sources of errors and, thus, to put the redefinition on solid ground.

PTB employs dielectric-constant gas thermometry (DCGT). This method is based on the determination of the density of the gas helium which changes the capacitance of a capacitor. From capacity measurements at a constant temperature (at the triple point of water) and at different pressures in the measuring capacitor, k can be determined. This method places extremely high demands on the measuring technique used and was realized by several departments of PTB in cooperation with external partners.

The first value for k of $1,380655 \cdot 10^{-23}$ J/K lies approx. 4 ppm above the latest CODATA value and is, with a relative uncertainty of approx. 8 ppm, the first proof that DCGT is able to determine k at the highest level. However, until the targeted uncertainty of 2 ppm is reached, some difficulties will have to be overcome. Improvements in pressure measurement and an optimization of the design and the materials used for the capacitors can pave the way for a sound redefinition of the unit kelvin.



Bisher unbekannte molekulare Austauschprozesse in Wasser?

NMR-Messungen (kernmagnetische Resonanz, Nuclear Magnetic Resonance) sind heute unverzichtbar für die Spektroskopie von Flüssigkeiten in Physik, Chemie, Biologie und Medizin. Wichtige Messgrößen sind die Lebensdauer der Magnetisierungen von Atomkernen parallel bzw. senkrecht zu einem angelegten Magnetfeld, die sogenannten longitudinalen bzw. transversalen Relaxationszeiten (T_1 und T_2). Eine allgemeine akzeptierte, aber noch nicht experimentell verifizierte Theorie besagt, dass die beiden Relaxationszeiten in immer schwächeren magnetischen Feldern auf den gleichen Wert zulaufen. In der PTB konnte dies erstmals experimentell überprüft werden.

Im weltweit besten magnetisch abgeschirmten Raum, dem Berlin Magnetically Shielded Room-2 (BMSR-2), und mit in der PTB entwickelten supraleitenden Quanteninterferometern (SQUIDs) konnten die schwachen NMR-Signale von hochreinem Wasser auch in sehr kleinen Magnetfeldern bis $0,1 \mu\text{T}$ registriert werden. Das Ergebnis war überraschend.

Die Relaxationszeiten konvergieren zwar wie erwartet zum Nullfeld auf den gleichen Wert, doch ist der Kurvenverlauf völlig anders, als die Theorie vorhersagt. Die Abbildung zeigt dies anhand der Kehrwerte der Relaxationszeiten, der Relaxationsraten: Im Bereich höherer Felder bestätigen die Messungen die Theorie. Relaxationsprozesse in extrem schwachen Feldern von einigen Mikrottesla spiegeln hingegen molekulare Bewegungen in einem Frequenzbereich unterhalb von einem Kilohertz wider. Die Abweichungen in diesem Bereich deuten darauf hin, dass im Wasser neben den bekannten schnellen Diffusionsprozessen auch sehr langsame Austauschprozesse mit Frequenzen um die 100 Hz stattfinden, die bisher nicht bekannt waren. Das wirft ein neues Licht auf die molekulare Dynamik von Wasser im niederfrequenten Bereich.

Gemessene T_1 - (rot) und T_2 -Relaxationsraten (blau) in Abhängigkeit von der magnetischen Flussdichte B_0 . Die durchgezogenen Linien zeigen den nach der Theorie erwarteten Verlauf der T_1 - bzw. T_2 -Relaxationsraten.

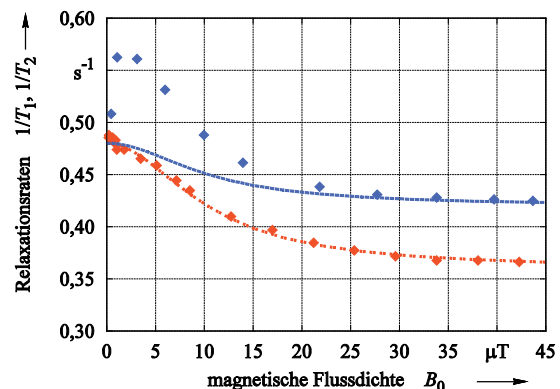
Measured T_1 (red) and T_2 relaxation rates (blue) as a function of the magnetic flux density B_0 . The continuous lines show the development of the T_1 and T_2 relaxation rates expected according to theory.

So far unknown molecular exchange processes in water?

Today, NMR (Nuclear Magnetic Resonance) measurements are indispensable for the spectroscopy of liquids in physics, chemistry, biology and medicine. Important measurands are the lifetimes of the magnetizations of atomic nuclei parallel or orthogonal to an applied magnetic field, the so-called longitudinal or transversal relaxation times (T_1 and T_2). A generally accepted, but not yet experimentally verified theory says that the two relaxation times should approach the same value towards zero-magnetic fields. At PTB, this could be verified for the first time experimentally.

In the worldwide best magnetically shielded room, the Berlin Magnetically Shielded Room-2 (BMSR-2), and with the aid of the superconducting quantum interferometers (SQUIDs) developed at PTB, the weak NMR signals of ultrapure water could be registered also in very small magnetic fields of down to $0.1 \mu\text{T}$. The result was surprising.

Although the relaxation times converge – as expected – to the zero field towards the same value, the shape of the curves is completely different to what had been predicted by theory. The figure shows this on the basis of the reciprocal values of the relaxation times, the relaxation rates: In the area of higher fields, the measurements confirm the theory. Relaxation processes in extremely weak fields of a few micro-teslas reflect, however, molecular mobilities in a frequency range below one kilohertz. The deviations in that area indicate that – in addition to the known fast diffusion processes – also very slow exchange processes with frequencies of around 100 Hz, which have so far not been known, are taking place in water. This casts a new light on the molecular dynamics of water in the low-frequency range.



Mathematische und statistische Analyse dynamischer Messungen

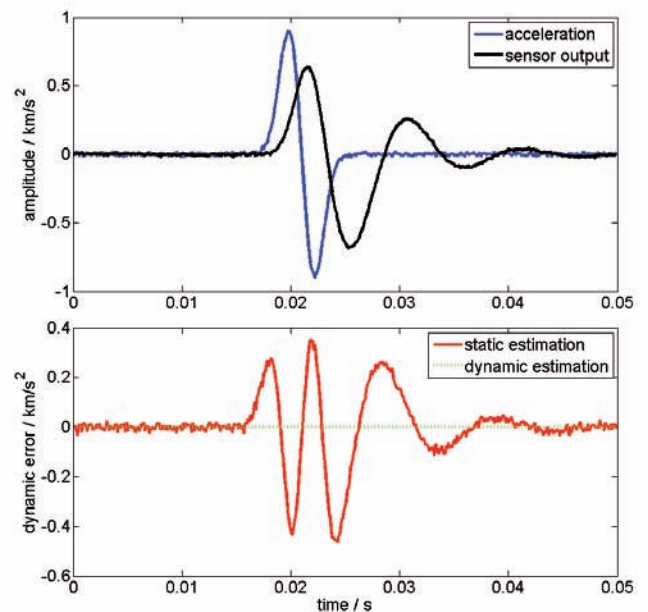
Die Analyse dynamischer Messungen wird in Metrologie und Industrie immer wichtiger. Allerdings stellt die Entwicklung entsprechender mathematischer und statistischer Verfahren eine Herausforderung dar. Bisher in der PTB entwickelte mathematische und statistische Methoden zur Analyse dynamischer Messungen kombinieren Verfahren aus Signalverarbeitung, multivariater Statistik und Maßtheorie und ermöglichen deutlich genauere Analysen als die in der Metrologie üblichen Methoden. Sie lassen sich als eine Erweiterung des metrologischen Standardverfahrens zur Ermittlung der Messunsicherheit, des „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM), verstehen. Ein besonderes „Highlight“ ist die 2011 geglückte Erweiterung von Unsicherheitsbestimmungen auf kontinuierliche Funktionen. Sie ist grundsätzlich auch über die Analyse dynamischer Messungen hinaus von Bedeutung, beispielsweise im Zusammenhang mit kontinuierlicher Modellierung oder der Lösung inverser Probleme. Die neuen Analyse-Methoden kommen mittlerweile in verschiedenen Anwendungen zum Einsatz, etwa bei der Analyse von Druck-, Beschleunigungs-, Kraft- und Drehmomentmessungen sowie der Kalibrierung von ultra-schnellen Sampling-oszilloskopen. Auch für die Simulation und Analyse von Gasversorgungs-Netzwerken könnte die neue Methodik eingesetzt werden..

Ergebnisse einer Simulationsrechnung: Oben: zugrundeliegende dynamische Beschleunigung und Ausgangssignal des Sensors. In einer realen Messung ist nur das Sensorsignal verfügbar. Unten: resultierende Abweichungen in der Schätzung der Beschleunigung mit den in der Metrologie üblichen statischen Analysen (rot) sowie mit neuen Schätzverfahren (grün).

Results of a simulation calculation: Top: Basic dynamic acceleration and output signal of the sensor. In a real measurement, only the sensor signal is available. Bottom: Resulting deviations when estimating the acceleration with the statistical analyses usually applied in metrology (red) and with new estimation procedures (green).

Mathematical and statistical analysis of dynamic measurements

In metrology and industry, the analysis of dynamic measurements is constantly gaining in importance. The development of corresponding mathematical and statistical procedures represents, however, a challenge. Mathematical and statistical methods for the analysis of dynamic measurements developed at PTB combine procedures from signal processing, multivariate statistics and measure theory and allow clearly more exact analyses to be performed than the methods usually applied in metrology. They can be understood as an extension of the metrological standard procedure for the determination of the measurement uncertainty, i.e. the “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” (GUM). A special “highlight” is the extension of the uncertainty determinations to continuous functions, which was achieved in 2011. It is, as a matter of principle, also important beyond the analysis of dynamic measurements, for example in connection with continuous modelling or the solution of inverse problems. Meanwhile, the new analysis methods are used in different applications such as, for example, for the analysis of pressure-, acceleration-, force- and torque measurements and for the calibration of ultra-fast sampling oscilloscopes. Also, it would be possible to use this new method for the simulation and analysis of gas supply networks.



Elektronische Eigenschaften von Graphen-Quantenpunkten bei Anwesenheit von Unordnung

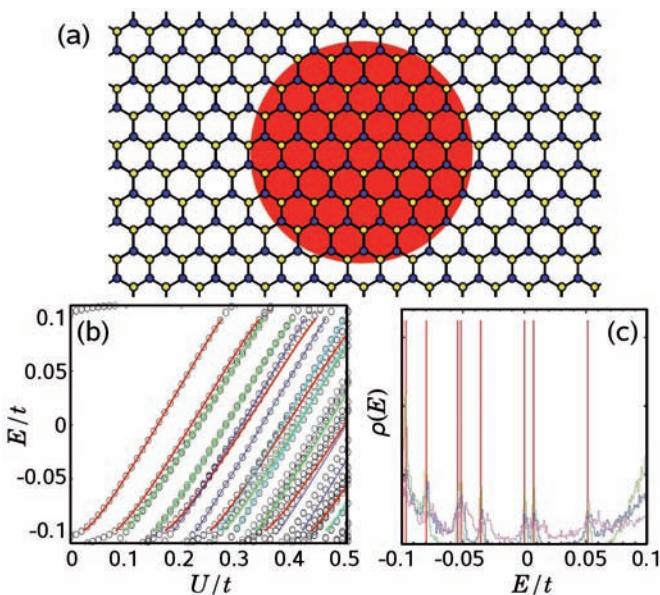
Graphen – eine einzelne Schicht aus Kohlenstoffatomen, die auf einem Bienenwabengitter angeordnet sind – besitzt zahlreiche verblüffende elektronische Eigenschaften und bietet auch Perspektiven für die Präzisionsmesstechnik. Die Besonderheit von Graphen besteht darin, dass sich die Leitungselektronen wie masselose relativistische Teilchen verhalten, bei denen die Fermi-Geschwindigkeit die Rolle der Lichtgeschwindigkeit in der relativistischen Kinematik übernimmt. Bedauerlicherweise gibt es keine Energielücke wie bei herkömmlichen Halbleitern, was Probleme für praktische Anwendungen mit sich bringt. Besonders der Einschluss von Ladungsträgern in von externen „Gates“ erzeugten elektrostatischen Quantenpunkten ist nicht praktikabel, da das Auftreten von echten gebundenen Zuständen von dem Klein’schen Tunnelmechanismus beeinträchtigt wird. Konzeptionell lässt sich eine Energielücke einfach erzeugen, da das hexagonale Gitter aus zwei sich gegenseitig durchdringenden dreieckigen Untergittern besteht. Wenn Graphen auf ein spezielles Substrat aufgebracht wird, das für eines von beiden Untergittern ein unterschiedliches elektrostatisches Potenzial erzeugt, öffnet sich im Spektrum eine Lücke. Es hat sich gezeigt, dass eine derartige Aufhebung der Untergittersymmetrie, die bei epitaktisch auf SiC gewachsenen Graphenen entdeckt wurde, eine Lücke von ungefähr 0,26 eV erzeugt.

Electronic properties of graphene quantum dots in the presence of disorder

Graphene, a single layer of carbon atoms arranged in a honeycomb lattice, offers a number of intriguing electronic properties and prospects for precision metrology. Graphene’s peculiarity is that the conduction electrons behave like massless relativistic particles, where the Fermi velocity plays the role of the speed of light in relativistic kinematics. Unfortunately, there is no energy gap analogous to that in conventional semiconductors, which poses problems for practical applications. In particular, the confinement of carriers in electrostatic quantum dots created by external gates is not practicable, because the occurrence of true bound states is affected by the Klein tunneling mechanism. Conceptually, the simplest way to open an energy gap has to do with the fact that the hexagonal lattice is made out of two interpenetrating triangular sub-lattices. If graphene is deposited onto a specific substrate that generates an electrostatic potential that is different for the two sub-lattices, a gap is opened in the spectrum. Such a breaking of the sub-lattice symmetry, detected in graphene grown epitaxially on SiC, has previously been shown to produce a gap of about 0.26 eV.

(a) Kreisrunder Graphen-Quantenpunkt mit Potenzial U und Radius R . Eine eventuell vorliegende Anisotropie $\pm\Delta$ des Untergitters zwischen den blauen und den gelben Atomen öffnet eine Energielücke. (b) Vergleich zwischen den Energien der gebundenen Zustände des Gittermodells (Kreise) und den Lösungen der Dirac-Gleichung (Linien) als Funktion des Potentials U ($t = 2,8$ eV, $\Delta = 0,1$ t, $R = 25$ -facher C-C Atomabstand). (c) Zustandsdichte der gebundenen Zustände innerhalb der Energielücke bei Anwesenheit zufälliger räumlicher Unordnung. Die scharfen Peaks verbreitern sich und verschwinden schließlich mit zunehmender Unordnungsstärke.

(a) A circular graphene quantum dot of potential U and radius R . A sub-lattice potential anisotropy $\pm\Delta$ between the blue and the yellow atoms opens an energy gap. (b) Comparison between the energies of the bound states of the lattice model (circles) and the solutions of the Dirac equation (lines) as a function of the potential U ($t = 2.8$ eV, $\Delta = 0.1$ t, R : 25 times the C-C atom distance). (c) The density of states of the bound states within the gap in the presence of random on-site disorder. The sharp peaks broaden and finally disappear with increasing disorder strength.



Kürzlich wurden die gebundenen Zustände und der Transport durch einen elektrostatisch begrenzten kreisrunden Graphen-Quantenpunkt in Anwesenheit dieses Untergitter-Symmetriebruchs (Abbildung a) untersucht. Es gibt zwei Arten, die Elektronen in Graphen zu beschreiben: zum einen mit dem „tight-binding“-Gittermodell; zum anderen mit dem Kontinuumsmodell, das masselose relativistische Teilchen mit Hilfe einer effektiven Dirac-Gleichung bei niedrigen Energien beschreibt. Es ist festzustellen, dass sich bei perfekt geordneten Systemen die Ergebnisse der beiden Modelle gut vergleichen lassen, solange der Radius des kreisrunden Quantenpunkts viel größer ist als die Gitterkonstante (Abbildung b).

Danach wurde der Einfluss von verschiedenen Unordnungstypen auf die Spektral- und Transporteigenschaften der Quantenpunkte untersucht. Bei zufälliger „On-site“-Unordnung beispielsweise, die durch adsorbierte Atome entstehen kann, sowie bei Rippeln und Riefen, die mit Hilfe eines zufälligen magnetischen Flusses modelliert werden können, werden die den gebundenen Zuständen des Quantenpunkts entsprechenden Peaks in der Zustandsdichte schnell breiter und verschwinden bereits bei einem geringen Anstieg der Unordnungsstärke (Abbildung c). Im Gegensatz dazu verbreitert Randunordnung, z. B. infolge einer zufälligen Sättigung der offenen Bindungen entlang der Kanten der Graphenschicht, die gebundenen Zustände des Quantenpunkts nicht, sodass sich solche Systeme gut für experimentelle spektroskopische Studien eignen. Darüber hinaus verschieben sich die Energien der elektronischen Zustände bei Quantenpunkten mit geneigten Potenzialstufen linear hin zu kleineren Energien, wenn sich der Anstieg der Quantenpunkt wand verringert. Daher sollten die Graphen-Quantenpunkte so steil und sauber wie möglich erzeugt werden, damit sie für experimentelle Untersuchungen geeignet sind.

Recently, the bound states and the transport through an electrostatically confined circular graphene quantum dot were investigated in the presence of this sub-lattice symmetry breaking (Figure a). There are two ways to describe the electrons in graphene: one is the Tight-Binding lattice model. The other is the continuum model described by an effective Dirac equation for massless relativistic particles of graphene, which is valid in the low energy regime. One finds that for perfectly ordered systems the results from the two models compare well as long as the radius of the circular quantum dot is much larger than the lattice constant (Figure b).

Subsequently, the influence of different types of disorder on the quantum dot's spectral and transport properties was examined. For example, in the case of random on-site disorder that can be due to adsorbed atoms, as well as ripples and corrugations modeled via a random magnetic flux, the peaks in the density of states corresponding to the bound states of the quantum dot are quickly broadened and disappear already for small increases of the disorder strength (Figure c). On the contrary, edge disorder due to random saturation of the dangling bonds along the edges of the graphene sheet does not broaden the bound states of the quantum dot, making such systems well suited for experimental spectroscopic studies. Additionally, in the case of quantum dots with smooth edges, the electronic bound states linearly shift to smaller energies when the slope of the quantum dot wall decreases. Hence, the graphene quantum dots should be fabricated as steeply and as cleanly as possible to be suited for experimental investigations.

Die 62. Sitzung des Kuratoriums der PTB

Das Kuratorium der PTB traf sich am 26. und 27. Mai 2011 in Braunschweig zu seiner Jahrestagung. Der Präsident der PTB, Prof. Dr. Ernst O. Göbel, begrüßte die Kuratoren und Gäste, die im Anschluss die Möglichkeit hatten, Labore und Einrichtungen der PTB zu besichtigen.

Am Nachmittag des 26. Mai fand ein wissenschaftliches Kolloquium statt, in dem Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler aktuelle Forschungserfolge aus den Bereichen „Strahlenschutzdosimetrie mit gepulsten Photonenfeldern“, „Kugelinterferometrie“ und „Neudefinition des Kelvin“ vorstellten. Danach diskutierten die Kuratoren in den Fachabteilungen über die fachlichen und strategischen Aspekte der Arbeiten.

Der Präsident des Kuratoriums, Dr. Sven Halldorn, eröffnete die Kuratoriumssitzung am 27. Mai 2011. In seiner Rede beglückwünschte er die PTB zur ihrer besonders positiven Hervorhebung in der Stellungnahme des Wissenschaftsrats zur Ressortforschung im November 2010. Er sicherte der PTB die Unterstützung des Ministeriums bei der Verbesserung der Rahmenbedingungen für ihre wissenschaftliche Arbeit und Flexibilisierung der administrativen Vorgaben zu. Halldorn stellte fest, dass die PTB einen wichtigen Anteil an der Innovationspolitik habe, die z. B. den Umbau der Energieversorgung beinhaltet. Die Bedeutung der PTB im Bereich der Normung sei weiterhin hoch und zeige sich in der erfolgreichen Beteiligung an Förderprogrammen wie der Exzellenzinitiative.

Prof. Dr. Ernst O. Göbel berichtete im Anschluss über die Arbeit der PTB im vergangenen Jahr und die weiteren Ziele. Zunächst präsentierte er die Fortschritte auf dem Weg zu einer Neudefinition der Basiseinheiten, für die eine Konzentration vielfältiger Kompetenzen an einem Ort erforderlich ist, wie sie

Der stellvertretende Präsident des Kuratoriums, Prof. Dr. Klaus von Klitzing, mit einer Silizium-Einkristallkugel, die zur Bestimmung der Avogadro-Konstanten dient.



The 62nd Meeting of the “Kuratorium” (Advisory Board) of PTB

PTB’s Kuratorium held its annual meeting on 26th and 27th May 2011 in Braunschweig. The President of PTB, Professor Dr. Ernst O. Göbel, welcomed the members of the Kuratorium and guests, who had the opportunity to tour the laboratories and facilities of PTB after the meeting.

On the afternoon of 26 May, a scientific colloquium was held in which young scientists presented current research achievements from the fields “Radiation protection dosimetry with pulsed photon fields”, “Sphere interferometry” and “Redefinition of the kelvin”. Afterwards, the members of the Kuratorium had discussions in the departments on the technical and strategic aspects of the work.

The President of the Kuratorium, Dr. Sven Halldorn, opened the meeting of the Kuratorium on 27 May 2011. In his speech, he congratulated PTB for the especially positive emphasis given in the comments made by the German Council of Science and Humanities on its departmental research in November 2010. He assured PTB of the support of the Ministry for the improvement of the framework conditions for its scientific work and for the increased flexibilization of the administrative requirements. Mr. Halldorn observed that PTB participates significantly in the innovation policy, which encompasses, e.g., conversion of the energy supply. The importance of PTB in the area of standardization continues to be high and is apparent in the successful participation in funding programs such as, for example, the excellence initiative.

Professor Dr. Ernst O. Göbel followed with a report on the work of PTB during the last year and on the further goals. First, he presented the progress made towards a redefinition of the base units. To accomplish this, a concentration of diverse competencies is needed at one location,

The Vice-President of the Kuratorium, Prof. Dr. Klaus von Klitzing, with a silicon single-crystal, which serves to determine the Avogadro constant.



Gruppenbild des Kuratoriums der PTB 2011

Group photo of PTB's Kuratorium 2011

praktisch nur in der PTB vorliegt. Neben der Entwicklung des European Metrology Research Programme (EMRP) ging Göbel auf die positiven Entwicklungen im Bereich der Dienstleistungen ein. So ist nach der Internationalisierung der Gerätezulassungen durch die europäische Geräterichtlinie (MID) und damit der Aufhebung des PTB-Monopols bei Bauartzulassungen ein Zuwachs an Konformitätsbewertungen zu verzeichnen, ein Zeichen für den Stellenwert, den Zulassungen durch die PTB haben. Ernst. O. Göbel stellte auch detailliert die Ergebnisse und Auswirkungen der internen Aufgabenkritik von Anfang 2011 vor. Durch den stetigen Personalabbau sei die PTB selbst zu Einschnitten in Bereichen mit hohem Entwicklungspotenzial gezwungen.

Im Umfeld der Kuratoriumstagung unterzeichneten Friedel Eggelmeyer, Abteilungsleiter im Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), und Prof. Dr. Göbel eine Vereinbarung über die weitere Förderung von Projekten der technischen Zusammenarbeit im metrologischen Umfeld. Das BMZ würdigte in einer Mitteilung die Zusammenarbeit: „Mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt verfügt Deutschland heute als einziger bilateraler Geber über eine international anerkannte Fachinstitution, die für uns die Beratung im Bereich Qualitätsinfrastruktur durchführt. Die Vereinbarung spiegelt die gegenseitige Wertschätzung wider und soll für die nächsten Jahre eine stabile Zusammenarbeit ermöglichen.“

Persönliches:

Dr. Axel Anderlohr und Prof. Dr. Hans Schuler scheiden aus dem Kuratorium aus.

which is practically only available at PTB. Besides the development of the European Metrology Research Programme (EMRP), Prof. Göbel also addressed the positive developments in the services sector. Thus, following the internationalization of the instrument approvals by the European Measuring Instruments Directive (MID) and thus the abolishment of PTB's monopoly on type approvals, an increase in conformity assessments has been observed, an indication of the value of PTB approvals. Prof. Göbel also presented in detail the results and effects of the internal task critique at the beginning of 2011. As a result of the continuous reduction in staff, PTB is forced to make cuts in fields which have a high development potential.

Against the background of the Kuratorium meeting, Friedel Eggelmeyer, department head in the Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Federal Ministry for Economic Cooperation and Development – BMZ), and Prof. Göbel signed an agreement on the further advancement of projects of Technical Cooperation in the metrological field. The BMZ showed its appreciation of the cooperation in a memorandum: “With the Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany has available today, as sole bilateral donor, an internationally recognized specialized institution which conducts consulting services for us in the area of quality infrastructure. The agreement reflects the mutual esteem and is to ensure a stable cooperation for the next years.”

Personal matters:

Dr. Axel Anderlohr and Prof. Dr. Hans Schuler are retiring from the Kuratorium.

Besuch von Staatssekretär Hintze

Am 22. Juni 2011 besuchten der parlamentarische Staatssekretär Peter Hintze aus dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW) und Dr. Carola Reimann (MdB) die PTB.

Im Rahmen einer Diskussion mit dem Präsidium und von Laborbesuchen informierten sie sich über die Forschung und Dienstleistungen der PTB. Daneben hatten sie aber auch ein offenes Ohr für aktuelle Anliegen der PTB, zu denen vorrangig die Teilnahme an der Wissenschaftsfreiheitsinitiative und eine Ausnahme für die PTB von der Übertragung der Liegenschaften an die Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA) zählen.

Hintze zeigte sich von den Instrumenten und Forschungsaktivitäten der PTB sehr beeindruckt und bestätigte die herausragende Position der PTB unter den Ressortforschungseinrichtungen.

Visit from State Secretary Hintze

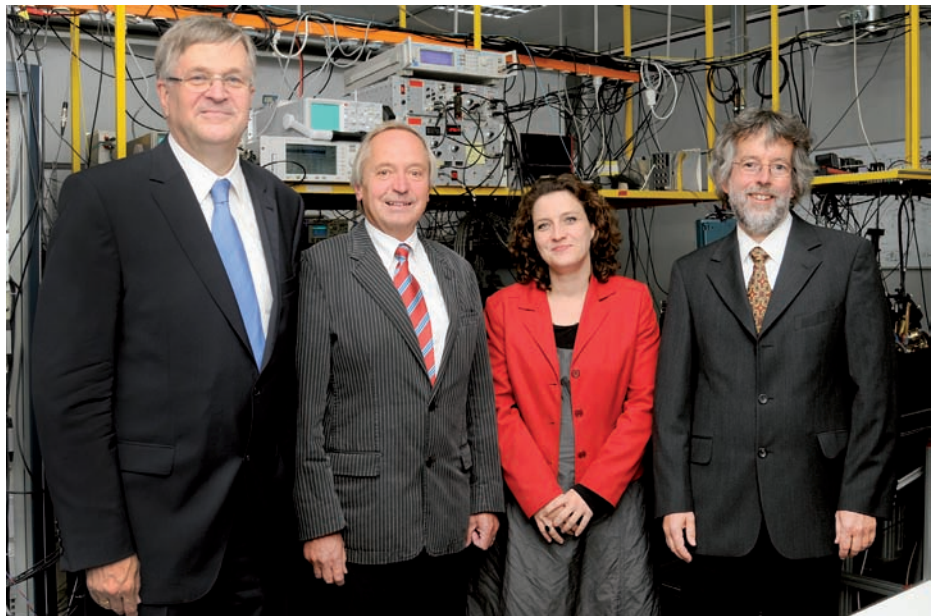
On 22 June 2011, Parliamentary State Secretary Peter Hintze from the Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Federal Ministry of Economics and Technology – BMW) and Ms. Carola Reimann (MdB) visited PTB.

Within the scope of a discussion with the Presidential Board and of laboratory tours, it was their desire to gather information about PTB's research and services. In addition to this, they also had an open ear for current affairs of PTB, including, above all, the participation in the Wissenschaftsfreiheitsinitiative (Freedom of Sciences Initiative) and the waiving for PTB of the transfer of the real estate property to the Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (Institute for Federal Real Estate – BImA).

Mr. Hintze was very impressed with PTB's instruments and research activities and confirmed the prominent position of PTB among the institutes conducting departmental research.

Staatssekretär Peter Hintze, Professor Dr. Göbel, Dr. Carola Reimann und Dr. Uwe Sterr (von links) im Labor der optischen Strontium-Gitteruhr.

State Secretary Peter Hintze with Professor Dr. Göbel, Dr. Carola Reimann and Dr. Uwe Sterr (from left to right) in the strontium optical lattice clock laboratory.



Fertigstellung des neuen Seminarzentrums der PTB

Seit dem Herbst 2011 hat die PTB ein neues Seminarzentrum für bis zu 120 Personen, das sich an den Hörsaalkomplex im Kohlrausch-Bau harmonisch anfügt. Die Möglichkeiten für die Ausrichtung von Tagungen und Workshops in der PTB haben sich so deutlich verbessert, da das Zentrum auch großzügige Stellflächen für Poster oder Aussteller bietet.

Der Seminarbereich ist teilbar angelegt, sodass Parallelveranstaltungen möglich sind. Die Räume sind mit neuester Technik ausgestattet, die z. B. Mehrfachprojektionen und Videoübertragungen ermöglicht.

Das Zentrum wurde schon für verschiedene Veranstaltungen genutzt und erfüllt die Erwartungen voll. Es ist zu erwarten, dass der Neubau die Kommunikation der PTB mit ihren Kooperationspartnern in Wirtschaft und Wissenschaft fördert und belebt.

Completion of PTB's new seminar centre

Since autumn 2011, PTB has a new seminar centre which accommodates up to 120 people. This centre is harmoniously annexed to the auditorium complex in the Kohlrausch Building. The options for organizing meetings and workshops at PTB are thus considerably improved, as the centre also offers ample floor space for posters or exhibitions.

The seminar area is designed to be divided into smaller areas, so that parallel events are possible. The rooms are equipped with state-of-the-art technology, which facilitates, for example, multiple projections and video transmissions.

The centre has already been used for various events and fully meets all expectations. It is anticipated that the new building will promote and stimulate the communication of PTB with its cooperation partners in science and the economy.

Blick von Süden auf das neugebaute Seminarzentrum.

Southern view of the newly constructed seminar centre.



Selbsterklärung zum Qualitätsmanagement

Seit 20 Jahren betreibt die PTB ein integriertes Qualitätsmanagementsystem, das die Tätigkeitsbereiche Forschen, Messen und Beraten in vier ineinander verzahnten Geschäftsbereichen Grundlagen der Metrologie, Metrologie für die Wirtschaft, Metrologie für die Gesellschaft und internationale Angelegenheiten umfasst. Mit diesem Qualitätsmanagementsystem werden die Anforderungen von ISO/IEC 17 025 und damit die Prinzipien der ISO 9001 und soweit zutreffend die Normen der Reihe EN 45 000 bzw. ISO/IEC 17 000 sowie des ISO Guide 34 erfüllt. Außerdem sind die Empfehlungen der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zur guten wissenschaftlichen Praxis¹⁾ in das QM-System integriert. Das QM-System ist einem jährlichen Selbstbewertungsprozess auf Basis eines umfassenden internen Auditprogramms zur ständigen Verbesserung und Aufrechterhaltung der hohen Qualität der Leistungen der PTB unterworfen. Unterstützt wird dieses Auditprogramm durch internationale Fachexperten im Rahmen des EURAMET-Projektes 1083. Als Ergebnis dieses Prozesses wurde erstmals im November 2010 vom Präsidenten der PTB eine Selbsterklärung zum Qualitätsmanagement²⁾ unterzeichnet, in dem die Grundlagen des Qualitätsmanagements der PTB erläutert sind. Diese Selbsterklärung ist auch im Internet in deutscher und englischer Sprache veröffentlicht.

Self-declaration on quality management

For 20 years now, PTB has been operating an integrated quality management system which encompasses the main activities „Research and Development“, „Measurements“, and the „Rendering of Advice“ in the four intertwined fields of business „Fundamentals of Metrology“, „Metrology for Economy“, „Metrology for Society“ and „International Affairs“. With this quality management system, the requirements laid down in ISO/IEC 17025 – and thus the principles of ISO 9001 and, where applicable, the standards of series EN 45000 and/or ISO/IEC 17000 and of ISO Guide 34 – are complied with. Furthermore, the recommendations of the Deutsche Forschungsgemeinschaft (German Research Foundation – DFG) for good scientific practice¹⁾ have been integrated into the quality management (QM) system. The QM system is subject to an annual self-assessment process („review“) which is based on a comprehensive internal audit programme whose aim is to improve and maintain the high quality of PTB’s services and performance. This audit programme is supported by international experts within the scope of EURAMET Project 1083. As a result of this process, a self-declaration on quality management²⁾ was signed by PTB’s president for the first time in November 2010 in which PTB’s basic principles of quality management are outlined. This self-declaration has been published in German and English and is available on the Internet.

¹⁾ http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/die_ptb/praesidialer_stab/empfehlung_wiss_praxis_0198.pdf

²⁾ http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/die_ptb/praesidialer_stab/scan_selbsterklaerung_2010.pdf

¹⁾ http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/die_ptb/praesidialer_stab/empfehlung_wiss_praxis_0198.pdf

²⁾ http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/PSt/scan_selfdeclaration_2010.pdf



Ausschuss Qualitätsmanagement der PTB (A-QM) – 50. Arbeitsbesprechung

Die Festlegung weltweit anerkannter Anforderungen an die Tätigkeit von Kalibrier- und Prüflaboratorien in einer internationalen Norm bildete vor mehr als 10 Jahren die Grundlage für eine umfassende Neuausrichtung des Qualitätsmanagements in der PTB. Zur Einführung eines Qualitätsmanagementsystems auf Basis der ISO/IEC 17 025 wurden zunächst ein alle Abteilungen der PTB umfassendes Projekt geschaffen und ein Ausschuss Qualitätsmanagement (A-QM) als QM-Lenkungs- und Steuerungsgremium gegründet. Seine erste Besprechung fand am 13. Juli 1999 statt.

Dies war der Startpunkt für eine umfassende Bestandsaufnahme, gefolgt von einer intensiven Aufbauphase des Qualitätsmanagements. Geprägt war diese Entwicklung vor dem Hintergrund des CIPM-MRA¹⁾ und von dem Willen, alle Tätigkeitsbereiche der PTB in das Qualitätsmanagementsystem angemessen im Sinne der vier verzahnten Geschäftsbereiche Grundlagen der Metrologie, Metrologie für die Wirtschaft, Metrologie für die Gesellschaft und internationale Angelegenheiten zu integrieren. Dabei sollte PTB-weit nur so viel wie erforderlich geregelt, der Formalismus eingedämmt und technische Aspekte möglichst praxisorientiert geregelt werden. Als einer der damaligen Projektleiter trug Prof. Dr. Kühne maßgeblich zum heutigen Erfolg des Qualitätsmanagements in der PTB bei. Anlässlich der 50. Arbeitsbesprechung des A-QM besuchte Prof. Dr. Kühne, heute Direktor des BIPM in Paris, die PTB und informierte die QM-Verantwortlichen der PTB, die Leiter der Abteilungen/ Stellen und das Präsidium zu aktuellen Entwicklungen, Chancen und Herausforderungen, die sich aus dem CIPM-MRA für die nationale und internationale Qualitätsinfrastruktur aus Sicht des BIPM ergeben. In einer regen Diskussion wurden die Aspekte des Ablaufs des Reviewprozesses im Rahmen des CIPM-MRA sowie die Rolle der Kompetenzbestätigung für metrologische Laboratorien erörtert. Ein Beitrag von Dr. Ulbig über Aufgaben, Struktur und Ziele des neuen deutschen Kalibrierdienstes (DKD) als technisches Komitee in der PTB rundete die Diskussionen ab.

¹⁾ <http://www.bipm.org/en/cipm-mra/>

50th meeting of PTB's Quality Management Committee (A-QM)

It is now more than 10 years ago that the internationally accepted requirements for the activities of calibration and testing laboratories were laid down in an international standard. This standard was to become the basis of a comprehensive re-orientation of PTB's quality management system. In order to introduce this quality management system on the basis of ISO/IEC 17025, first of all a project was created which embraced all the divisions of PTB. At the same time, a "Quality Management Committee" (A-QM) was founded as a body to steer and control quality management within PTB. The first meeting of this committee took place on 13 July 1999.

This was the starting point of extensive stock-taking, followed by an intensive phase in which the quality management system was set up. This development took place against the background of CIPM MRA¹⁾, and it was characterized by the willingness to integrate all fields of activity of PTB (i.e. PTB's four intertwined fields of business – "Fundamentals of Metrology", "Metrology for the Economy", "Metrology for Society" and "International Affairs") into the quality system. The aim was to achieve that, throughout PTB, as few things as possible should be regulated, formalism should be reduced and technical aspects should be regulated as closely to practice as possible. Prof. Dr. Kühne, who was one of the project managers at that time, contributed significantly to the success PTB's quality management system has today. On the occasion of the 50th meeting of the A-QM, Prof. Dr. Kühne – who is now Director of the BIPM in Paris – visited PTB and informed the Quality Managers, the Heads of the Divisions/Bodies and the Presidential Board of PTB about the current developments, opportunities and challenges resulting from the CIPM MRA for the national and the international quality infrastructure – from the perspective of the BIPM. In a lively debate, the following issues were discussed: the development of the review process within the scope of the CIPM MRA, and the significance the confirmation of competence has for metrological laboratories. A lecture by Dr. Ulbig on the tasks, the structure and the aims of the new German calibration service Deutscher Kalibrierdienst (DKD) as a technical committee within PTB rounded this discussion off.

Änderungen des Eichgesetzes und der Eichordnung

Das Eichgesetz in der Bekanntmachung vom 23. März 1992 wurde durch das „Gesetz zur Umsetzung der Dienstleistungsrichtlinie im Eichgesetz sowie im Geräte- und Produktsicherheitsgesetz und zur Änderung des Verwaltungskostengesetzes, des Energiewirtschaftsgesetzes und des Energieleitungsbaugesetzes“ vom 7. März 2011 geändert (BGBl. I S. 338). Durch dieses Gesetz wurde das Eichgesetz an die Vorgaben der Richtlinie 2006/123/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 über Dienstleistungen im Binnenmarkt (ABl. L 376 vom 27.12.2006, S. 36) angepasst. Dies betrifft die Vorschriften des § 10 über Wäger an öffentlichen Waagen, die mit der Niederlassungs- und Dienstleistungsfreiheit nach der Dienstleistungsrichtlinie nicht mehr vereinbar sind. Die weiteren Ausführungen sind in der Eichordnung festgelegt.

Die Vorschriften zu öffentlichen Waagen in Teil 10 der Eichordnung wurden durch die Fünfte Verordnungen zur Änderung der Eichordnung vom 6. Juni 2011 (BGBl. I S. 1035) geändert. Das Instrument der „öffentlichen Waage“ wurde erhalten, die Regelungen über die „öffentliche Bestellung“ des Wägers jedoch ersetzt durch Anforderungen an „Betreiber“ und „Betriebspersonal“. Die EU-Vorgaben zu im Ausland erworbenen Ausbildungs- und Befähigungsnachweisen wurden eingearbeitet. Die Beurkundung durch einen behördlich ausgegebenen Stempel wurde durch Unterschrift des bescheinigten Wägeregebnisses abgelöst. Die behördliche Überwachung der öffentlichen Waagen bleibt unverändert. Weiterhin wurden in dieser Änderungsverordnung, im Vorgriff auf eine umfassende, zeitlich aufwendige Neuregelung des Mess- und Eichrechts, die nicht mehr notwendigen Vorschriften gestrichen, Unstimmigkeiten bereinigt und neue EU-rechtliche Vorgaben umgesetzt. Dies betrifft insbesondere die Richtigstellung des Beginns der Eichgültigkeitsdauer für Messgeräte nach der MID, die auch mit Ablauf des Kalenderjahres beginnt. Auch die Regelungen bei einer Dauer unter einem Jahr wurden jetzt ausführlich formuliert. Die abweichende Eichgültigkeitsdauer

Amendments of the Verification Act and the Verification Ordinance

The Verification Act of 23 March 1992 was amended by the “Law on implementing the *Directive on Services* in the *Verification Act* and in the *Consumer Product Safety Act* and on the amendments to the *Administrative Costs Act*, the *Energy Industry Act* and the *Power Grid Expansion Act*” of 7 March 2011 (Federal Law Gazette I, p. 338). Through this law, the *Verification Act* was adapted to the requirements of *Directive 2006/123/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on services in the internal market* (Official Journal L 376 of 27 December 2006, p. 36). This applies to the provisions of Art. 10 regarding operators of public weighing machines. These provisions are no longer compatible with the *freedom of establishment* and with the *freedom to provide services* stipulated in the *Directive on Services*. Further details are laid down in the *Verification Ordinance*.

The provisions regarding public weighing machines in Art. 10 of the *Verification Ordinance* were changed by the *Fifth Ordinance for the amendment of the Verification Ordinance* of 6 June 2011 (Federal Law Gazette I, p. 1035). The weighing instrument “public weighing machine” remains unaltered; the regulations concerning the “public appointment” of the operator were, however, replaced by requirements for the “operator” and the “operating staff”. The EU provisions concerning certificates of training and of proficiency acquired abroad were included. “*Certification by means of an official stamp*” was replaced by “*Certification by signature of the weighing result*”. The official surveillance of public weighing machines remains unaltered. Furthermore, in order to anticipate a time-consuming new regulation of the legislation on measurements, weights and measures, provisions which were no longer necessary were deleted, inconsistencies were corrected and new EU provisions were implemented. This concerns, in particular, the correction of the beginning of the validity period of verification for measuring instruments according to the MID, which also starts after the expiry of the calendar year. Also, the regulations for a period of validity of less than a year have been laid down in detail now. The deviating validity period of verification for new gas meter categories has been included in Annex B, and the references to EU directives and



er für neue Gaszählerarten wurde in Anhang B aufgenommen und Verweise auf EU-Richtlinien und Vorschriften angepasst. Die bestehenden Ausnahmen für Wegstreckenzähler in Mietkraftfahrzeugen wurden erweitert und Selbstfahrervermietfahrzeuge vollständig von der Eichpflicht ausgenommen. Die Ausnahmevoraussetzungen für Messwandler wurden auf 110 kV-Übertragungsnetze erweitert.

Bericht der Kommission an das Europäische Parlament über die Umsetzung der Europäischen Messgeräte Richtlinie MID (2004/22/EG) und die Aufhebung der EWG-Richtlinien nach dem alten Konzept

Die Kommission schlägt dem Europäischen Parlament nach einem umfangreichen öffentlichen Konsultationsverfahren vor, die MID zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht zu ändern. Sie begründet ihren Vorschlag damit, dass es zwar nützliche Anregungen für neue Vorschläge gegeben habe, aber keinen Hinweis darauf, dass wichtige Punkte in der MID fehlen. Aus Sicht der Kommission ist es zu früh, die MID bereits nach 4,5 Anwendungsjahren zu ändern. Weitere als die über den Messgeräteausschuss zulässigen technischen Anpassungen (Artikel 16: Fehlergrenzen, Genauigkeitsklassen, Nennbetriebsbedingungen, Störfestigkeit) hinausgehende Änderungen könnten zu einer regulatorischen Verlagerung und Unsicherheit auf dem Markt führen. Im Übrigen verweist sie darauf, dass hinsichtlich der technisch komplexen und detaillierten Änderungsvorschläge die Möglichkeiten, die Normen und Leitlinien bieten, noch nicht voll ausgeschöpft worden sind. Der vollständige Bericht ist unter http://ec.europa.eu/enterprise/index_de.htm über die Stufen „Industriebranche“, „Amtliches Messwesen und Fertigpackungen“, „Messgeräte“, „Report on MID“ als COM/2011/357/FINAL abrufbar. Als Ergebnis des Konsultationsverfahrens sieht die Kommission zur Zeit folgende Prioritäten:

- Aufnahme des neuen Rechtsrahmens (Beschluss 768/2008/EG) in die MID (Omnibus-Verfahren)
- Bessere Information und Anleitung für notifizierte Stellen und Behörden sowie eine bessere Zusammenarbeit mit ihnen, um eine kohärente Anwendung der Richtlinie zu gewährleisten

provisions have been adapted. The exceptions which exist for odometers in hire vehicles have been extended, and vehicles for self-drive hire are now completely exempt from mandatory verification. The conditions for the exemption of instrument transformers were extended to 110 kV transmission grids.

Report from the Commission to the European Parliament on the implementation of the Measuring Instruments Directive (MID) 2004/22/EC and the repeal of Old Approach EEC Directives

In its report to the European Parliament, the Commission recommends, after an exhaustive procedure of public consultation, not modifying the MID yet. It justifies its recommendation with the fact that, in spite of useful suggestions for new proposals, there is still no concrete reason to think that essential points are lacking in the MID. In the Commission's opinion, it is too early to amend the MID – after only 4.5 years of application. Any further amendments that go beyond the technical adjustments permitted by the Measuring Instruments Committee (Art. 16: maximum permissible errors, accuracy classes, rated operating conditions, disturbances) could evoke a regulatory shift and uncertainty in the market. As far as the technically complex and detailed proposals for amendments are concerned, the Commission points out that the possibilities which the existing standards and directives offer have not been fully exploited yet. The full report can be downloaded as COM/2011/357/FINAL at http://ec.europa.eu/enterprise/index_en.htm following the path: “Industry sectors” > “Legal metrology and pre-packaging” > “Measuring instruments” > “Report on MID”. The Commission currently sees the following priorities as a result of the consultation procedure:

- Introduce the new legislative framework (Decision No. 768/2008/EC) into the MID (omnibus procedure).
- Enhance information, cooperation and guidance to notified bodies and authorities with the aim of ensuring a coherent application of the Directive.

- Koordinierung der Marktüberwachung in Form gemeinsamer Maßnahmen, um die für die Marktüberwachung zur Verfügung stehenden Ressourcen effizienter einzusetzen
- Unterstützung der Interessengruppen bei der Erstellung von Leitlinien
- Folgeabschätzungen für alle Anregungen für neue Vorschläge in Zusammenarbeit mit den Interessengruppen und im Einklang mit der „Intelligenten Regulierung“ in der EU (http://ec.europa.eu/enterprise/policies/smart-regulation/index_de.htm).
- Coordinate market surveillance notably in the form of common actions in order to more efficiently apply resources which are available for market surveillance.
- Aid stakeholders in establishing guidelines.
- Impact-assess any suggestions for new proposals with stakeholders in line with smart regulation in the EU (http://ec.europa.eu/enterprise/policies/smart-regulation/index_en.htm).

Rücknahme der noch bestehenden EWG-Richtlinien nach dem alten Ansatz

Im Ergebnis der öffentlichen Konsultation sah die Kommission keinen Grund, die noch bestehenden EWG-Richtlinien weiter aufrechtzuhalten oder die betroffenen Gerätearten bzw. Messverfahren (Gewichte, Vermessung von Schiffsbehältern, Schüttdichte von Getreide, Kaltwasserzähler für Schmutzwasser, Alkoholometer und Aräometer für Alkohol, Luftdruckmessgeräte für Kraftfahrzeugreifen) in die Europäische Messgeräte richtlinie (MID) aufzunehmen. Durch die Richtlinie 2001/17/EU sind inzwischen die Aufhebung der EWG-Richtlinie für die Vermessung von Schiffsbehältern zum 01.07.2011 und die Aufhebung der übrigen Richtlinien zum 01.12.2015 verfügt worden.

Repeal of the still existing Old Approach EEC Directives

In view of the results of the procedure of public consultation, the Commission saw no reason for maintaining the still existing EEC directives or for including the instrument categories or measurement procedures concerned (weights, measuring of ship tanks, mass of grain, cold water meters for waste water, evidential breath analyzers and hydrometers for alcohol, tyre pressure gauges) in the Measuring Instruments Directive (MID). Through Directive 2001/17/EU, the repeal of the *EEC directive for the measuring of ship tanks* has meanwhile been enacted as of 1 July 2011, and the repeal of the other directives is to come into effect as of 1 December 2015.



Qualitätsinfrastruktur für die Trinkwasserversorgung

Wasser, besonders Trinkwasser, ist für alle Menschen eine essenzielle Ressource und Nahrungsmittel zugleich. In vielen Gebieten ist seine Verfügbarkeit seit jeher begrenzt; in anderen nimmt sie vor dem Hintergrund sich verändernder klimatischer Bedingungen stetig ab. Die Weltgesundheitsorganisation führt 80 % aller Krankheiten in Entwicklungsländern auf mangelhafte Wasser- und sanitäre Basisversorgung sowie auf fehlende Hygieneerziehung zurück. Insbesondere bei Kindern verlaufen diese Krankheiten oft tödlich. Das 7. Millennium-Entwicklungsziel besagt: „...bis 2015 den Anteil der Menschen um die Hälfte zu senken, die keinen nachhaltigen Zugang zu einwandfreiem Trinkwasser und grundlegenden sanitären Einrichtungen haben.“ Der vernünftige Umgang mit und die Sicherung der Qualität dieser knappen Ressource sind folglich von herausragender Bedeutung. Vor dieser großen Aufgabe stehen weltweit immer noch viele Entwicklungs- und Schwellenländer. Auch das Engagement der deutschen und der internationalen Entwicklungszusammenarbeit spiegelt diese Herausforderung wider.

Die PTB führt zum Thema Wasser derzeit zwei Kooperationsvorhaben zur Förderung der Qualitätsinfrastruktur für die Trinkwasserversorgung in den beiden südamerikanischen Ländern Bolivien und Peru durch. Ziel ist die Stärkung der nationalen Akteure in den Län-

Quality infrastructure for the supply of drinking water

For all human beings, water – especially drinking water – is both, an essential resource and a source of nutrition. In many regions of the world, water has always been scarce, whereas in other regions, its availability is constantly decreasing due to changing climatic conditions. The World Health Organization (WHO) attributes 80 % of all diseases in developing countries to a poor water supply and to poor basic sanitation, as well as to a lack of education in matters of hygiene. Especially for children, these diseases are often lethal. The aim of the 7th Millennium Development Goal is to „halve, by 2015, the proportion of people without sustainable access to safe drinking water and basic sanitation.“ For all these reasons, it is of essential importance to handle this scarce resource responsibly and to ensure its quality. This still represents a great challenge for developing countries and countries in transition worldwide, which is also reflected by the commitment of the German and international development cooperation.

With regard to water, PTB is currently carrying out two cooperation projects which are aimed at supporting the quality infrastructure for the supply of drinking water in two South American countries: Bolivia and Peru. The objective of these projects is to strengthen the national stakeholders, in order to contribute to a better surveillance of drinking water and to increase



Trinkwasseraufbereitungsanlage in Arequipa, Peru

Drinking water plant in Arequipa, Peru

dern, um zu einer besseren Überwachung und effizienteren Verteilung des Trinkwassers beizutragen. Dabei stehen insbesondere die Themen Verbrauchsmessung und Qualitätskontrolle im Vordergrund.

Die PTB arbeitet vor allem mit den nationalen Metrologie-Instituten und den Akkreditierungsstellen beider Länder zusammen, um für den Wassersektor relevante Dienstleistungen aufzubauen und zu stärken. Diese reichen beispielsweise von der Kalibrierung von Messinstrumenten (z. B. Referenzwasserzähler) über die Herstellung und Zertifizierung chemischer Referenzmaterialien bis hin zur Durchführung von Ringvergleichen und der Akkreditierung von Prüflaboratorien. Darüber hinaus wird die Vernetzung der Akteure der Qualitätsinfrastruktur mit den Akteuren des Wassersektors (Verbrauchern, politischen Entscheidungsträgern, Überwachungsbehörden, Wasserversorgern und Wasseranalyselaboratorien) gestärkt. So kann das bestehende Dienstleistungsangebot effektiver genutzt werden und der Ausbau sich stärker am steigenden Bedarf orientieren.

Erreicht wird dies durch Beratung, Ausbildung und Schulung von Personal, Organisation von Seminaren, Informations- und Fortbildungsveranstaltungen, Gerätebeschaffung und Aufbau von Laborinfrastrukturen sowie Unterstützung von Vergleichsmessungen und Ringvergleichen. Hierbei sind Fachleute aus verschiedenen PTB-Abteilungen involviert, aber auch externe Experten, wie z. B. Personal von Wasserversorgern.

Die Erfolgsbilanz der Zusammenarbeit lässt sich wie folgt belegen:

Das peruanische Metrologie-Institut verfügt inzwischen über ein Durchflusslabor, das Wasserzähler bis zu einer Nennweite von 150 mm bei Durchflüssen bis 120 m³/h mit internationaler Rückführung kalibrieren und Bauartzulassungen gemäß OIML R-49 durchführen kann. Mit diesen Kalibriermöglichkeiten können die Messunsicherheit der existierenden Wasserzähler über Jahre kontrolliert und so das Monitoring des Verbrauchs und der Verluste effektiver gestaltet sowie das Vertrauen in die Wasserabrechnung gestärkt werden. Bei einer Bauartzulassung wird geprüft, ob die Konstruktion und Beschaffenheit eines Wasserzählers den geltenden Vorschriften entsprechen. Eine Zulassung jedes einzelnen Wasserzählers

the efficiency of its distribution. In this context, two issues take main priority: measuring the consumption of water and controlling its quality.

PTB is cooperating, in particular, with the national metrology institutes and the accreditation bodies of these two countries with the aim of setting up and strengthening services that are of vital importance for the water sector. These services range from the calibration of measuring instruments (e.g. reference water meters) and the production and certification of chemical reference materials, to the organization of interlaboratory comparisons and the accreditation of testing laboratories. In addition, the connections between the stakeholders of the quality infrastructure and those of the water sector (consumers, political decision-makers, supervisory authorities, water utilities and laboratories for water analysis) are strengthened. In this way, the existing spectrum of services can be used more effectively, and its expansion will take the increasing needs better into account.

All this is achieved by means of consultancy, the education and training of staff, organizing seminars as well as informational and educational events, acquiring equipment, developing an infrastructure of laboratories, and supporting comparison measurements and interlaboratory comparisons. Experts from different departments of PTB, but also external experts, e.g. the staff of water utilities, are involved in these activities.

The success of this cooperation can be documented by the following examples:

Peru's national metrology institute is now equipped with a flow laboratory which can calibrate water meters up to a nominal diameter of 150 mm at flowrates up to 120 m³/h with international traceability. Furthermore, Peruvian metrologists have been enabled to perform type approvals according to OIML R-49. With these calibration capabilities, the measurement uncertainty of the existing water meters can be checked over several years; thus, it has become possible to monitor the consumption and the water losses more effectively and to strengthen confidence in the measuring and billing of water consumption. In a type approval, tests are made as to whether the design and the properties of a water meter comply with the pro-



ist mit einer erteilten Bauartzulassung nicht mehr erforderlich.

In Peru und in Bolivien bieten die Metrologie-Institute erste national hergestellte Referenzmaterialien zur Rückführung von Basisparametern der Trinkwasseranalytik an. Referenzmaterialien werden genutzt, um die Vertrauenswürdigkeit der Messungen und Analysen zu sichern. In Bolivien wurden mit Unterstützung der PTB 2010 und 2011 jeweils Ringvergleiche zur Trinkwasseranalytik mit über 50 teilnehmenden Laboratorien erfolgreich durchgeführt. Ringvergleiche ermöglichen den Laboratorien, einen Nachweis ihrer Kompetenz zu liefern oder eigene Schwachstellen zu erkennen. Dies und ein erweitertes Schulungsangebot haben dazu geführt, dass es in beiden Ländern mehr akkreditierte Wasserlaboratorien gibt.

Trotz der erreichten Fortschritte gibt es in beiden Ländern weiterhin große Schwierigkeiten auf dem Weg, einen möglichst großen Teil der Bevölkerung über 24 Stunden täglich mit qualitativ einwandfreiem Trinkwasser zu versorgen. Dabei spielen rückgeführte Messungen und vertrauenswürdige, über ein Qualitätsmanagementsystem abgesicherte Analysen selbstverständlich auch in Zukunft eine große Rolle.

Aus entwicklungspolitischer Sicht ist entscheidend, dass die Verbesserung der Qualität der Trinkwasserversorgung nachweislich direkt mit einer Verbesserung der Lebensqualität sowie einer Verringerung von Krankheiten und letztlich auch von Armut zusammenhängt. Außerdem wird die sinnvolle Nutzung der wertvollen Ressource Wasser sichergestellt. Denn neben den wirtschaftlichen Erfordernissen für die Versorgungsunternehmen ist im Falle beider Andenländer ein verantwortungsvoller Umgang mit Wasser angesichts abschmelzender Gletscher und geringerer Niederschläge eine immer größer werdende Herausforderung.

visions that are currently valid. Once a type approval has been issued, it is no longer necessary to obtain an approval for each single water meter.

The metrology institutes of Peru and Bolivia are now qualified to offer the first nationally produced reference materials for basic parameters of drinking water analysis. Reference materials are used to ensure traceability and therefore the trustworthiness of measurements and analyses. In Bolivia, interlaboratory comparisons for drinking water analysis were successfully organized in 2010 and 2011 with the support of PTB; the participation of more than 50 laboratories was achieved. Interlaboratory comparisons allow the participants to give proof of their competence and to detect their weaknesses. Due to these comparisons, and due to an extended offer of training courses, the number of accredited water laboratories has increased in both countries.

Despite this progress, both Bolivia and Peru are still facing great difficulties in providing safe drinking water 24 hours a day for an ever growing part of their population. Traceable measurements and analyses whose trustworthiness is guaranteed by means of a quality management system will certainly play an important role also in the future.

From the development policy point of view, it is of crucial importance that the improvement in the quality of the drinking water supply effectively goes hand in hand with an improvement in the quality of life as well as with a reduction of diseases and, ultimately, also of poverty. Furthermore, it can be ensured that the precious resource „water“ is used in a responsible way. Responsible water management is becoming an ever increasing challenge in both South American countries, not only from an economical point of view for the water utilities, but also against the background of melting glaciers and diminishing precipitation.

Im Takt der Zeit



Auf der Suche nach interessanten Orten für besondere Konzerterlebnisse wurden die Niedersächsischen Musiktage des Jahres 2011 in der PTB fündig. Da die Musiktage in diesem Jahr unter dem Motto „Die Zeit“ standen, lag es nahe, an die PTB zu denken. Und so verwandelte sich das weitläufige Institutsgelände in Braunschweig am 24. September 2011 zu einem musikalischen Erlebnisparkours der besonderen Art. Das Publikum erlebte in einer langen Nacht sechs verschiedene Programmpunkte an unterschiedlichen Orten. Immer drehte sich dabei alles um das Phänomen der „Zeit“, angefangen von einem Live-Experiment zur eigenen Zeitwahrnehmung (bei unterschiedlich schnell „tickender“ Musik) über zehn Kürzestkompositionen für Saxophonquartett in der Länge des aktuellen 100-Meter-Weltrekords bis hin zum spanischen Ensemble „Companyia la tal“, das in Anlehnung an die Commedia dell’Arte ein Puppenspiel inmitten einer großen Uhr-Installation aufführte. Auch im Programm: 100 unterschiedlich schnell tickende Metronome, das Ensemble „Bach, Blech und Blues“ und der Chor „Ensemble Officium“ mit „zeitlos“-mittelalterlichen Gesängen, der an einem ganz besonderen Ort auftrat: in einem kathedralenartigen Raum des ehemaligen PTB-Forschungsreaktors. Insgesamt ein Abend, der allen Beteiligten und allen Gästen positiv im Gedächtnis (auch dies ein Zeiteffekt) bleiben wird.



In time with time

While searching for interesting places for special concert experiences, the Niedersächsische Musiktage des Jahres 2011 (“The 2011 Music Festival of Lower Saxony”) found what they were looking for at PTB. Since the motto of the music festival this year was “time”, PTB suggested itself. So on 24 September 2011, the spacious institute premises in Braunschweig were transformed into a special kind of musical fun house. In one long night, the audience experienced six different programme points at different places. Everything always centred on the phenomenon of “time”, beginning with a live

experiment on one’s own perception of time (with music “ticking” at different tempi), continuing with ten shortest compositions for saxophone quartet in the length of the current 100-metre world record, and then on to the Spanish ensemble “Com-



panyia la tal”, which staged a puppet show in the style of the Commedia dell’Arte in the midst of a large clock setup. Also in the programme: 100 metronomes ticking at different tempi, the “Bach, Blech und Blues” ensemble and the “Ensemble Officium” choir with “timeless” medieval songs, which performed at an exceptional place: in a cathedral-like room of the former PTB research reactor. Altogether, an evening which will remain a memorable experience for all participants and all guests (this, too, is a “time effect”).



Promotionen 2011 • Doctorates in 2011

Shekhar Priyadarshi (FB 2.5)	Generation and coherent control of all-optically induced single-color currents in (110)-oriented GaAs quantum wells
Pascal Ortwein (FB 3.2)	In situ Laserspektroskopie für Vergasungs- und Verbrennungsprozesse
Tasanee Priruenrom (FB 3.3)	Development of pressure balances for absolute pressure measurement in gases up to 7 MPa
Ahmed Abd-Elmageed (FB 4.1)	Detector-based traceability chain for spectral irradiance using tunable laser-based facility at PTB
Thorsten Feldmann (FB 4.4)	Advances in GPS based time and frequency comparisons for metrological use
Anatoly Sherman (FB 4.5)	Phase-resolved investigation of fast third-order optical nonlinearities in photonic devices at telecommunication wavelengths
Börge Hemmerling (QUEST)	Towards direct frequency comb spectroscopy using quantum logic
Thomas Krah (FB 5.3)	Mikrotasterarrays zur parallelisierten Messung von Mikrostrukturen
Eike Hohmann (FB 6.5)	Charakterisierung von Neutronen-Strahlungsfeldern hinter Abschirmungen an Hochenergiebeschleuniger
Andrea I. Matschulat (FB 7.2)	Entwicklung neuer Sonden für bioanalytische Anwendungen der oberflächenverstärkten Raman-Streuung
Thada Keawprasert (FB 7.3)	Monochromator-based absolute calibration of radiation thermometers for thermodynamic temperature measurements of high-temperature fixed-points
Oliver Büker (FB 7.6)	Untersuchungen zur Darstellung und Weitergabe der Skala „Volumen von Wasser“ mithilfe laseroptischer und konventioneller Messverfahren
Stefan Hartwig (FB 8.2)	Konzeption und Realisierung eines Messsystems für Grundlagenexperimente in der Niedrigfeld-Magnetresonanz



Zahlen und Fakten • Figures and facts

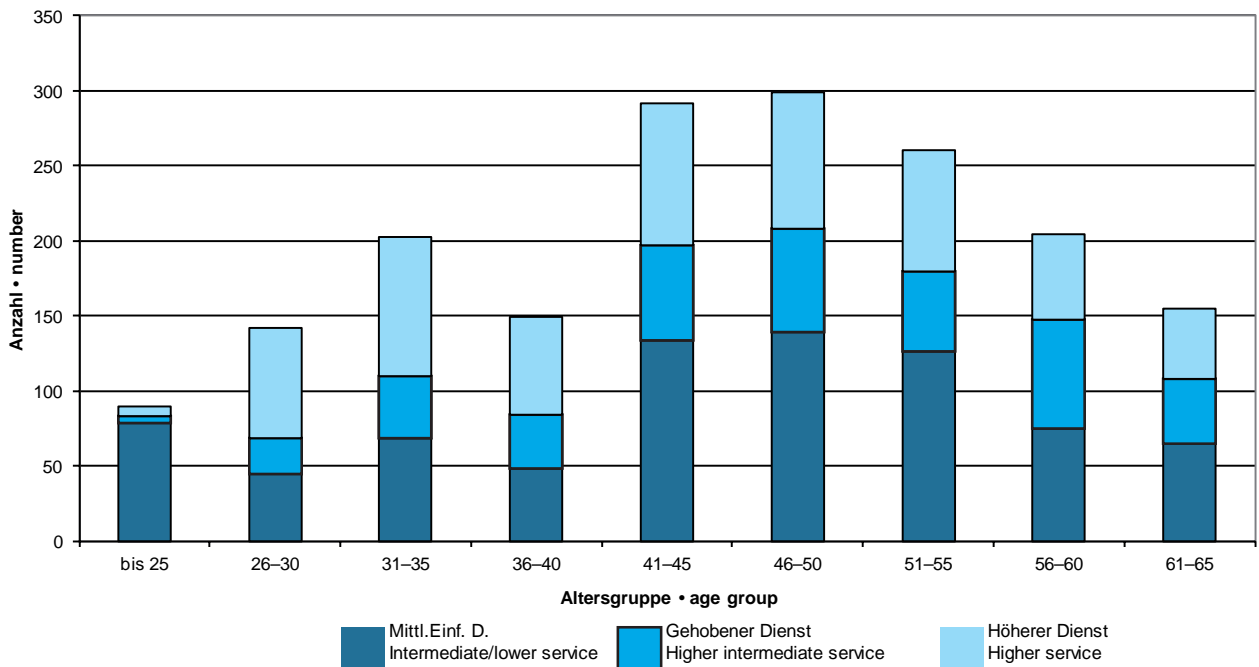
Personal: Entwicklung • Staff: development

Personelle Entwicklung von 2002 bis 2011 (Stand: 31. Dezember 2011) • Development of staff
 a) unbefristet • unlimited in time b) zeitlich befristet • limited in time

Beschäftigungsverhältnis	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
a)										
Beamte • civil servants	507	506	508	510	515	523	517	513	537	535
Angestellte • employees	767	744	727	692	863	833	830	831	795	779
Arbeiter • workers	208	207	193	196	—*	—	—	—	—	—
gesamt • total	1482	1457	1428	1398	1378	1356	1347	1344	1332	1314
b)										
Auszubildende • trainees	138	144	158	159	150	136	134	135	134	131
befristet Beschäftigte • temporary staff	53	52	61	69	66	98	110	175	230	264
Drittmittelpersonal • staff members financed by third parties	106	122	105	109	169	162	172	185	194	216
Mitarbeiter gesamt staff member total	1779	1775	1752	1735	1763	1752	1763	1839	1890	1925

* 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 2011)

	BS	Berlin	
Duales Studium Elektro- technik im Praxisverbund	8 (4)	--	Dual studies in electrical engineering in a practice union
IT-Systemelektroniker	18 (6)	--	information and telecommunication technologists
Elektroniker/in für Geräte und Systeme	29 (9)	--	electronics technician for devices and systems
Physiklaboranten	20 (6)	--	laboratory technicians, physics
Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik	13 (3)	--	electronics engineer for electrical and building services engineering
Feinwerkmechaniker Fachrichtung Feinmechanik	14 (4)	4 (0)	precision instrument maker speciality: precision mechanics
Fotografen	2 (2)	--	photographers
Mediengestalter	2 (1)	--	media designer
Tischler	--	4 (0)	joiners
Systeminformatiker	--	10 (4)	IT systems technicians
Fachangestellte für Büro- kommunikation	--	2 (0)	specialists in office communications
Verwaltungsfachangestellte	--	5 (3)	public administration employee
gesamt	106 (35)	25 (7)	total

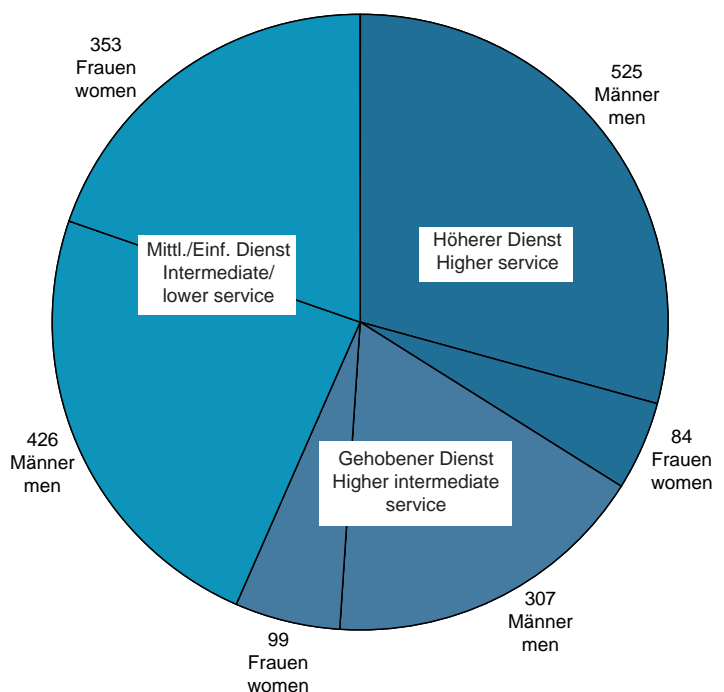
Die PTB gehört zu den größten Ausbildungsbetrieben in der Region. Gegenwärtig sind 131 Auszubildende bei der PTB angestellt. In Klammern sind die Neueinstellungen im Berichtsjahr angegeben.

The PTB is among the most important institutions of the region which provide training. 131 trainees are at present employed by PTB. The figures in parentheses indicate fresh engagements in the year under review.

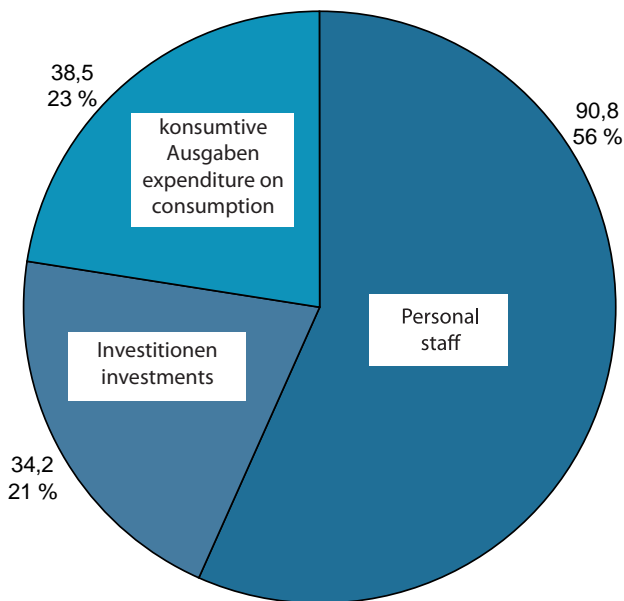
Personal: Laufbahn Staff • civil service career

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



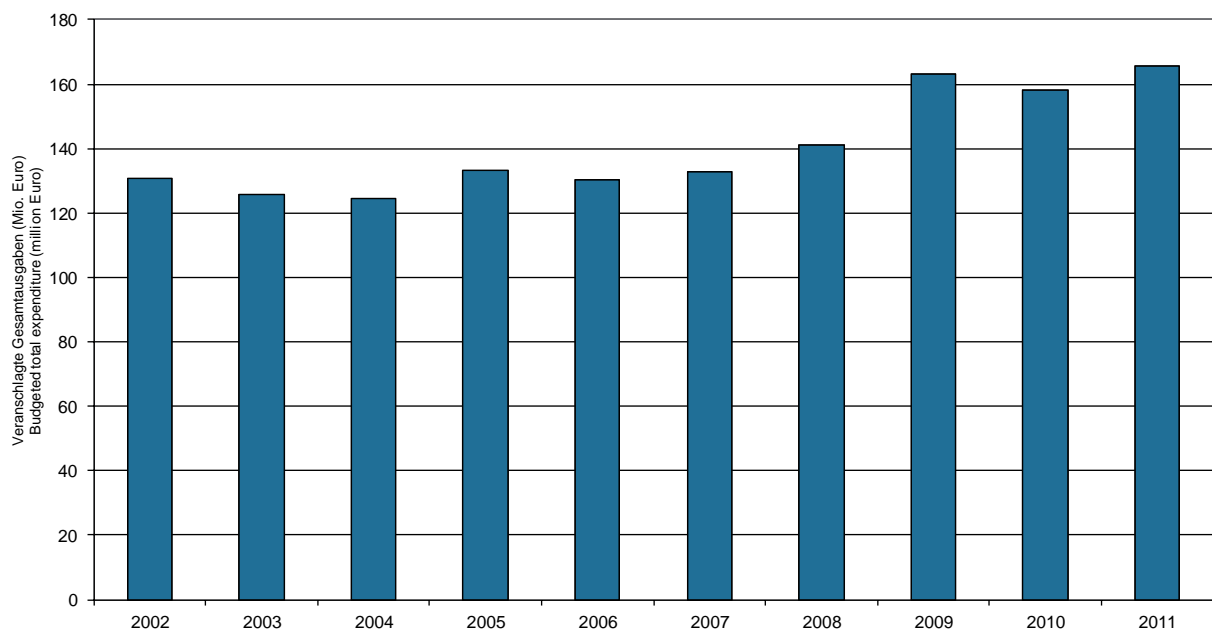
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. Euro). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

The chart shows the break-down of the budgeted expenditure (in million Euro) 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 Euro)

Haushaltsmittel	2009	2010	2011	budgetary means
Personalausgaben	85,8	88,9	90,8	staff costs
Investitionen (Bau und Geräte)	37,0	32,6	38,5	investments (building activities and instruments)
Zuweisungen und Zuschüsse	0,6	1,8	2,2	allocations and grants
konsumtive Ausgaben	39,9	35,0	34,3	expenditure on consumption
gesamt	163,0	158,3	165,8	total

Haushalt: Entwicklung • Budget: development

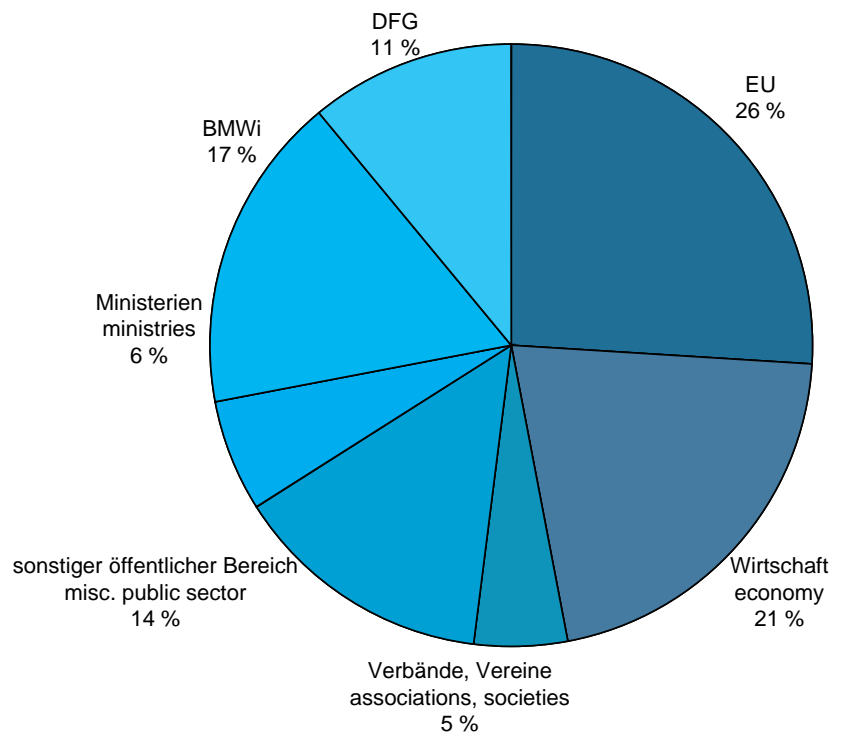


Entwicklung der Gesamtausgaben im PTB-Haushalt in den letzten zehn Jahren. Development of the total expenditure of the PTB budget in the past ten years.

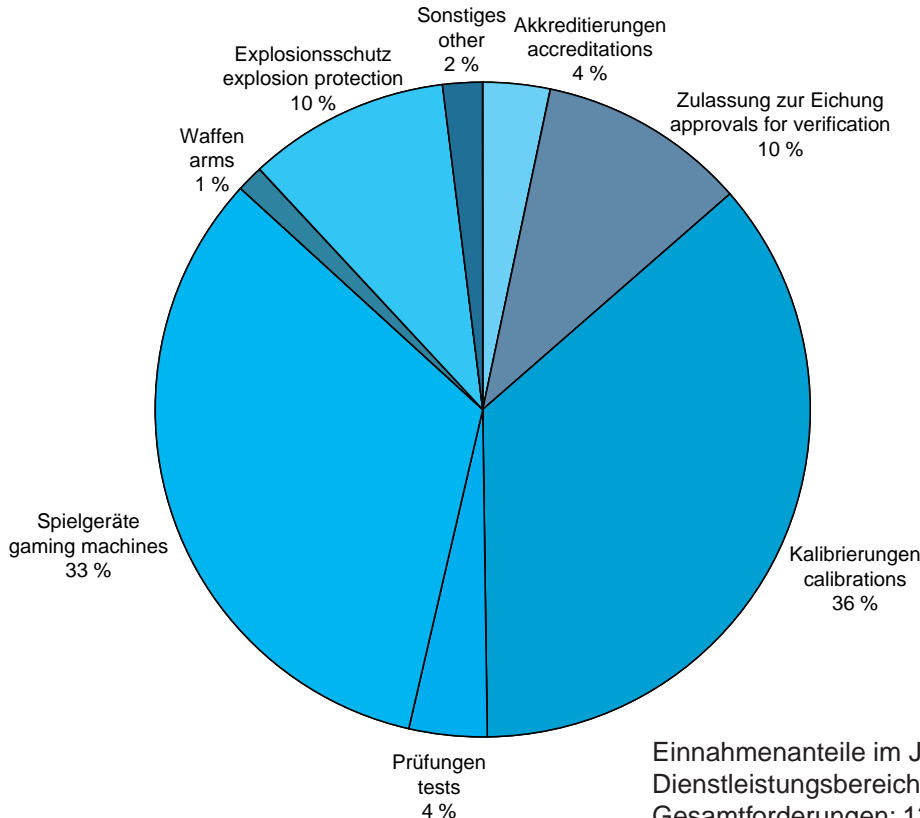
Drittmittel: Forschungsprojekte • Third party funds: research projects

Die Drittmittel für Forschungsvorhaben summieren sich 2011 auf 12,1 Mio. Euro. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Insgesamt wurden im Berichtsjahr 20,2 Mio. Euro für 486 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) verwendet (davon 3,6 Mio. Euro für 97 Projekte in Berlin).

In 2011, the third-party funds for research projects added up to a total of 12.1 million Euro. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources. In the year under review, a total of 20.2 million Euro were used for 486 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 3.6 million Euro of these for 97 projects in Berlin.



Einnahmenanteile der Dienstleistungsbereiche • Income shares of the service centers



Einnahmenanteile im Jahr 2011 der verschiedenen Dienstleistungsbereiche der PTB. Gesamtforderungen: 13,18 Millionen Euro.

Income distribution of 2011 among the various service sectors of PTB. Total receivables: 13.18 million euro.

Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures

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

... in Braunschweig		2009	2010	2011	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	27 851	26 700	27 100	electrical energy
Wärme	MWh	21 840	24 100	24 700	heat
Gas	m ³	31 705	31 300	32 300	gas
Wasser	m ³	82 100	78 900	80 400	water
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	58	54	84	refuse-like
recycelt	t	356	273	227	recycled
zur Beseitigung	t	16	190	21	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	80 443	104 600	80 300	waste disposal costs (approx.)

... in Berlin		2009	2010	2011	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	7028	8050	8100	electrical energy
Gas	m ³	48 200	21 400	18 900	gas
Wasser	m ³	25 800	32 400	32 700	water
Helium, flüssig	l	63 240	48 600	49 800	helium, liquid
Stickstoff, flüssig	l	66 149	48 950	43 800	nitrogen, liquid
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	78	58	46	refuse-like
recycelt	t	54	31	51	recycled
zur Beseitigung	t	5	3	6	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	21 500	13 900	15 700	waste disposal costs (approx.)



PTB-Seminare im Jahr 2011 • PTB-Seminars in 2011

260. PTB-Seminar (21.–22. März 2011)
Berechnung der Messunsicherheit – Empfehlungen für die Praxis

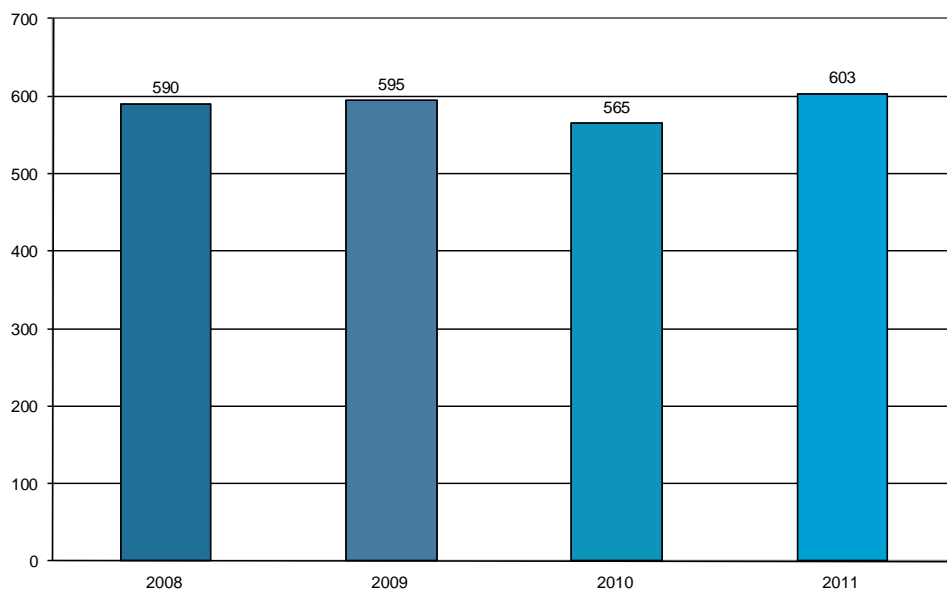
263. PTB-Seminar (17. November 2011)
Topographische Dickenmessung transparenter Polymerschichten

261. PTB-Seminar (18. Mai 2011)
Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich

264. PTB-Seminar (3. November 2011)
Seminar Leistungsmesstechnik

262. PTB-Seminar (27.–28. Oktober 2011)
EUV Metrology – Messmöglichkeiten der Metrology Light Source der PTB

265. PTB-Seminar (30. November bis 1. Dezember 2011)
Protection of Measurement Data in Legal Metrology and Related Challenges



Veröffentlichungen • Publications

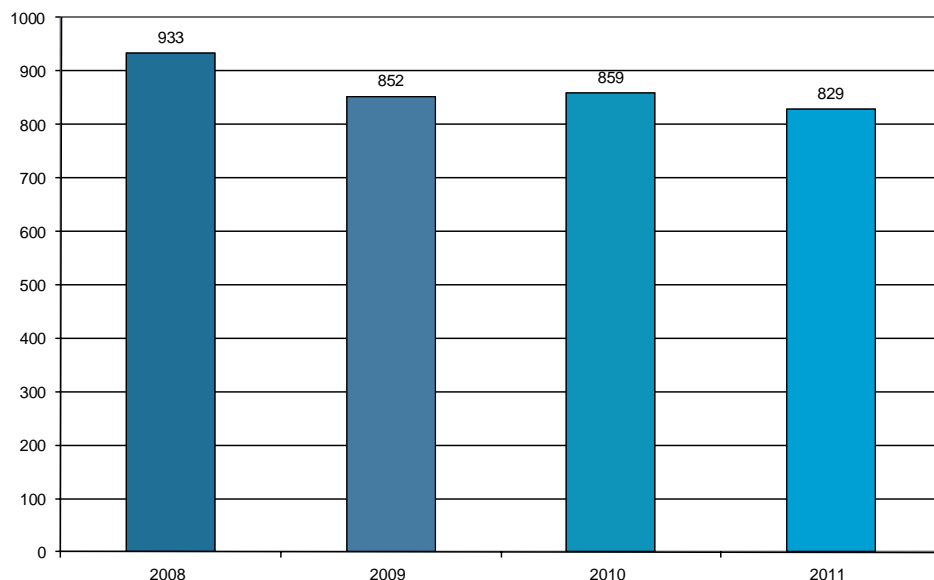
Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 2008 bis 2011 (vgl. Datenbank „PTB-Publica“ im Internet)

Number of publications by PTB staff members (in scientific journals, books, conference digests, etc.) between 2008 and 2011 (cf. database “PTB-Publica” on the web)

Vorträge • Lectures

Anzahl der auswärtigen Vorträge, die PTB-Mitarbeiter/innen in den Jahren 2008 bis 2011 gehalten haben

Number of lectures held by PTB staff members outside PTB between 2008 and 2011



Projektpartner der PTB

PTB's project partners



Internationale Zusammenarbeit

Der Fachbereich *Technische Zusammenarbeit* der PTB arbeitet in fast 50 Projekten. Direkt oder indirekt werden mehr als 80 Entwicklungs- und Schwellenländer erreicht. Die Projektarbeit umfasst alle Elemente der Qualitätsinfrastruktur. Der Schwerpunkt liegt auf der Systemberatung und der fachlich-technischen Beratung. Die Finanzierung erfolgt zum größten Teil durch das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ). Im Jahr 2011 wurden 18 Länder durch 27 bilaterale Projekte beim Aufbau ihrer Qualitätsinfrastruktur unterstützt. 25 Projekte verfolgen einen regionalen oder sektoralen Ansatz. Der Projektmittelabfluss im Jahr 2011 betrug 7,4 Mio. Euro. Fast 2100 Teilnehmer aus 76 Entwicklungs- und Schwellenländern konnten an 120 speziellen Fortbildungsseminaren in Fachinstituten in Deutschland und anderen Ländern durch Projektförderungen teilnehmen. Es wurden 222 Stipendiaten aus 65 Ländern insgesamt mehr als 70 Monate in der PTB, in den Eichbehörden der Bundesländer, der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), in Firmen und Universitäten, in Laboratorien der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) und in metrologischen Staatsinstituten fortgebildet.

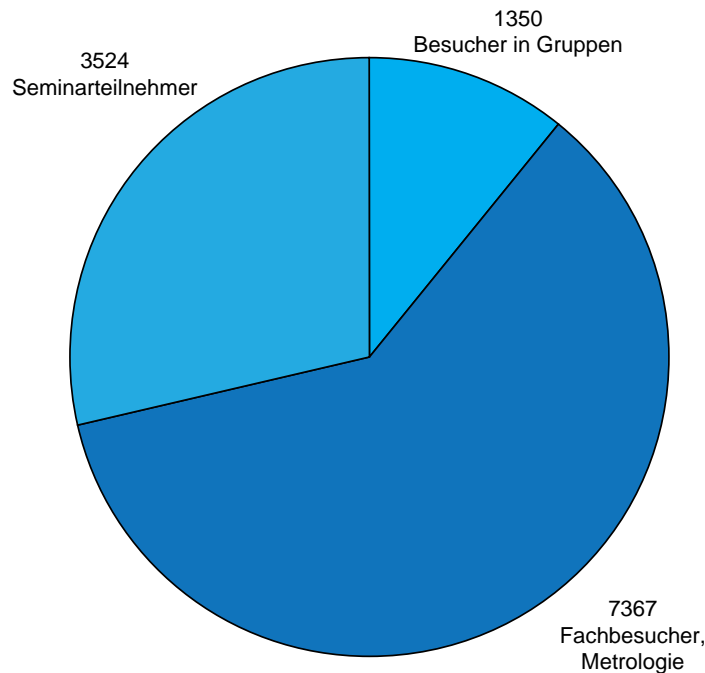
International Cooperation

The Department Technical Cooperation of PTB is working on almost 50 projects. Directly or indirectly, more than 80 developing and newly industrialized countries are reached. The project work encompasses all elements of the quality infrastructure. The main focus is on system consulting and specialist-technical consulting. Financing is effected for the most part by the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development. In 2011, 18 countries were supported in the setting up of their quality infrastructures by 27 bilateral projects. 25 projects follow a regional or sectoral approach. The project funds outflow in 2011 amounted to EUR 7,4 million. Almost 2100 participants from developing and newly industrialized countries were able to participate in 120 special advanced training seminars in technical institutes in Germany and other countries through project funding. 222 scholarship holders from 65 countries were trained for more than 70 months at PTB, in the verification authorities of the federal states, the Federal Institute for Materials Research and Testing, in companies and universities, in laboratories of the Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) and in state metrological institutes.

Gastwissenschaftler, Gäste und Besucher

Im letzten Jahr kamen 13 428 Besucher aus aller Welt in die PTB (Standort Braunschweig). Den größten Anteil bildeten die metrologischen Fachbesucher aus Wissenschaft und Wirtschaft (7367) sowie die Teilnehmer an unterschiedlichsten Seminaren, Tagungen und Kolloquien (3524). Auch der allgemeine Besucherdienst der PTB im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit fand wie gewohnt regen Zuspruch. Rund 1350 Besucher (in 68 Gruppen) schauten den Wissenschaftlern in Braunschweig über die Schultern. Hinzu kamen 40 Grundschulklassen (insgesamt über 1000 Schüler), die im WissensForscher-Labor der PTB physikalische Experimente selbst durchführten.

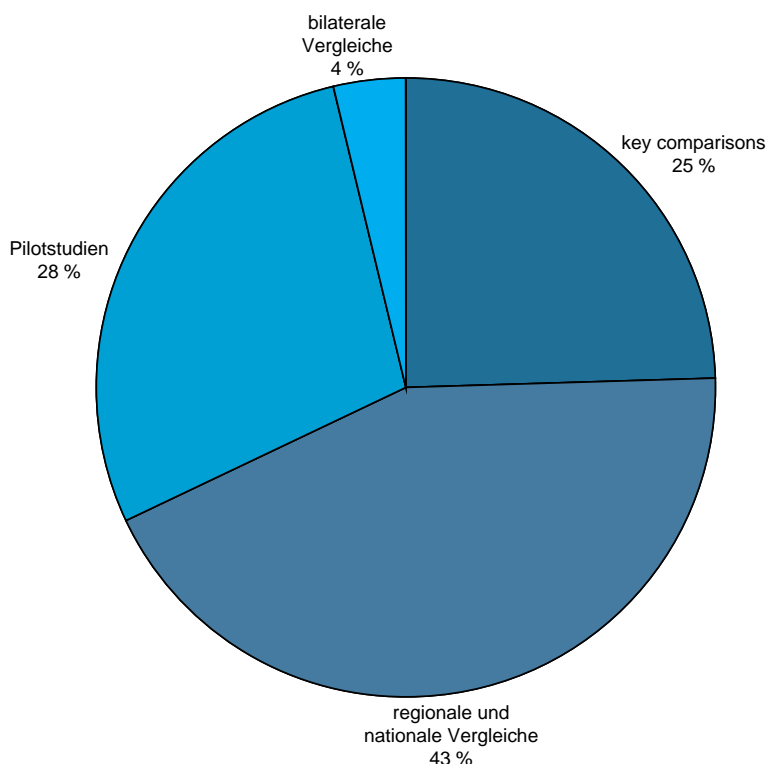
Last year 13 428 visitors from all over the world came to PTB (Braunschweig). Metrological specialists from the fields of science and the economy made up the largest proportion (7367) as well as participants at various seminars, conferences and colloquia (3524). Visits to PTB by the general public, within the scope of public relations work, were also very popular as usual. Around 1350 visitors (in 68 groups) watched the scientists in Braunschweig at work. In addition, 40 primary school classes (in total over 1000 school children) came to PTB, to carry out physics experiments themselves in PTB's WissensForscher-Labor (Knowledge-Searchers Lab).



visitors from all over the world came to PTB (Braunschweig). Metrological specialists from the fields of science and the economy made up the largest proportion (7367) as well as participants at various seminars, conferences and colloquia (3524). Visits to PTB by the general public, within the scope of public relations work, were also very popular as usual. Around 1350 visitors (in 68 groups) watched the scientists in Braunschweig at work. In addition, 40 primary school classes (in total over 1000 school children) came to PTB, to carry out physics experiments themselves in PTB's WissensForscher-Labor (Knowledge-Searchers Lab).

Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements

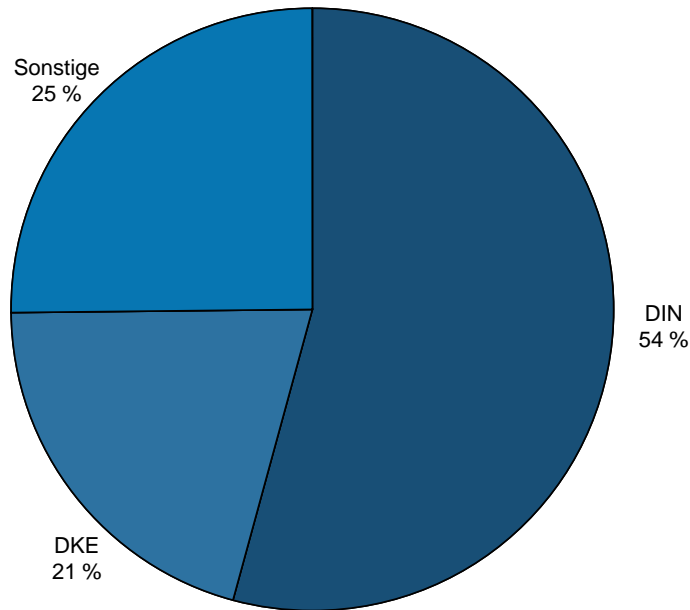
Die PTB nahm im Berichtsjahr an 53 Vergleichsmessungen teil, und zwar an 13 Schlüsselvergleichen, 23 regionalen/nationalen Vergleichen, 15 Pilotstudien und 2 bilateralen Vergleichen. 25 % der Vergleichsmessungen waren von direkter Relevanz für die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB im Rahmen des CIPM-MRA. An 7 Vergleichsmessungen nahm die PTB als Pilotlabor teil.



In the year under report, PTB took part in 53 comparable measurements, namely 13 key comparisons, 23 regional/national comparisons, 15 pilot studies and 2 bilateral comparisons. 25 % 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 7 comparable measurements as a pilot lab.

Nationale Normungsvorhaben • National standardization projects

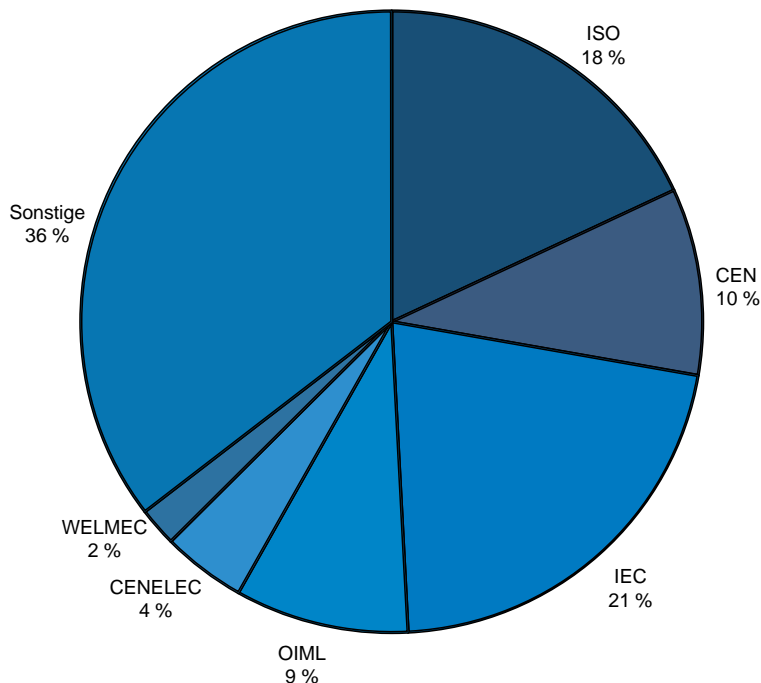
Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei nationalen Normungsvorhaben. Innerhalb des Deutschen Instituts für Normung e. V. (DIN) war die PTB an 166 Normenvorhaben beteiligt, bei der Deutschen Elektrotechnischen Kommission (DKE) bei 63 Vorhaben.



Break-up of the PTB's committee work for national standardization projects (in percent). PTB cooperated in 166 projects of the Deutsches Institut für Normung (DIN) and in 63 projects of the Deutsche Elektrotechnische Kommission (DKE).

Internationale Normungsvorhaben • International standardization projects

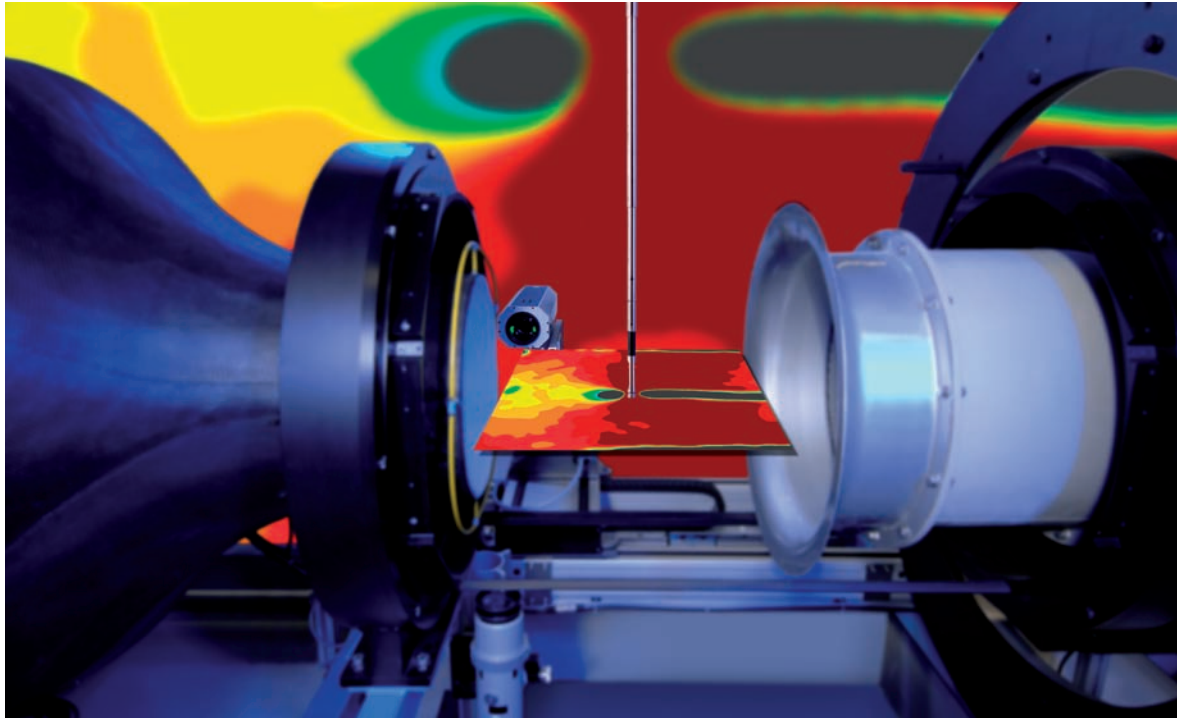
Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei internationalen Normungsvorhaben. (299 Vorhaben im letzten Jahr) ISO: Internationale Organisation für Standardisierung; CEN: Europäisches Komitee für Normung; IEC: Internationale Elektrotechnische Kommission; OIML: Internationale Organisation für das gesetzliche Messwesen; CENELEC: Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung; WELMEC: European Cooperation in Legal Metrology.



Distribution (in percent) of PTB's committee work on international standardization projects. (299 projects in the last year) ISO: International Organization for Standardization; CEN: European Committee for Standardization; IEC: International Electrotechnical Commission; OIML: International Organization of Legal Metrology; CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization; WELMEC: European Cooperation in Legal Metrology.



Mechanik und Akustik



Berichte der Abteilungen

1. Mechanik und Akustik

Die Abteilung 1 *Mechanik und Akustik* besteht aus den sieben Fachbereichen 1.1 *Masse*, 1.2 *Festkörpermechanik*, 1.3 *Geschwindigkeit*, 1.4 *Gase*, 1.5 *Flüssigkeiten*, 1.6 *Schall* und 1.7 *Akustik* und *Dynamik*.

Die Arbeiten der Abteilung 1 *Mechanik und Akustik* können den folgenden drei Themenbereichen zugeordnet werden: *Masse und abgeleitete Größen* (Fachbereiche 1.1, 1.2, 1.3, 1.7), *Durchfluss* (Fachbereiche 1.4, 1.5) sowie *Akustik, Ultraschall, Beschleunigung* (Fachbereiche 1.3, 1.6, 1.7). 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 *Masse*, 1.2 *Festkörpermechanik*, 1.3 *Geschwindigkeit* sowie 1.7 *Akustik und Dynamik* – basierend auf dem Einheiten-, Eich- und Beschussgesetz sowie der Einheitenverordnung und der Eichordnung – an der Darstellung und Weitergabe der mechanischen Einheiten für Masse, Kraft, Drehmoment und dynamischen Druck gearbeitet.

Zu den Kernaufgaben des Fachbereichs *Masse* gehören in der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* die Darstellung und Weitergabe der SI-Basiseinheit Kilogramm im Bereich von 1 mg bis 5000 kg mit Hilfe des nationalen Kilogrammprototyps Nr. 52 sowie in den Arbeitsgruppen *Waagen, Dynamisches Wägen* und *IT-Wägetechnik* die Prüfung von nichtselbsttätigen und selbsttätigen Waagen und Waagenmodulen.

In der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* war der Abschluss der internationalen Vergleichsmessungen im Bereich von 200 mg bis 2 kg (CCM.M-K5) von Bedeutung, an denen zwanzig nationale Metrologieinstitute teilnahmen und deren Ergebnisse in diesem Jahr veröffentlicht wurden^[1]. Verantwortliches Pilotlabor war das japanische NMIJ. Alle Messergebnisse der PTB für die Nennwerte 200 mg, 1 g, 50 g,

200 g und 2 kg stimmen innerhalb der angegebenen Messunsicherheiten mit den Referenzwerten gut überein.

Kalibrierungen im Bereich von 2 kg bis 10 kg konnten mit dem vorhandenen 10-kg-Massekomparator (Typ AX10005, Mettler-Toledo) bisher nur unter normalen Umgebungsbedingungen durchgeführt werden, wobei aufgrund witterungsbedingter Luftdruckschwankungen Standardabweichungen von bestenfalls 20 µg erreicht wurden. Nach Anpassung eines vorhandenen Rezipienten durch den Wissenschaftlichen Gerätebau der PTB und Umsetzung des 10-kg-Massekomparators in dieses druckstabile Gehäuse konnte die Standardabweichung auf 4 µg verringert werden, nunmehr unabhängig von witterungsbedingten Einflüssen (Bild 1).

Gemäß ISO/IEC 17025 werden von Kalibrierlaboratorien Maßnahmen zur Sicherung der Qualität von Kalibrierergebnissen gefordert. Um dieser Anforderung gerecht zu werden und sich von der Qualität der Kalibrierungen akkreditierter Laboratorien im Bereich Waagen zu überzeugen, wurde unter Leitung der PTB ein Ringvergleich mit 28 Kalibrierlaboratorien durchgeführt. Neben einer guten Übereinstimmung der Messergebnisse im Rahmen der von den Kalibrierlaboratorien selbst bestimmten Messunsicherheiten zeigte sich, dass der zugrundeliegende EURAMET-Kalibrierleitfaden CG-18 Interpretationsspielräume bietet, die zu unterschiedlichen Messunsicherheitsbudgets führen. Der Leitfaden sollte daher bei der nächsten Revision entsprechend überarbeitet und verbessert werden.

Die Arbeitsgruppe *Waagen* hat aktiv an der laufenden Revision der internationalen OIML-Empfehlung R 60 für Wägezellen mitgearbeitet, die nach über 10 Jahren aufgrund neuer messtechnischer Erkenntnisse und Anforderungen sowie neuer Materialien, verbesserter Kompensationsmechanismen und neuer Entwicklungen auf dem Gebiet digitaler Wägezellen erforderlich geworden war. Es wird erwar-

Titelbild:
Laser Doppler Anemometrie zur Sensorkalibrierung im Windkanalströmungsfeld

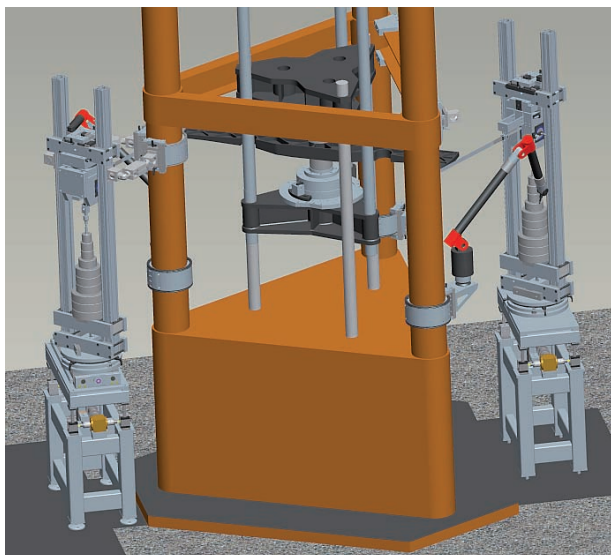
[1] I. van Andel et al.: Report on CIPM key comparison of the second phase of multiples and sub-multiples of the kilogram (CCM.M-K5). *Metrologia* **48** (2011), Tech. Suppl., 07008, CCM.M-K5 Final Report, 40 pages



Bild 1: 10-kg-Massekomparator AX10005 im neuen, druckstabilen Gehäuse (hier geöffnet)

tet, dass das verantwortliche US-Sekretariat im nächsten Jahr einen ersten Committee Draft der revidierten R 60 zur Abstimmung vorlegen wird.

Im Fachbereich *Festkörpermechanik* werden mit Kraft-Normalmessenrichtungen (K-NME) Kräfte von 0,5 N bis 16,5 MN realisiert, wobei Kräfte bis 2 MN mit direkter Massewirkung und Kräfte bis 16,5 MN mit hydraulischer Übersetzung erzeugt werden. In der Arbeitsgruppe *Darstellung Kraft* wurde die 16,5-MN-



Einrichtung nach erfolgreichem Abschluss der Modernisierung wieder in Betrieb genommen, wobei erstmals ein automatischer Kalibrierbetrieb möglich ist.

Zur Rückführung kleiner Kräfte wurde eine neue K-NME für den Bereich von 100 μN bis 200 mN in Betrieb genommen. Die Anlage ist aus einem Präzisionshubtisch (Weg 7 mm, Auflösung 2 nm) zur Krafterzeugung sowie einer elektromagnetisch kompensierten Präzisionswaage (Nennlast 20 g, Standardabweichung < 3 mg) zur rückgeführten Kraftmessung aufgebaut und arbeitet vollautomatisch. Nach erfolgter Validierung des Messunsicherheitsbudgets wird die Einrichtung ab 2012 für den Kalibrierbetrieb nach DIN EN ISO 376 zur Verfügung stehen.

Auf dem Gebiet der Präzisions-Drehmomentmessung wurde nach zahlreichen internationalen Vergleichen, in denen die Arbeitsgruppe *Darstellung Drehmoment* Pilotlabor war, jetzt ein DKD-Ringvergleich im Bereich von 20 N · m bis 200 N · m durchgeführt. Neben der PTB als Referenzlabor nahmen alle 13 akkreditierten, deutschen Kalibrierlaboratorien sowie zwei weitere Laboratorien teil. Die vorläufige Auswertung ergab eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse im Rahmen der angegebenen, erweiterten relativen Messunsicherheiten, die zwischen 0,01 % und 0,2 % liegen. Dieses Ergebnis bestätigt die gut funktionierende Weitergabe der Einheit des Drehmomentes.

Wie schon in den vergangenen Jahren setzte sich der Trend und die zunehmende Nachfrage der Industrie nach Präzisionskalibrierungen für sehr große Drehmomente bis 1 MN · m fort. Die 1,1-MN · m-Drehmoment-NME der PTB ist nach wie vor die weltweit einzige Anlage dieser Art, mit der solche Kalibrierungen möglich sind.

Kraft und Moment sind vektorielle Größen, und bestimmte Anwendungen erfordern die rückgeführte Messung mehrerer oder aller Komponenten dieser Vektoren, wie z. B. bei Reibwertmessköpfen für die Schraubenindustrie. Daher werden zurzeit an der 1-MN-K-NME entsprechende Umbauarbeiten vorgenommen, die es ermöglichen sollen, zukünftig nicht nur definierte axiale Kräfte, sondern zu-

Bild 2: Erweiterung der 1-MN-K-NME auf Mehrkomponentenkalibrierungen

sätzlich auch definierte Drehmomente in einen Prüfling einzuleiten, womit „Mehrkomponentenkalibrierungen“ möglich werden (Bild 2).

Besonderer Arbeitsschwerpunkt der Arbeitsgruppe *Periodische Kräfte* ist die messtechnische Rückführung von dynamischen Kräften. Das Leistungsangebot der PTB wurde hier auf sinusförmige Kräfte im Frequenzbereich von 40 Hz bis 2000 Hz erweitert, wobei je nach Frequenzbereich relative Messunsicherheiten von 0,5 % bis 2 % erreichbar sind. Zur weiteren Analyse der Messunsicherheitseinflüsse wurde die Messeinrichtung mit einem Scanningvibrometer erweitert, um die auftretenden Beschleunigungsverteilungen zu messen (Bild 3).

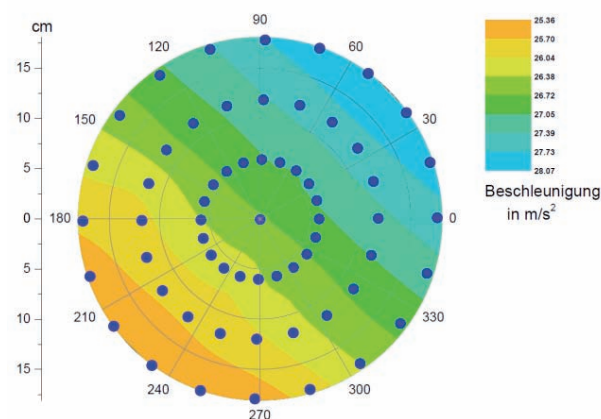


Bild 3: Mit einem Scanningvibrometer bei der dynamischen Kraftkalibrierung gemessene Beschleunigungsverteilung der Zusatzmasse.

Ein besonderer Arbeitsschwerpunkt für die kommenden drei Jahre wird das durch das Europäische Metrologie-Forschungsprogramm (EMRP) geförderte Projekt IND09 „Traceable Dynamic Measurement of Mechanical Quantities“ sein, das im September 2011 gestartet ist und von der Arbeitsgruppe *Stoßdynamik* im Fachbereich 1.7 *Akustik und Dynamik* koordiniert wird. An dem Projekt beteiligen sich insgesamt 9 führende europäische NMIs sowie verschiedene industrielle Anwender und Hersteller aus dem europäischen Raum. Das Forschungsprojekt hat das Ziel, die metrologischen Grundlagen für die rückführbare, dynamische Messung der mechanischen Messgrößen Kraft, Drehmoment und Druck inklusive ihrer elektrischen Signalverarbeitungskette zu erarbeiten. Zukünftige Richtlinien und Normen zum dynamischen Messen werden darauf aufbauen. Mit weltweit einmaligen Messeinrichtungen für dynamische Belastungen und einer entsprechenden Expertise übernimmt die PTB

in diesem EMRP-Projekt eine führende Rolle. Fachlich wird die Arbeitsgruppe *Stoßdynamik* mit ihren Messeinrichtungen für stoßförmige Kräfte (siehe auch den Beitrag „Kraftstoß-Kalibriereinrichtung für große Kräfte bis 250 kN“ unter „In Schlagzeilen: Nachrichten der Abteilung 2011, Metrologie für die Wirtschaft“) und dynamisches Drehmoment in das Projekt eingebunden. Andere Arbeitspakete übernehmen die Arbeitsgruppen *Periodische Kräfte* und *Dynamische Druckmessung*. Darüber hinaus werden fachübergreifende Fragestellungen in enger Kooperation mit den zuständigen Arbeitsgruppen für elektrische Messtechnik in Abteilung 2 sowie mathematische Modellierung und Messdatenauswertung in Abteilung 8 bearbeitet.

Die Arbeitsgruppe *Dynamische Druckmessung* im Fachbereich 1.3 *Geschwindigkeit* ist nach dem deutschen Beschussgesetz u.a. zuständig für die Prüfung und Zertifizierung bestimmter Bauarten von Schusswaffen und munitionsbetriebenen Schussapparaten, wie z. B. Bolzensetzgeräten. Ein Problem stellen hier spezielle Typen von Bolzensetzgeräten dar, die eine Zulassung nach alten DDR-Vorschriften haben und immer noch frei gehandelt werden, obwohl sie die geltenden Vorschriften und Anforderungen für eine PTB-Zulassung nicht erfüllen (Bild 4). In Kooperation mit der Universitätsklinik Greifswald konnte jetzt erstmals die Gefährlichkeit und das hohe Verletzungspotenzial dieser Schussapparate unter messtechnisch klar definierten Bedingungen nachgewiesen werden. Mit verschiedenen Bolzen und definierten Geschwindigkeiten zeigte sich, dass die Bolzen kinetische Energien bis zu 500 J aufweisen, sich durch Taumelbewegungen in der Wundhöhle um die Querachse drehen und so bei Missbrauch äußerst schwere Verletzungen hervorrufen können.

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.

Der von der Arbeitsgruppe *Strömungsmesstechnik* im Fachbereich *Gase* im Vorjahr in Betrieb genommene Windkanal „Göttinger Bauart“ mit einem Laser-Doppler-Anemometer als Be-

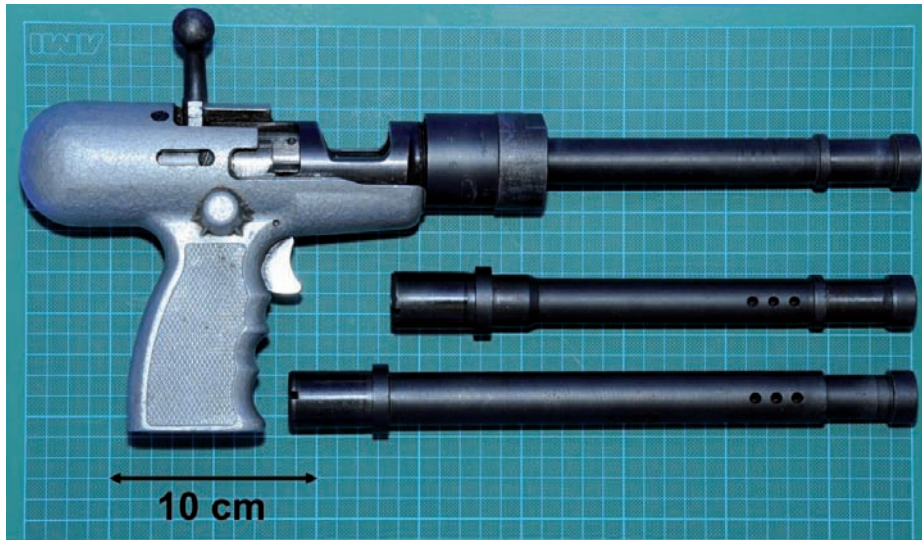


Bild 4: Beispiel eines Bolzensetzgerätes mit Zulassung nach alten DDR-Vorschriften

zugsnormal wurde sukzessiv in die PTB-Kalibrierungen von Anemometern eingebunden. Besondere Schwerpunkte lagen auf Untersuchungen der Strömungsfelder bei den eingesetzten Kalibrierverfahren (Bild 5). Dabei wurde der beim Kooperationspartner WindGuard Wind Tunnel Services GmbH betriebene große Kalibrierwindkanal Varel2 mit LDA-Systemen der PTB im Rahmen gemeinsam durchgeführter Kalibrierungen für bilaterale Vergleichsmessungen als „Referenzwindkanal“ genutzt.

Bei der diesjährigen Sitzung des EURAMET TC „Flow“ in Oslo wurden, basierend auf den Ergebnissen zum abgeschlossenen, von der PTB als Pilot-Labor betreuten Projekt 827 „Laser based Intercomparison of Anemometers“, die messtechnischen Rahmenbedingungen für die nächste internationale Vergleichsmessung KC3 „Air Speed“ im Jahr 2012 vorgestellt und diskutiert. Beim KC3, der von der PTB gemeinsam mit dem LNE-Cetiat (Frankreich) als Pilotlabor geleitet wird, soll nach den positiven Ergebnissen des Projekts 827 erstmals ein kommerzielles Laser-Doppler-Anemometer als Transfornormal zum Einsatz kommen.

Im Forschungsprojekt „Wind-LIDAR“ konnte nach der Beschaffung von für die PTB kundenspezifisch gefertigten optoelektronischen Modulen, der Entwicklung und dem Aufbau einer mikroprozessorgesteuerten, glasfasergekoppelten LIDAR-Sendeinheit und der Inbetriebnahme der Sende- und Empfangsmodule mit eigens entwickelter elektronischer Optikjustage bereits ein Kanal erfolgreich getestet und erste Abschätzungen zur weiteren Dimensio-

nierung der Signalverarbeitungskette vorgenommen werden.

In der Arbeitsgruppe *Gasmessgeräte* wurde als Ersatz für eine veraltete Messeinrichtung zu Beginn des Jahres 2011 eine neue Gasmessglocke als Primärnormal für Volumendurchflüsse unter Atmosphärendruck in Betrieb genommen. Um die messtechnische Rückführung abzusichern, wurden vor Aufnahme des Kalibrierbetriebes umfangreiche interne Vergleichsmessungen durchgeführt, die eine Verbesserung der relativen, erweiterten Messunsicherheit von bisher 0,06 % auf 0,045 % rechtfertigen. Die neue Gasmessglocke wurde

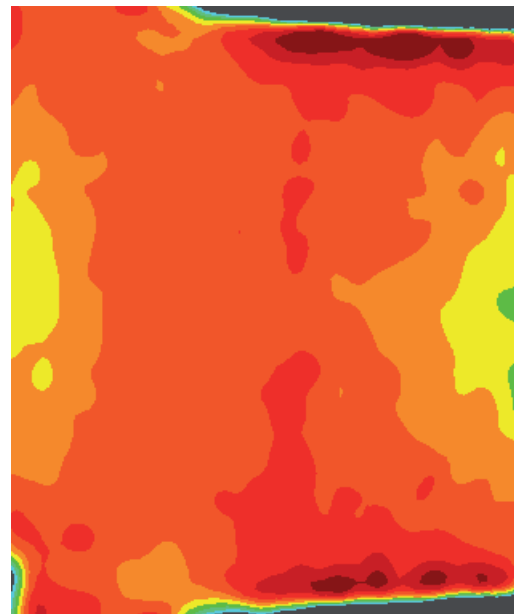


Bild 5: Horizontale Strömungsprofile in der Windkanalmitte – links ohne Prüfling, rechts mit eingebautem Prüfling, einem Hitzdraht-Anemometer; Strömungsrichtung von links nach rechts; die Farbskala zeigt relative Luftgeschwindigkeitswerte, die auf 5 m/s normiert sind.

auch bereits erfolgreich im Rahmen der laufenden internationalen Vergleichsmessung CCM.FF-K6b eingesetzt.

Mit technischen Gasen hoher Reinheit und erdgasähnlichen Gasgemischen definierter Gaszusammensetzung werden im Fachbereich *Gase* Düsen kalibriert, die für die Kalibrierung von thermischen Haushaltsgaszählern verwendet werden. Hierbei wurden im Rahmen von Drittmittelvorhaben erstmals auch die Auswirkungen der thermodynamischen intramolekularen Relaxation in Methan und erdgasähnlichen Gemischen auf die Kalibrierwerte kritischer Düsen kleinerer Bauart quantifiziert.

Im Rahmen von verschiedenen Konformitätsbewertungsverfahren wurden auf dem MID-Klimaprüfstand umfangreiche Messkampagnen durchgeführt. Hiermit konnte die Gültigkeit eines von der PTB aufgestellten physikalischen Modells bestätigt werden, das die Messabweichungen von Turbinenradgaszählern in Abhängigkeit von der Reynoldszahl im Temperaturbereich von -25 °C bis $+55\text{ °C}$ und für unterschiedliche Drücke im Bereich von 1 bar bis 4 bar sehr gut beschreibt. Dieses Modell wird nun künftig auch bei Kalibrierungen mit Turbinenradgaszählern verwendet.

Die Arbeiten in der Arbeitsgruppe *Hochdruck-Erdgas* waren geprägt von der regulär anstehenden Rekalibrierung des Prüfstandes pigsaw und sich anschließenden neuen Vergleichsmessungen im Rahmen des Harmonisierungs-

vertrages zwischen Deutschland, Frankreich und den Niederlanden. Vor der eigentlichen Rekalibrierung konnte das volumetrische Primärnormal bei pigsaw, die sogenannte „Rohrprüfstrecke“, im Zeitraum von Dezember 2009 bis Februar 2011 in vier Kalibrierkampagnen einbezogen werden. Diese Möglichkeit besteht erst seit wenigen Jahren und ist deshalb sehr wertvoll, weil sie eine bessere Ermittlung und Bewertung verschiedener Unsicherheitseinflüsse erlaubt.

Die Forschungsarbeiten am optischen Durchfluss-Normal bei pigsaw konnten mit umfangreichen Messungen der Grenzschichten in einer großen Düse bis $1600\text{ m}^3/\text{h}$ erfolgreich zum Abschluss gebracht werden (Bild 6). Die theoretischen und experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Abhängigkeit der Grenzschichtprofile von der Reynoldszahl in der großen Düse konsistent ist mit der Charakteristik der mittleren Düse, die bis $400\text{ m}^3/\text{h}$ eingesetzt werden kann. Damit verfügt die PTB jetzt über ein zweites, unabhängiges Primärnormal, das eine direkte Kalibrierung der großen Arbeits-(Sekundär-)normale von pigsaw ohne zusätzliche Zwischenschritte (Staffelung) erlaubt, die Zuverlässigkeit der Rückführung auf die Rohrprüfstrecke absichert und letztlich zu einer Verringerung der Messunsicherheit für Kalibrierungen von industriellen Gaszählern führt.

Insgesamt stimmen die mit der Rohrprüfstrecke und dem optischen Durchfluss-Normal

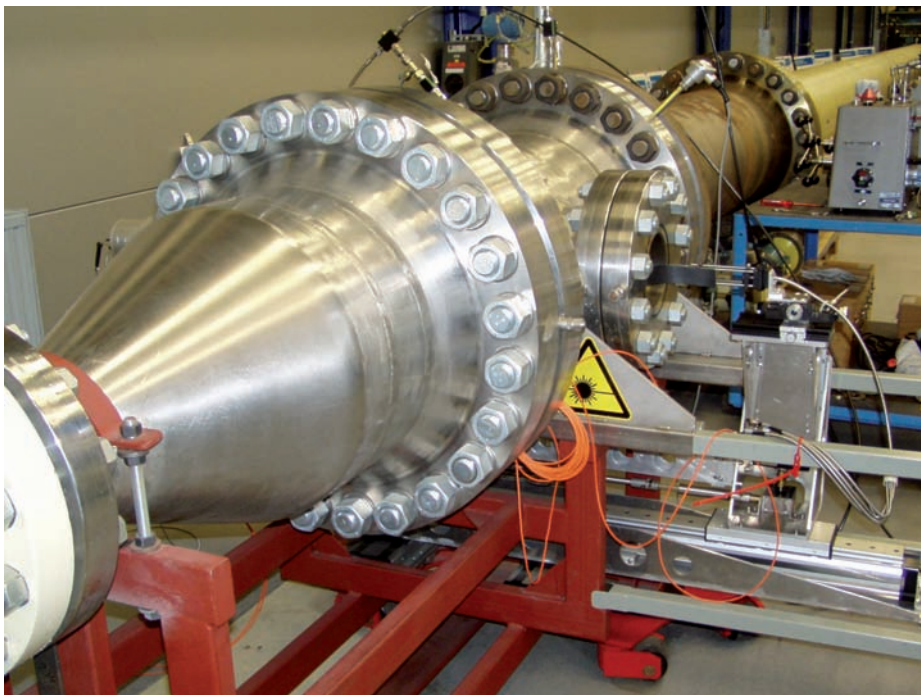
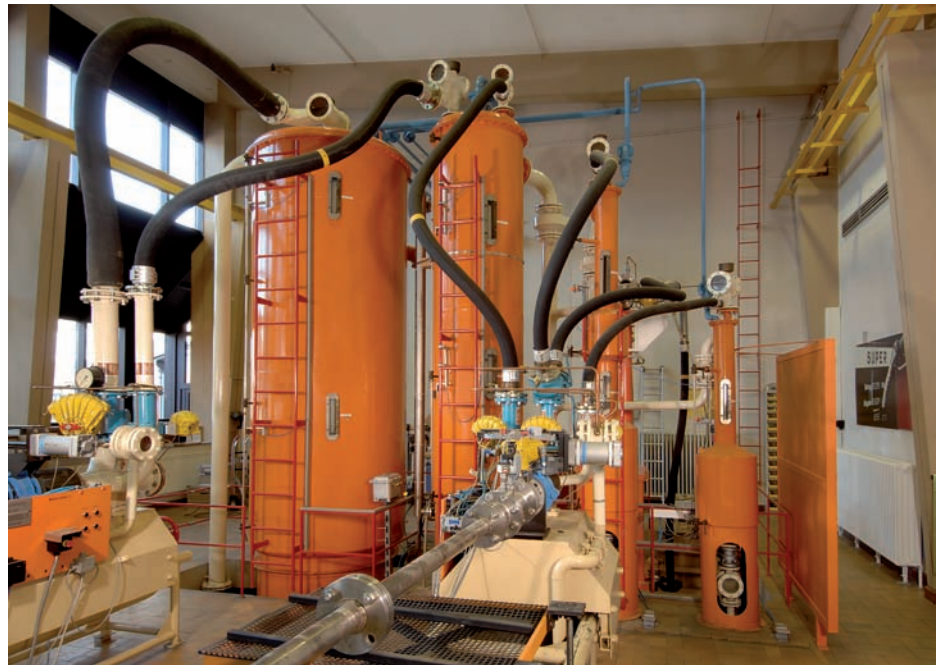


Bild 6: Ansicht des optischen Durchfluss-Normals bei pigsaw mit LDA-Messtechnik zur berührungslosen Messung des Durchflusses von Hochdruck-Erdgas bis $1600\text{ m}^3/\text{h}$

Bild 7: Der vollständig renovierte und erweiterte Mineralölzähler-Prüfstand, der nach dem volumetrischen Prinzip mit Testbenzin als Prüfflüssigkeit arbeitet. Als volumetrische Normale dienen vier geometrisch vermessene Behälter mit Fassungsvermögen von 5000 L, 1000 L, 200 L und 100 L. Die Messung des Füllstandes in den Behältern erfolgt mit Hilfe eines automatischen Höhenmesssystems auf magnetostriktiver Basis.



ermittelten neuen Kalibrierwerte der Arbeitsnormale von pigsar sehr gut mit den zuletzt 2008 ermittelten Werten überein; die relativen Abweichungen betragen maximal 0,075 %. Der neue „Harmonisierungswert“ wird allerdings erst dann festgelegt und für pigsar wirksam, wenn die anderen europäischen Partner ihre Messungen erfolgreich zum Abschluss gebracht haben.

Die Kernaufgaben des Fachbereichs 1.5 *Flüssigkeiten* umfassen drei Schwerpunkte: die Verbesserung und den Ausbau der Primärnormale zur Darstellung der Einheiten für Menge und Durchfluss von Flüssigkeiten, die messtechnische Sicherung der Weitergabe der Einheiten durch geeignete Transfornormale sowie die kompetente und effiziente Bearbeitung von Dienstleistungen, d. h. Kalibrierungen, Prüfungen und Zertifizierungen von Flüssigkeitsmessgeräten.

Weiterhin im Mittelpunkt der Forschungstätigkeiten stand das Hydrodynamische Prüffeld (HDP). Nachdem im vorangegangenen Jahr auf der Basis umfangreicher Untersuchungen Optimierungen an der Umschalteneinrichtung vorgenommen worden waren, die zu einer weiteren Reduzierung der Messunsicherheit auf 0,012 % geführt hatten, zeigte sich nun die Bestimmung der Wasserdichte als dominierende Einflussgröße. Untersuchungen des Dichteinflusses unter Berücksichtigung der realen Anwendungsbedingungen von Flüssigkeitsprüfständen lieferten dabei wertvolle Erkenntnisse (siehe auch: „In Schlagzeilen: Nach-

richten der Abteilung 2011, Grundlagen der Metrologie“). Weiterhin konnten Forschungsaktivitäten zur Nutzung des HDP-Wägesystems für dynamische Durchflussmessungen zum erfolgreichen Abschluss gebracht werden. Dies ist ein erster Schritt zur Erfassung des Momentandurchflusses mittels gravimetrischer Wägeverfahren.

Fortschritte gab es auch mit dem vollständig renovierten Mineralölzähler-Prüfstand (MÖZ, s. Bild 7). Nach Installation einer neuen Ventilkopplung zur Umlenkung des Flüssigkeitsstroms und erfolgreicher Ermittlung der durchflussabhängigen Messunsicherheitsbeiträge kann der Prüfstand nun sowohl im fliegenden als auch im stehenden Start-Stopp-Betrieb im Durchflussbereich von 0,6 m³/h bis 120 m³/h arbeiten. Die durch internationale Vergleichsmessungen bestätigte erweiterte relative Messunsicherheit beträgt 0,05 %. Die Durchflusserzeugung erfolgt entweder über die Hochbehälter oder mittels Pumpendirektbetrieb.

Mit dem neu in Betrieb genommenen Kleinstmengenprüfstand konnte eine erste Industriekooperation erfolgreich abgeschlossen werden. Gegenstand waren Untersuchungen zur Weiterentwicklung von Referenznormalzählern für spezielle, niedrigviskose Testflüssigkeiten bei Durchflüssen von wenigen Litern pro Stunde.

Bei der Weitergabe der Flüssigkeitseinheiten rücken zunehmend Fragen der Sicherstellung

der Messrichtigkeit der vor Ort betriebenen Messgeräte in den Vordergrund. Gerade im Bereich der Flüssigkeitsmessungen variieren die praktischen Einsatzbedingungen recht stark und unterscheiden sich häufig auch erheblich von den idealen Prüf- und Kalibrierbedingungen auf den Prüfständen. Dies betrifft nicht nur Temperatur, Druck, Viskosität und Dichte des Messgutes, sondern auch das Betriebsregime. Wechselnde, intermittierende oder alternierende Durchflüsse können zu relativen Messabweichungen von mehreren Prozent führen. Daher wird im Fachbereich *Flüssigkeiten* zurzeit an einer neuen Generation von Prüfständen gearbeitet, mit denen definierte, reproduzierbare Durchflussänderungen erzeugt werden sollen, womit erstmals dynamische Prüfungen unter nichtstationären Bedingungen möglich wären. Ein entsprechendes Patent wurde bereits angemeldet und ein Prototyp auf der Messe „Sensor und Test 2011“ vorgestellt (siehe auch: „In Schlagzeilen: Nachrichten der Abteilung 2011, Messtechnik für die Gesellschaft“).

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. Dabei sind gesetzliche Aufgaben, Dienstleistungen und Forschungsaufgaben ausgewogen vertreten. Die Basis der Arbeit bilden die Normalmessplätze, an deren Weiterentwicklung intensiv gearbeitet wurde.

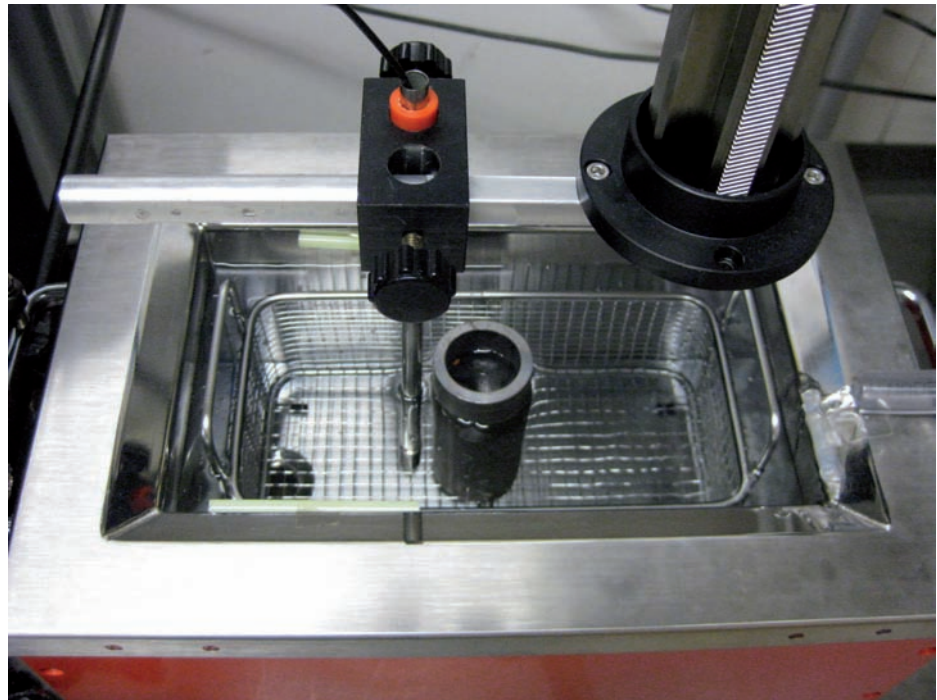
Ein Schwerpunkt der Arbeit des Fachbereichs *Schall* ist die Entwicklung von Messverfahren zur quantitativen Untersuchung von hochin-

tensivem Ultraschall, wie er zur Tumorthherapie eingesetzt wird. In einem internationalen Projekt, im Rahmen des iMERA- und des ERANET-plus-Programms bis März 2011 gefördert, wurden mit 4 Partnern metrologische Grundlagen für hochintensiven Ultraschall erarbeitet. Neben dem Aufbau und der Validierung einer rückgeführten Schalleistungsbestimmung wurden neue Sensoren für die Schalldruckmessung entwickelt. Weiterhin stand die Charakterisierung und Bestimmung der thermischen Wirkung eines Schallbündels im Mittelpunkt. Die Beschreibung und Steuerung dieser thermischen Wirkung am Behandlungsort ist für die therapeutische Wirkung extrem wichtig, und es wurde in einem weiteren Projekt eine neue Methode entwickelt, die für die Überwachung des Therapieverlaufs verwendet werden kann. Sie nutzt die bei der Behandlung abgestrahlten Scherwellen, die Informationen über den Prozess der Läsionsbildung enthalten und z. B. Unregelmäßigkeiten erkennen und vermeiden lassen.

Herstellern und Anwendern von Ultraschallbädern standen bisher keine objektiven Parameter zur Qualitätssicherung zur Verfügung, weil die zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen kompliziert und schwer vorhersagbar sind. Im Fachbereich *Schall* wurden nun Testverfahren entwickelt, die in der Praxis leicht anwendbar sind. Mit ihnen können Reinigungs- und Reaktionswirkungen quantitativ abgeschätzt und die Betriebsparameter optimiert werden (Bild 8).

Ein Hörtest mit otoakustischen Emissionen (OAE) liefert diese als Antwort auf einen Schallreiz. Ihr Vorhandensein deutet auf ein gesundes Innenohr hin. Üblicherweise werden die Reize mit Miniaturlautsprechern im Gehörgang dargeboten und benötigen ein gesundes Mittelohr zur Weiterleitung. Eine ergänzende Stimulation mit sogenannten Knochenleitungshörern kann diesen Weg überspringen und zusätzliche Informationen über die Funktion des Ohres liefern. Für einen ersten Test wurden handelsübliche Knochenleitungshörer als Schallquellen genutzt. Bei allen Probanden konnten bei mindestens einer Frequenz Emissionen nachgewiesen werden. Stimulation mittels Knochenleitung hat auch technische Vorteile, weil Störungen des Sondenmikrofons durch die sogenannten Nahfelder der Sondenlautsprecher vermieden werden.

Bild 8:
Schallfeldmessung in
einem Ultraschallbad
mit Reinigungsgut



In einem gemeinsamen Projekt mit der Volkswagen AG wurden Untersuchungen zur Schallquellenortung im KFZ-Innenraum mit Hilfe detaillierter Schallfeldanalysen durchgeführt. Sowohl die raumakustische Modalanalyse als auch die Untersuchung von Schallausbreitungswegen in einem 1:1-Modell lieferten die Ursachen für die schlechte Ortung durch eine akustische Kamera bei Frequenzen unter 2000 Hz. Raummoden und Spiegelschallquellen, die durch die angrenzenden schallharten Wände bestimmt werden, schränken die Anwendungsmöglichkeiten der akustischen Kamera erheblich ein. Die erfolgreiche Anwendung der Messverfahren ermöglicht neue Wege zu verbesserten Ortungsverfahren in eng begrenzten Räumen.

Zum Fachbereich 1.7 *Akustik und Dynamik* gehören die Arbeitsgruppen *Darstellung Beschleunigung*, *Angewandte Akustik* und *Stoßdynamik*. Die Arbeitsgruppe *Wärmeleitung* wurde aufgrund weiterer Personalkürzungen und der dadurch notwendig gewordenen Aufgabendiskussion zum 1.7.2011 aufgelöst. Dies hat zur Folge, dass die PTB auf diesem Gebiet keine Dienstleistungen mehr anbieten kann.

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. Daraus leiten sich aktuelle F&E-Schwerpunkte ab, wie beispielsweise die Verringerung der Messunsicherheit bei der Phasenkalibrierung (siehe auch den Beitrag „Erste rückgeführte Bestimmung der opto-elektronischen

Signallaufzeit von PIN-Photodioden“ unter „In Schlagzeilen: Nachrichten der Abteilung 2011, Grundlagen der Metrologie“). Bei der Überprüfung der Langzeitstabilität von Beschleunigungsaufnehmern, die auch in einer internationalen Vergleichsmessung (CIPM Key Comparison) verwendet worden waren (Typ „Back-to-Back“ und „Single-ended“) zeigten sich signifikante Abweichungen des Betrages der Empfindlichkeit für den Aufnehmer des Typs „Single-ended“. Diese Abweichungen, die bei Frequenzen über 5 kHz nachweisbar sind, hängen davon ab, ob die Kalibrierung auf einem Schwingteil aus Beryllium oder aus Keramik durchgeführt wird. Zur Klärung der Ursachen dieser Materialabhängigkeit wurden umfassende Untersuchungen an einem geöffneten Aufnehmer durchgeführt, wobei der Laserstrahl der Primärkalibriereinrichtung sowohl in herkömmlicher Weise auf das Schwingteil als auch in weiteren Messreihen auf die Basis des Aufnehmers gerichtet wurde (Bild 9). Auf diese Weise war es möglich, die ursächlichen Relativbewegungen zwischen Aufnehmer und Schwingteil zu ermitteln. In einem zweiten Schritt gelang es schließlich, den Effekt auch quantitativ durch ein Modell zu beschreiben und so die Basis für eine Korrektur der Messergebnisse zu legen^[2].

[2] Th. Bruns, A. Link, A. Täubner, The Influence of Different Vibration Exciter Systems on High Frequency Primary Calibration of Single-ended Accelerometers, Part II, *Metrologia*, accepted for publication.

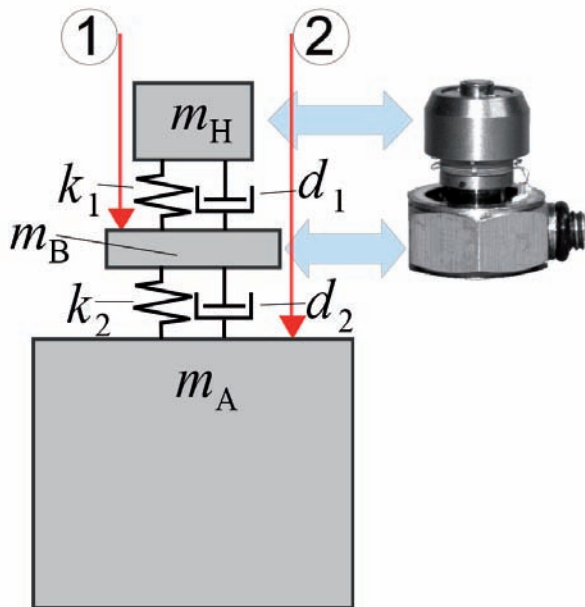


Bild 9: Modell für die Primärkalibrierung eines Aufnehmers vom Typ „Single-ended“. Der Aufnehmer besteht aus der Basismasse m_B und der seismischen Masse m_H , die über eine viskoelastische Feder an die Armatur m_A gekoppelt sind. Der Kopplungskontakt hat zusätzliche viskoelastische Eigenschaften. Rechts ist der reale Aufnehmer dargestellt.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Abschlussauswertung des DKD-Vergleichs für Beschleunigungsaufnehmer und Messverstärker, bei dem die PTB Referenzlabor war. Die Überwachungsmessungen während des Vergleichs wurden extern beim akkreditierten Kalibrierlabor der Firma SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH Dresden durchgeführt.

Die Forschungsaktivitäten der Arbeitsgruppe *Angewandte Akustik* sind auf die Neu- und Weiterentwicklung von akustischen Messver-

fahren ausgerichtet. Ein Schwerpunkt ist dabei die Ermittlung der Unsicherheit akustischer Kenngrößen. Im Berichtszeitraum wurden solche Untersuchungen für das Normhammerwerk angestellt, das bei Trittschallmessungen als Normal dient. Es zeigte sich, dass die von Hammerwerken emittierte Leistung in den tiefen Terzen eine Unsicherheit von bis zu einem dB aufweist. Dieser Wert ergibt sich bei Einhaltung aller vorgegebenen Toleranzen und stellt einen nennenswerten Beitrag zur kombinierten Unsicherheit gemessener Normtrittschallpegel dar. Außerdem wurde im Berichtszeitraum das von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geförderte Projekt „Trittschall bei Bauprodukten aus Holz“ gestartet. In diesem über drei Jahre laufenden Projekt soll u. a. ein kompaktes Messverfahren für die Trittschallminderung von Deckenauflagen aus Holz entwickelt werden, bei dem der bauakustische Deckenprüfstand aus zwei Räumen mit je 50 m³ Volumen durch einen schreibstischgroßen Messaufbau ersetzt wird. Dadurch sollen insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen in die Lage versetzt werden, eigene Messkapazitäten aufzubauen.

In der Arbeitsgruppe *Geschwindigkeitsmessgeräte* im Fachbereich 1.3 *Geschwindigkeit* wurden mit einem GPS-basierten Inertialsystem in Kooperation mit der Polizei und Eichbehörden Untersuchungen durchgeführt, wie sich die Schräglage von Motorrädern in Kurven auf die Geschwindigkeitsmessung mit einem Videonachfahrssystem auswirkt (Bild 10). Die Versuche fanden auf einem Testgelände in Aldenhoven bei Aachen mit Kreisfahrten von bis zu 200 m Radius und Geschwindigkeiten bis 90 km/h statt. Die Messungen bestätigten die



Bild 10: Testfahrt mit einem Polizei-Motorrad zur Analyse des Einflusses der Schräglage auf Geschwindigkeitsmessungen mit Videonachfahrssystemen.

theoretischen Abschätzungen des nichtlinearen Effektes, die sich aus der Annahme eines kreisförmigen Querschnitts des Reifens ergeben. Nach Veröffentlichung der Ergebnisse könnten diese als Grundlage zur messtechnischen Korrektur des Effektes dienen.

Videobasierte Verkehrs-Kontrollsysteme können zukünftig auch an Messstellen mit Kuppen, Senken usw. eingesetzt werden, wenn die tatsächliche Geometrie der Messstelle bei der Eichung dreidimensional erfasst wird und die Software zur Auswertung der Videosequenzen entsprechend erweitert ist. Nach detaillierter Analyse der Software und praktischer Erprobung konnte von der Arbeitsgruppe *Geschwindigkeitsmessgeräte* erstmals ein solches Verkehrs-Kontrollsystem zugelassen werden.

Der Fachbereich 1.3 *Geschwindigkeit* arbeitete u. a auch im Rahmen eines DFG-Projektes des Römisch-Germanischen Zentralmuseums in Mainz an einer speziellen Fragestellung zum Jagdverhalten von Steinzeitmenschen mit, wo an Glasreproduktionen von originalen Feuersteinspeerspitzen ballistische Untersuchungen mit Variation von Geschwindigkeit und Aufttrittswinkel bei sonst identischen, standardisierten Bedingungen durchgeführt wurden.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

Erfolgreiche Installation eines 10-kg-Massekomparators in einem druckstabilen Gehäuse

Durch die Installation in einem druckstabilen Gehäuse konnte die Standardabweichung eines 10-kg-Massekomparators von 20 μg auf rund 4 μg verringert werden. (M. Borys, FB 1.1, michael.borys@ptb.de)

Referenzanlagen zur Prüfung von Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten

Die Arbeitsgruppe „Geschwindigkeitsmessgeräte“ verfügt über mehrere Referenzanlagen, die bei der Prüfung von Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten im Rahmen der Bauartzulassung dieser Geräte verwendet werden. Die Prüflinge müssen dabei die in der Eichordnung festgelegten Verkehrsfehlergrenzen ($\pm 3 \text{ km/h}$ bei Meswerten bis 100 km/h , $\pm 3 \%$ des Messwertes bei Werten über 100 km/h) mit sehr hoher statistischer Sicherheit einhalten. Eine Referenzanlage befindet sich in unmittelbarer Nähe zur PTB an einer Landstraße (zulässige Höchstgeschwindigkeit 70 km/h), eine weitere befindet sich an einer Bundesautobahn (Abschnitt ohne Geschwindigkeitsbegrenzung). (F. Märtens, FB 1.3, frank.maertens@ptb.de)

Laser-Doppler-Anemometer – Der Schlüssel zur internationalen Vergleichbarkeit von Strömungsgeschwindigkeitswerten

Die Ergebnisse der im EURAMET-Projekt 827 „LDA based intercomparison of Anemometers“ durchgeführten Vergleichsmessungen haben durch den erstmaligen Einsatz eines Laser-Doppler-Anemometers als TransfERNormal nicht nur die sehr gute Vergleichbarkeit der Darstellungen für die Einheit Strömungsgeschwindigkeit in den einzelnen nationalen Metrologieinstituten bestätigen können, sondern auch die Bestimmung von Ringvergleichsreferenzwerten mit kleinsten, im Bereich der Anemometerkalibrierung bisher nicht erreichten Messunsicherheiten ($0,2 \%$ – $0,3 \%$) ermöglicht. (H. Müller, FB 1.4, harald.mueller@ptb.de)

Erste rückgeführte Bestimmung der optoelektronischen Signallaufzeit von PIN-Photodioden

Im Rahmen einer Zusammenarbeit der Arbeitsgruppen „Darstellung Beschleunigung“ und „Terahertz-Optik“ der PTB ist es erstmals gelungen, die kombinierte opto-elektrische Signalverzögerung von PIN-Photodioden mit integriertem Verstärker genau zu bestimmen. Die Ergebnisse dieser Messungen bestätigen die bisherigen Abschätzungen zur Messunsicherheit bei der Phasenkalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern, insbesondere bei hohen Frequenzen. (T. Bruns, FB 1.7, thomas.bruns@ptb.de)

Aufbau einer Kraft-Normalmesseinrichtung für Kalibrierungen im Bereich $100 \mu\text{N}$ – 200 mN

Für die Kalibrierung mit kleinen Kräfte im μN – mN -Bereich kann das Prinzip der Krafterzeugung mittels Massestapel nicht mehr oder nur noch bedingt angewendet werden. Das Problem kann durch eine Vergleichskalibrierung mittels elektromagnetisch kompensierter Waagen als Vergleichsnorm gelöst werden. (Ch. Schlegel, FB 1.2, christian.schlegel@ptb.de)

Periodische Kraftmessung jetzt auch in 2D

Bei der periodischen Kraftkalibrierung wird ein Kraftaufnehmer mit einer zusätzlichen Masse versehen und auf einem elektromagnetischen Schwingerreger (Shaker) zu Sinusschwingungen angeregt. Ziel der Kalibrierung ist die Messung der dynamischen Sensitivität, welche das Verhältnis aus dem Ausgangssignal des Kraftaufnehmers zur einwirkenden dynamischen Kraft darstellt. Durch den Einsatz eines Scanning-Vibrometers ist es nunmehr möglich, die Beschleunigung auf der gesamten Oberfläche der Zusatzmasse mit einer beliebigen Anzahl von Scanpunkten zu messen. (Ch. Schlegel, FB 1.2, christian.schlegel@ptb.de)

Einfachere Messunsicherheitsabschätzung bei bestimmten Modellfunktionen

Gängige Verfahren zur Bestimmung der Unsicherheit von Messergebnissen setzen in der Regel eine Modellfunktion voraus, mit Hilfe de-

rer die Beiträge zur Gesamtmessunsicherheit berechnet werden. Dazu werden die partiellen Ableitungen dieser mathematischen Funktion gebildet, die als sogenannte Sensitivitätskoeffizienten angeben, wie stark der Einzelbeitrag in das Gesamtbudget eingeht. Nun gibt es Fälle, wo diese Ableitungen null sind, dennoch ist der Einzelbeitrag der damit beschriebenen Größe vorhanden. (D. Röske, FB 1.2, dirk.roeske@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Mineralölzähler-Prüfungen erstmals mit fliegendem Start-Stop-Betrieb möglich

Nach Abschluss der Umbauarbeiten und der generellen Inbetriebnahme des Mineralölzähler-Prüfstandes wurden nunmehr alle wichtigen Baugruppen umfassend hinsichtlich ihres konkreten Einflusses auf die Messunsicherheit des Prüfstandes untersucht – dabei insbesondere auch der Einfluss der Umschalteneinrichtung auf den neu realisierten fliegenden Start-Stop-Betrieb. (J. Riedel, FB 1.5, joerg.riedel@ptb.de)

Forschungsarbeiten am optischen Durchflussnormal für Hochdruck-Erdgas erfolgreich zum Abschluss gebracht

Die Forschungsarbeiten am optischen Durchfluss-Normal konnten mit Messungen der Grenzschichten für Durchflüsse bis 1600 m³/h erfolgreich zum Abschluss gebracht werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Reynoldszahlabhängigkeit der Grenzschichtprofile für die große Düse konsistent ist mit der bereits für die mittlere Düse ermittelten Charakteristik. Mit dem optischen Normal steht damit erstmals ein unabhängiges Verfahren zur Verfügung, das ohne zusätzliche Zwischenschritte Kalibrierwerte für die großen Arbeitsnormale auf dem Hochdruck-Prüfstand pignar liefert und die Zuverlässigkeit der bisherigen Rückführung auf das volumetrische Primärnormal, die sogenannte Rohrprüfstrecke, verstärkt absichert. (V. Strunck, FB 1.4, volker.strunck@ptb.de)

Ringvergleich von 28 DAkkS-Waagenkalibrierlaboratorien

Gemäß Einheiten- und Zeitgesetz hat die PTB unter anderem die gesetzlichen Einheiten weiterzugeben. Hierbei wird sie von akkreditierten Kalibrierlaboratorien unterstützt. Die Akkreditierung dieser Kalibrierlaboratorien fällt seit dem 1. Januar 2010 in den Zuständig-

keitsbereich der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS). Gemäß DIN EN ISO/IEC 17025 werden von einem Kalibrierlaboratorium Maßnahmen zur Sicherung der Qualität seiner Kalibrierergebnisse gefordert. Um dieser Anforderung gerecht zu werden und um sich von der Qualität der Kalibrierungen von den akkreditierten Laboratorien im Bereich Waagen zu überzeugen, sind unter der Leitung der PTB Vergleichsmessungen durchgeführt und ausgewertet worden. (M. Denzel, FB1.1, michael.denzel@ptb.de)

Erste Schritte zur quantitativen Charakterisierung von Ultraschallreinigungswannen

Ultraschallbäder sind in Industrie, Gewerbe und Privatbereich weit verbreitet. Dennoch beruht die gezielte Auslegung eines Gerätes für eine bestimmte Anwendung bis heute auf langen Versuchsreihen sowie den individuellen Erfahrungswerten der Hersteller. Grund hierfür ist, dass der zugrundeliegende physikalische Effekt – die Kavitation – von Natur aus hoch stochastisch ist und von einer ganzen Reihe von Umgebungsparametern abhängt. Der PTB ist es nun gelungen, etwas Ordnung in das Chaos zu bringen. (M. Jüschke, FB 1.6, matthias.jueschke@ptb.de)

Kriechmessungen an Präzisions-Drehmomentenaufnehmern im Vergleich

Drehmomentenaufnehmer reagieren aufgrund von internen Umlagerungsvorgängen auf veränderte Belastungen verzögert. Erst Minuten nach einer Änderung findet das Ausgangssignal asymptotisch in einen stabilen Zustand (Bild 1). Dieses Kriechen genannte Verhalten muss man kennen, um die Eignung eines Drehmomentenaufnehmers für dynamische oder hochpräzise Aufgaben beurteilen zu können. Deshalb fordert die DIN 51309 bei der Kalibrierung von Drehmomentenaufnehmern die Durchführung entsprechender Kriechmessungen. (A. Brüge, FB1.2, andreas.bruege@ptb.de)

Kraftstoß-Kalibriereinrichtung für große Kräfte bis 250 kN

Für den Bereich der dynamischen Kraftmessung wurde eine Messeinrichtung zur Primärkalibrierung von Kraftaufnehmern mit stoßförmigen Kräften bis 250 kN entwickelt und in Betrieb genommen. Die Messeinrichtung erweitert die Kalibriermöglichkeiten der vorhandenen 20-kN-Stoßkraft-Messeinrichtung um mehr als eine Größenordnung und eignet sich insbesondere auch für voluminöse und

schwere Kraftaufnehmer aus dem industriellen Umfeld. (M. Kobusch, FB 1.7, michael.kobusch@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Eine Ausweitung des Frequenzbereichs erhöht die Unsicherheit bauakustischer Einzahlwerte nicht

Durch Auswertung einer Vielzahl von Ringversuchen wurde ermittelt, dass die Unsicherheit bauakustischer Einzahlwerte durch die Einbeziehung der Terzen von 50 Hz bis 80 Hz sowie 4 kHz und 5 kHz nicht nennenswert verändert wird, obwohl diese Terzen als die unsichersten gelten. (V. Wittstock, FB 1.7, volker.wittstock@ptb.de)

Automatische Erfassung von Verkehrsdaten mit PTB-geprüfter Lichtschranke

Für Entscheidungen in der Verkehrs-, Stadt- und Umweltplanung werden zunehmend verlässliche Verkehrsdaten mit hohem Detaillierungsgrad gefordert, möglichst mit vollautomatisch arbeitenden Geräten. Auf dem Markt existiert eine große Anzahl unterschiedlichster Gerätesysteme (Erfassungssysteme), die für die Datengewinnung verwendet werden könnten. Die Vor- und Nachteile der bei diesen Erfassungssystemen eingesetzten Messprinzipien sind aber häufig den mit diesen Aufgaben betrauten Personen nur unzureichend bekannt. Die PTB hat an einem Projekt der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) mitgewirkt, um den mit derartigen Aufgaben betrauten Personen bei der Auswahl geeigneter Erfassungssysteme zu helfen. (F. Märtens, FB 1.3, frank.maertens@ptb.de)

Neuer Ansatz zur Untersuchung des Wasserzählerverhaltens unter realen Entnahmebedingungen

Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens von PTB und der deutschen Wasserzählerindustrie wurden umfangreiche Untersuchungen an mechanischen Wasserzählern vorgenommen, um deren Messverhalten bei wechselnden Durchflüssen und kleinen Entnahmemengen besser analysieren, vergleichen und bewerten zu können. (G. Wendt, FB 1.5, gudrun.wendt@ptb.de)

Mindest-Targetgröße für Ultraschall-Leistungsmessungen in fokussierten Feldern

Es wurde die Mindest-Targetgröße für Leistungsmessungen in rotationssymmetrischen, fokussierten Ultraschallfeldern berechnet; solche Felder treten in der medizinischen Diagnostik und in hochintensiven therapeutischen Ultraschallanwendungen auf. (K. Beißner, FB 1.6, Klaus.Beissner@ptb.de)

Ein neuer Weg zur Auslösung otoakustischer Emissionen

Das menschliche Ohr ist kein passives Sinnesorgan: Wird ein gesundes Ohr mit zwei reinen Tönen stimuliert, die eine kleine musikalische Terz auseinander liegen, reagiert es darauf, indem es den zugehörigen Grundton des Dur-Dreiklangs erzeugt. Dieser aus dem Innenohr stammende, unhörbar leise Ton wird Distorsionsprodukt-Otoakustische Emission, abgekürzt „DPOAE“, genannt und kann über eine im Gehörgang platzierte Sonde ausgelöst und gemessen werden. Üblicherweise werden zur Auslösung von DPOAEs zwei Miniaturlautsprecher in der Ohrsonde verwendet. In einer innovativen Studie haben wir eine kombinierte Stimulation von otoakustischen Emissionen untersucht, bei der ein Ton wie üblich über einen Miniaturlautsprecher dargeboten und ein zweiter Ton über einen auf den Schädel gesetzten Schwingungserreger appliziert wurde. Diese kombinierte Stimulation erzeugte nachweisbare DPOAEs. (M. Zebian, FB 1.6, makram.zebian@ptb.de)

Überwachung der Läsionsbildung bei HITU-Behandlungen auf der Basis von abgestrahlten Scherwellen

Beim Einsatz von gepulstem HITU (hochintensivem fokussiertem therapeutischem Ultraschall) werden Scherwellen abgestrahlt, die Informationen über den Prozess der Läsionsbildung enthalten. Diese können zur Überwachung des Therapieverlaufs genutzt werden, um Unregelmäßigkeiten frühzeitig zu detektieren und zu vermeiden. (S. Dencks, FB 1.6, stefanie.dencks@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Neues aus der OIML

Vom 11. bis 14. Oktober 2011 fand die 46. Sitzung des Internationalen Komitees für gesetzliches Messwesen (CIML) in Prag statt. Knapp 150 Teilnehmer aus 59 Mitgliedstaaten waren vertreten. Zur deutschen Delegation gehörten

neben dem Autor auch Dr. Heinz Wallerus, Leiter der deutschen Akademie für Metrologie (DAM) und stellvertretender Leiter des Bayerischen Landesamtes für Maß und Gewicht (BLMG). Weiterhin nahmen Prof. Manfred Kochsiek als Ehrenmitglied der OIML und Dr. Eberhard Seiler als „Facilitator for Developing Country Matters“ teil. Vertreten waren auch wieder internationale und regionale Organisationen, zu denen die OIML Verbindungen unterhält, wie das Internationale Büro für Maß und Gewicht (BIPM), die europäische Zusammenarbeit im gesetzlichen Messwesen (WELMEC), die „International Electrotechnical Commission“ (IEC), die „International Laboratory Accreditation Cooperation“ (ILAC) sowie das „International Accreditation Forum“ (IAF) und der europäische Verband der Waagenhersteller (CECIP). Alle Resolutionen der 46. CIML-Sitzung finden sich unter <http://www.oiml.org/download/>. (R. Schwartz, Abt. 1, roman.schwartz@ptb.de)

Erfolgreiches OIML/TC9-R60-Meeting zur Revision der OIML-Empfehlung R60 zur Prüfung von Wägezellen

Neue messtechnische Erkenntnisse, neue Materialien und verbesserte Kompensationsmechanismen sowie die neuen Entwicklungen auf dem Gebiet digitaler Wägezellen erfordern eine Revision der OIML-Empfehlung R60 für Wägezellen. (O. Mack, FB 1.1, oliver.mack@ptb.de)

Abschluss der CCM-Vergleichsmessung für Teile und Vielfache des Kilogramm (CCM.M-K5)

Die Ergebnisse einer internationalen Vergleichsmessung („Key Comparison“) zur Massebestimmung von Massenormalen mit Nennwerten zwischen 200 mg und 2 kg wurden in diesem Jahr veröffentlicht. Alle von der PTB ermittelten Messergebnisse stimmen innerhalb der angegebenen Messunsicherheiten mit den Referenzwerten überein. (M. Borys, FB 1.1, michael.borys@ptb.de)

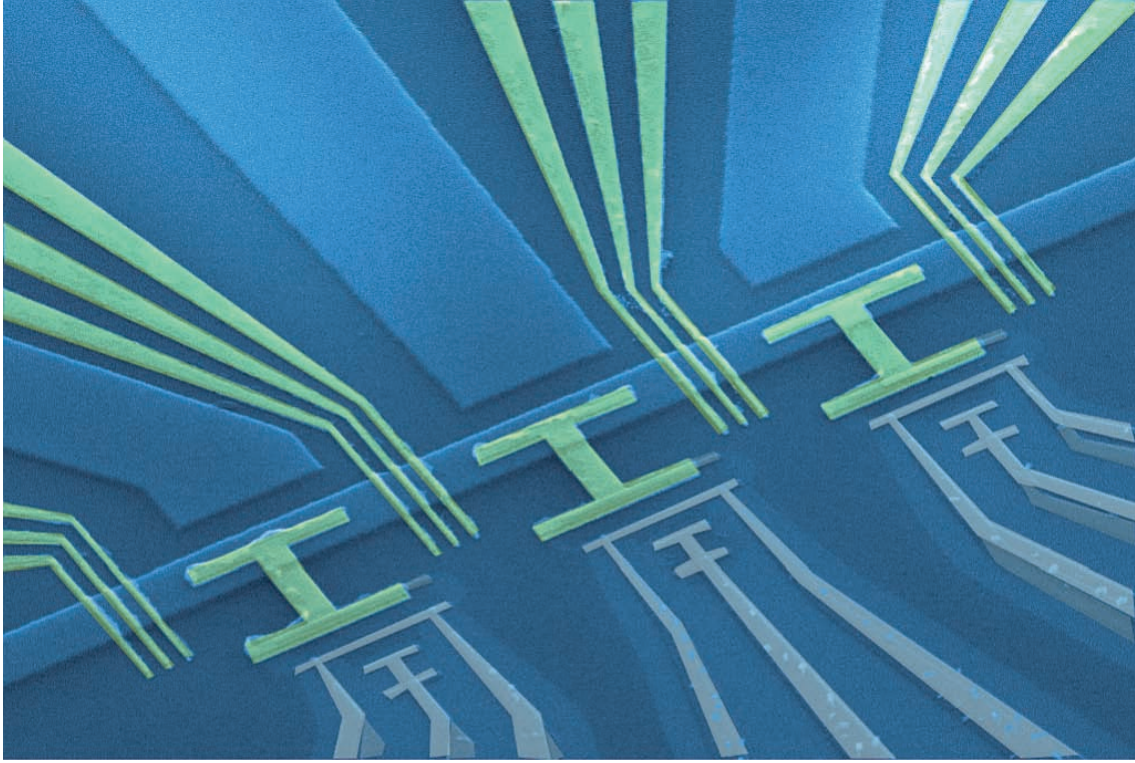
Vollversammlung der Ständigen Internationalen Kommission für den Beschuss von Handfeuerwaffen (C.I.P.) in Abu Dhabi

Im Rhythmus von zwei Jahren treffen sich die Vertreter der vierzehn Mitgliedsstaaten der C.I.P. zu einer mehrtägigen Vollversammlung. Darunter vertreten ist auch Deutschland als eines der zwölf europäischen Länder. Auf der Basis multilateraler Staatsverträge und Ab-

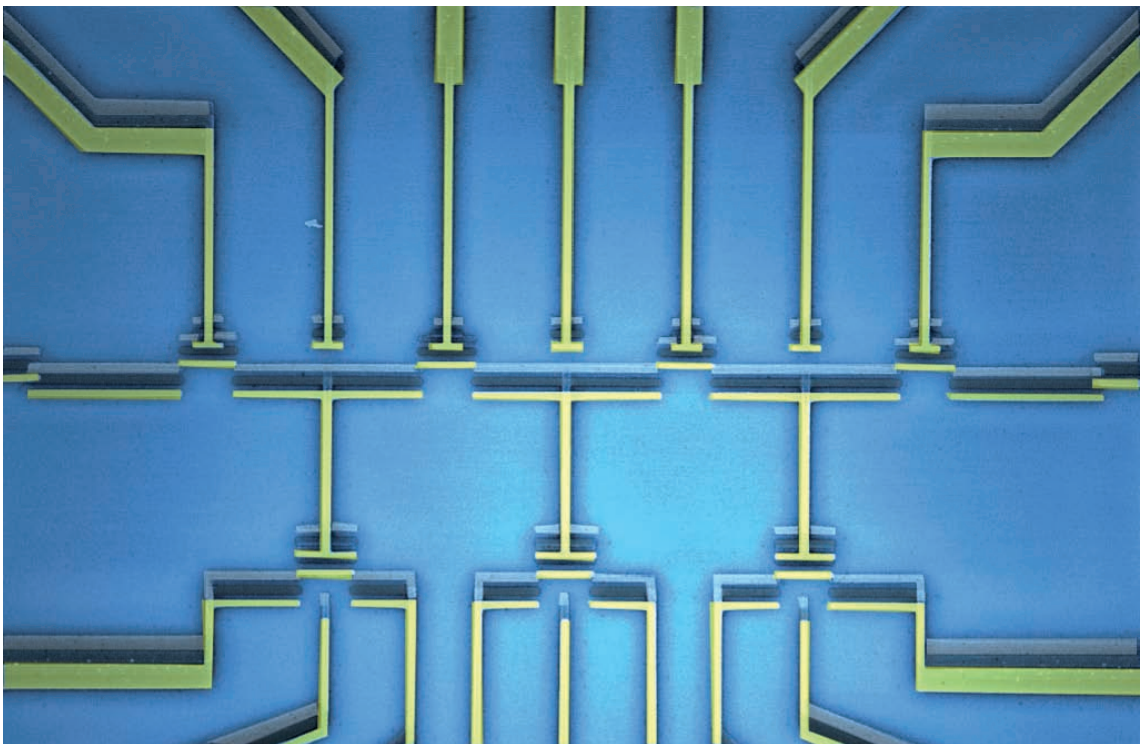
kommen haben sich alle Unterzeichnerländer verpflichtet, ihre Prüfungen und Zulassungen von Handfeuerwaffen, Munition und treibladungsbetriebenen Werkzeugen nach den gemeinsam beschlossenen Regelungen der C.I.P. durchzuführen. (H. Schönekeß, FB 1.3, holger.schoenekess@ptb.de)



Elektrizität



Berichte der Abteilungen



Elektrische Größen treten in nahezu allen Bereichen des Messwesens auf. Aufgabe der Abteilung *Elektrizität* ist die Darstellung und Weitergabe der elektrischen und magnetischen Einheiten. Dazu führt die Abteilung Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der elektrischen Präzisionsmesstechnik durch. Grundlage für diese Arbeiten ist eine auf die Erfordernisse der elektrischen Quantenmetrologie zugeschnittene Nanotechnologie für die In-House-Fertigung von Supraleiter- und Halbleiter-Quantennormalen. Die fachlichen Aufgaben werden in den sechs Fachbereichen *Gleichstrom und Niederfrequenz, Hochfrequenz und Felder, Elektrische Energiemesstechnik, Quantenelektronik, Halbleiterphysik und Magnetismus* und *Elektrische Quantenmetrologie* bearbeitet, in die sich die Abteilung gliedert. Wichtige metrologische Fragestellungen des Themenbereichs *Elektrizität und Magnetismus* erfordern einen fachbereichsübergreifenden Ansatz. Dazu gehören die Schwerpunktthemen *Grundlagen der elektrischen Metrologie, Aufbau von Quanten- und klassischen Skalen für elektrische und magnetische Einheiten* und *Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie*. Diese bilden zusammen mit den auf Fachbereichsebene bearbeiteten Themen *Elektrische Energiemesstechnik* und *Metrologie für magnetische Nanostrukturen* die fünf Schwerpunktthemen der gegenwärtigen Arbeiten.

Zur effizienten Bearbeitung ihrer Forschungs- und Entwicklungsaufgaben kooperiert die Abteilung intensiv mit anderen nationalen metrologischen Instituten im Rahmen des von der EU geförderten European Metrology Research Programme (EMRP). Dessen erste Phase „iMERA-plus“ – mit einem gesonderten Unterprogramm für den Themenbereich *Elektrizität und*

Magnetismus – ist im Berichtsjahr ausgelaufen. Die Abteilung hat die öffentliche Informationsveranstaltung über die Ergebnisse der Projekte zu Themen der elektrischen Quantenmetrologie im Mai 2011 im Institut Berlin der PTB organisiert. Die Veranstaltung erfreute sich des regen Interesses von Vertretern europäischer und außereuropäischer nationaler metrologischer Institute, von Universitäten und der Industrie (Bild 1). Für den Themenbereich *Elektrizität und Magnetismus* stellt das iMERA-plus-Programm einen gelungenen Auftakt der vertieften Zusammenarbeit der europäischen nationalen metrologischen Institute dar. Das Programm hat die fachliche Arbeit der Abteilung nachhaltig gefördert. Die wichtigsten Ergebnisse der fachlichen Arbeit im Berichtsjahr werden im Folgenden, gegliedert nach den fünf Schwerpunktthemen, detaillierter beschrieben.

Grundlagen der elektrischen Metrologie

In der elektrischen Metrologie werden der Josephson- und der Quanten-Hall-Effekt genutzt, um mit höchster Präzision die Einheiten der elektrischen Spannung, des Widerstands und der Kapazität zu reproduzieren. Eine Kernaufgabe im Arbeitsgebiet *Grundlagen der elektrischen Metrologie* ist die Überprüfung der Beschreibung dieser Quanteneffekte durch die Elementarladung und die Planck-Konstante. Dazu dient ein als „quantenmetrologisches Dreieck“ bekannter Konsistenztest. Die PTB arbeitet seit einigen Jahren an der Variante des quantenmetrologischen Dreiecks, bei der die Ladung, die elektrische Spannung und die auf den Quanten-Hall-Effekt rückgeführte Kapazität verknüpft werden (Bild 2). Im Berichtsjahr konnte in der PTB erstmals ein kompletter Durchlauf des komplexen Experiments abgeschlossen werden. Die Auswertung ergab keine Abweichungen von der heutigen Beschreibung der Quanteneffekte bei einer Unsicherheit von $1,7 \cdot 10^{-6}$. Das Experiment wurde vom nationalen metrologischen Institut der USA (NIST) mit einer Unsicherheit von $0,9 \cdot 10^{-6}$ durchgeführt. Da das Experiment der PTB noch verbessert werden kann, bestehen gute Aussichten, diese Bestmarke des NIST zu übertreffen und damit einen nachhaltigen Beitrag zur Validierung der Grundlagen der elektrischen Metrologie zu leisten.

Zur Umsetzung der von der Meterkonvention geplanten Neudefinition des Ampere durch die Festlegung der Elementarladung entwickelt die

Titelbild:

Integrierte Quantenschaltungen für die elektrische Quantenmetrologie. Oben: Reihenschaltung aus vier Halbleiter-Einzelelektronenpumpen und drei Ladungsinselfen, deren Ladungszustand von Einzelelektronen-Elektrometern überwacht wird. Unten: Reihenschaltung aus vier metallischen Einzelelektronenquellen und drei Ladungsinselfen mit Einzelelektronen-Elektrometern.



Bild 1: Teilnehmer des „Joint iMERA-plus Dissemination Meeting and EURAMET Expert Meeting on Quantum Electrical Metrology“ vor dem Helmholtz-Bau der PTB Berlin

Abteilung Quanten-Stromquellen auf der Basis von Halbleiter-Einzelelektronenpumpen und metallischen Einzelelektronenquellen. In diesen nanoelektronischen Schaltungen wird mit einer vorgegebenen Frequenz pro Zyklus eine feste Anzahl von Elementarladungen durch einen Leitungsquerschnitt transportiert. Um etwaige Transferfehler zu bestimmen, müssen die Stromquellen mit Einzelelektronen-Elektrometern auf einem Chip kombiniert werden. Man erhält so eine „selbstreferenzierte“ Quanten-Stromquelle. Im Berichtsjahr wurde eine integrierte Quantenschaltung aus zwei Halbleiter-Einzelelektronenpumpen, einer Ladungsinsel und einem Ladungsdetektor gefertigt und untersucht (Bild 3). Die Ladungsdetektion führt zu Rückkopplungseffekten, die die Funktion der Einzelelektronenpumpen stabilisieren. Dies zeigt, dass ein stabiler Betrieb solcher integrierten Quantenschaltungen prinzipiell möglich ist. Komplexere integrierte Schaltungen

aus mehreren Einzelelektronenquellen und -detektoren wurden kürzlich gefertigt (Titelbild) und werden intensiv untersucht.

Die Integration verschiedener Quantenbauelemente auf einem Chip eröffnet neue Möglichkeiten in der elektrischen Quantenmetrologie. Im Berichtsjahr wurde, neben den Arbeiten zu den selbstreferenzierten Quanten-Stromquellen, eine Quanten-Spannungsquelle auf Halbleiterbasis demonstriert (siehe auch die Rubrik „Nachrichten des Jahres“). Dazu wurde eine Halbleiter-Einzelelektronenpumpe mit einem Quanten-Hall-Widerstand in einer integrierten Halbleiter-Quantenschaltung kombiniert. Das Bauelement erzeugt quantisierte Spannungen von bis zu $10 \mu\text{V}$. Die Ausgangsspannung lässt sich durch Parallelschaltung mehrerer Einzelelektronenpumpen sowie durch Serienschaltung mehrerer Quanten-Hall-Widerstände auf dem Halbleiterchip im Prinzip um bis zu einem Faktor 1000 erhöhen. Ein solches Bauelement würde On-Chip-Varianten des Experiments „direktes quantenmetrologisches Dreieck“ ermöglichen, in dem die Quantennormale für Strom, Widerstand und Spannung verglichen werden.

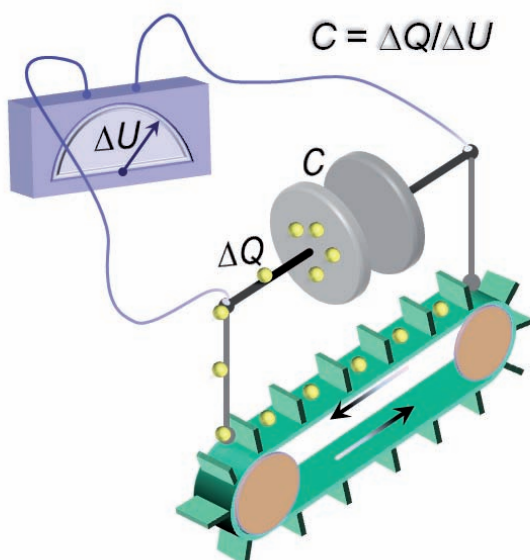


Bild 2: Schema des Konsistenztests „quantenmetrologisches Dreieck“ in der Kapazität-Spannung-Variante. Ein Kondensator der Kapazität C , rückgeführt auf den Quanten-Hall-Effekt, wird mittels einer Einzelelektronenpumpe – hier dargestellt als Förderband – mit einer genau bekannten Anzahl von Elektronen geladen. Die Ladung ΔQ baut eine Spannung ΔU zwischen den Kondensatorelektroden auf, welche rückgeführt auf den Josephson-Effekt gemessen wird.

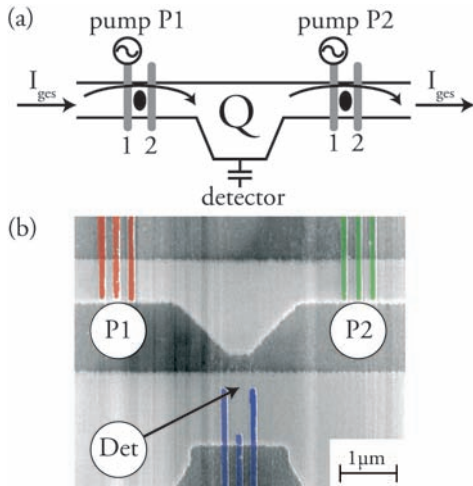


Bild 3: Schema (a) und Bild der Probe (b): Zwei Halbleiter-Einzelelektronenpumpen (P1 und P2), realisiert durch Metallelektroden (rot, grün) auf einem Halbleiterkanal (hellgrau), sind durch eine zwei Mikrometer große Insel verbunden. Unter der Insel ist ein Ladungsdetektor (Det) platziert, der die Ladung Q auf der Insel misst.

Aufbau von Quanten- und klassischen Einheitskalen

Die Industrie benötigt Kalibrierungen von Messgeräten und Normalen für elektrische Größen in sich ständig erweiternden Werte- und Frequenzbereichen. Daher arbeitet die Abteilung an dem Ausbau der Skalenbereiche, über die die elektrischen Einheiten dargestellt und weitergegeben werden können. Dabei werden der Zeit- und der Kostenfaktor zunehmend wichtiger. Durch die vermehrte

Nutzung von Quantennormalen sollen die Kalibrierverfahren vereinfacht und eine Zeit- und Kostenersparnis erzielt werden.

Im Berichtsjahr sind gute Fortschritte auf dem Gebiet der Technologie zur Herstellung von Josephson-Kontakten und bei der Nutzung von Josephson-Spannungsnormalen in der Wechselspannungsmesstechnik erzielt worden. Die in den letzten Jahren im Reinraumzentrum der PTB entwickelte Technologie zur Herstellung von SNS-Josephson-Kontakten (S: Supraleiter, N: Normalleiter) mit der Schichtfolge $Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb$ wird inzwischen für mehrere Anwendungen genutzt (Nb: Niob, Si: Silizium). Wesentliche Voraussetzung dafür war die erfolgreiche Optimierung von kritischer Stromdichte und charakteristischer Spannung der Josephson-Kontakte. Beide können weitgehend unabhängig voneinander durch die Schichtdicke und die Zusammensetzung der normalleitenden Barriere (Niob-Anteil: x) bei der Abscheidung der Dreifachschicht in einer speziellen Cluster-Beschichtungsanlage festgelegt werden. Mit dieser Technologie können inzwischen im Routinebetrieb programmierbare binäre 10-V-Josephson-Spannungsnormale für Wechselstromanwendungen bis zu etwa 1 kHz mit einer guten Fertigungsausbeute hergestellt werden.

Die $Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb$ -Technologie wurde auch für die Herstellung von pulsgetriebenen Josephson-Normalen optimiert, die den Frequenzbe-

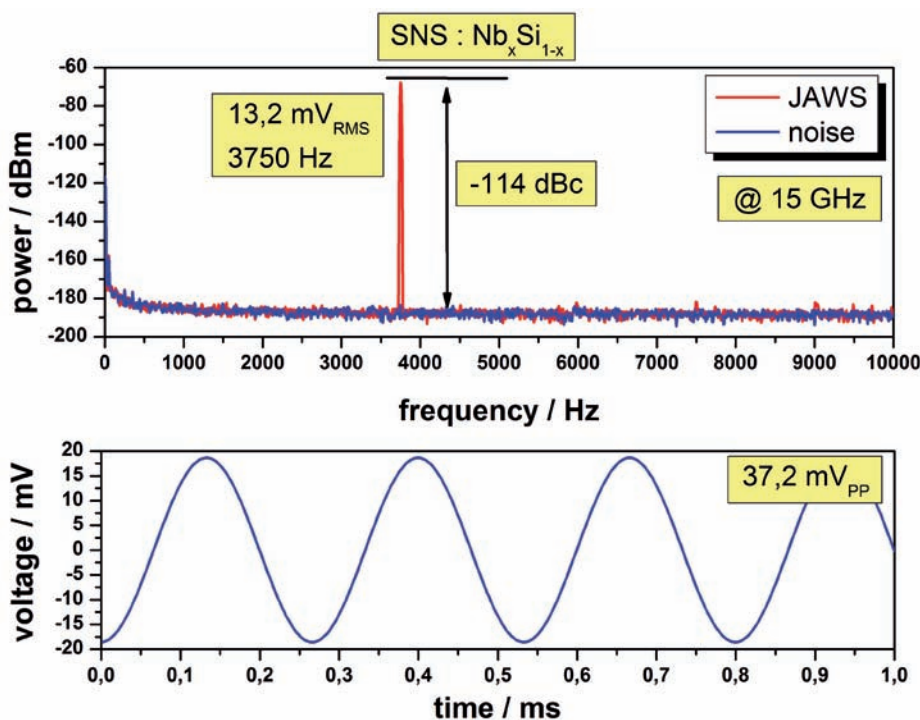


Bild 4: Frequenz- und Zeitdarstellung einer synthetisierten sinusförmigen Wechselspannung mit einer Frequenz von 3750 Hz, erzeugt mit einer pulsgetriebenen Josephson-Schaltung aus 2000 Kontakten mit Nb_xSi_{1-x} -Barrieren. Die Pulsfolgefrequenz beträgt 15 GHz.

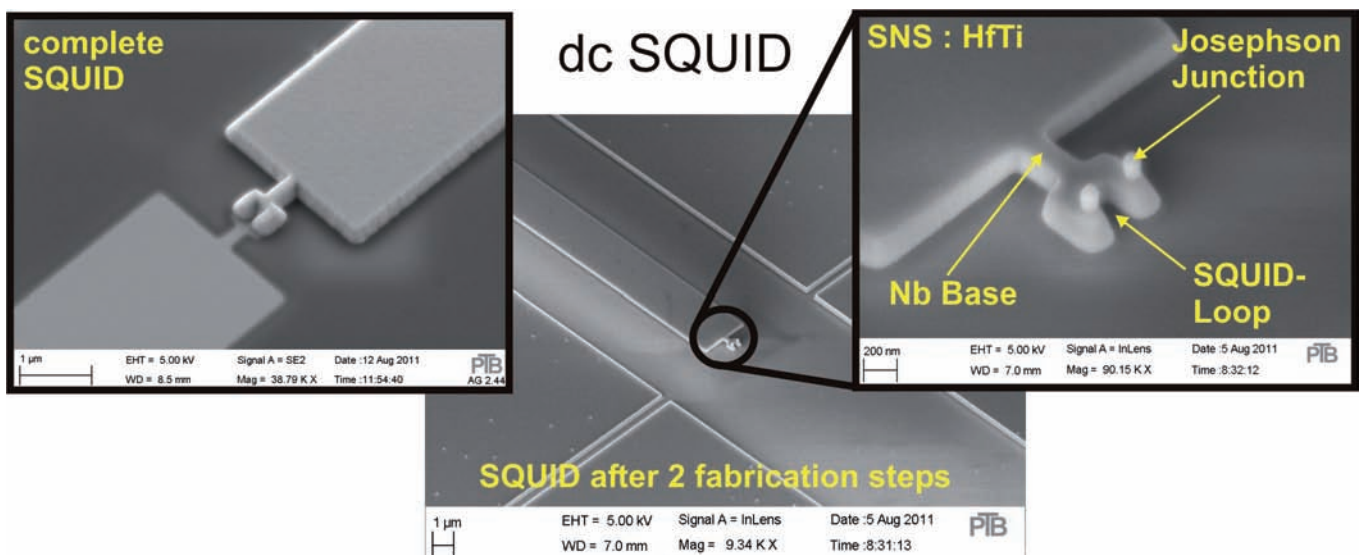
reich oberhalb von 1 kHz für die Josephson-gestützte Wechselstrommesstechnik erschließen sollen. Bei einer im Vergleich zu früheren Schaltungen verdreifachten Pulsfolgefrequenz von 15 GHz konnten im Berichtszeitraum mit Schaltungen aus 2000 Josephson-Kontakten sinusförmige Spannungen mit reinen Spektren und Amplituden von 37 mV (Spitze zu Spitze) bei einer Frequenz von 3,75 kHz erzeugt werden (Bild 4). Durch eine Optimierung der elektronischen Peripherie sollen Spannungen mit Amplituden von mehr als 100 mV erzeugt werden, sodass mit diesen Quantennormalen messtechnische Anwendungen realisiert werden können.

Josephson-Kontakte sind das Herzstück von SQUIDS (Superconducting Quantum Interference Devices), mit denen Änderungen des magnetischen Flusses mit hoher Empfindlichkeit gemessen werden können. Miniaturisierte SQUIDS, wegen ihrer kleinen Abmessungen als Nano-SQUIDS bezeichnet, zeigen deutlich verringertes Fluss-Rauschen und erlauben die Entwicklung höchstempfindlicher Magnetometer. Mit Hilfe der SNS-Technologie, hier mit normalleitenden Barrieren aus HfTi, ist es im Berichtszeitraum gelungen, Josephson-Kontakte mit Abmessungen von nur noch 90 nm und SQUID-Schleifen mit einer Größe von 150 nm herzustellen (Bild 5). Bei der Miniaturisierung wird ausgenutzt, dass bei Verwendung einer normalleitenden Barriere keine großvolumigen externen Widerstände erforderlich sind.

Die Entwicklung neuer Kalibrierverfahren basierend auf Josephson-Spannungsnormalen konzentrierte sich im Berichtszeitraum auf Impedanzmessbrücken. Impedanzen – Wechselstromwiderstände, Kapazitäten und Induktivitäten – können mit konventionellen Messbrücken im Frequenzbereich von 500 Hz bis 10 kHz mit einer sehr guten Messunsicherheit im Bereich 10^{-9} kalibriert werden. Dazu müssen die Brücken jedoch in einer aufwendigen Prozedur manuell für jede Frequenz neu abgeglichen werden. Mit der in der PTB neu entwickelten Josephson-Impedanzmessbrücke ist der Abgleich dagegen sehr einfach. Die Wechselspannungsamplituden von zwei programmierbaren binären Josephson-Schaltungen werden über ihre Mikrowellenfrequenz variiert, und die Phasenlage der synthetisierten Spannungen wird über eine Verzögerungselektronik mit einer Auflösung von 10 ps eingestellt (Bild 6). Beides geschieht vollautomatisch. Für 1:1-Verhältnisse von 10-k Ω -Widerständen oder 100-pF-Kondensatoren wurde die Leistungsfähigkeit des neuen Verfahrens überzeugend demonstriert. Ziel der zukünftigen Arbeiten ist der Ausbau zu einer Quadraturbrücke, die es erlaubt, Wechselstromwiderstände mit Kapazitäten zu vergleichen.

Während sich die Impedanzmessung mit Hilfe von Josephson-Technologie noch im Entwicklungsstadium befindet, ist die Josephson-gestützte Spannungsmessung bereits reif für den Transfer in die Industrie. Im Berichtsjahr wurde ein durch das MNPQ-Transfer-Programm

Bild 5: Raster-Elektronenmikroskop-Aufnahmen einer Nano-SQUID-Schaltung. Die Josephson-Kontakte sind 90 nm groß, die SQUID-Schleife hat eine Größe von 150 nm.



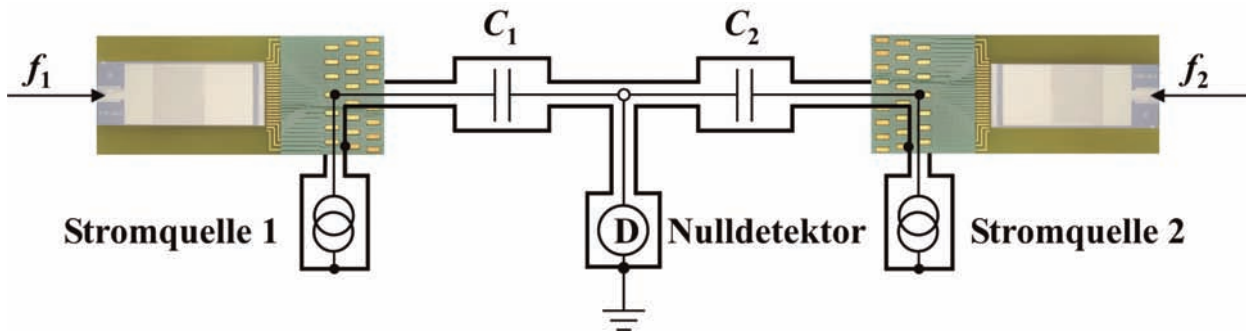


Bild 6: Schematischer Aufbau der Josephson-Impedanzmessbrücke. Über die Variation der Mikrowellenfrequenzen f_1 und f_2 werden die Josephson-Spannungen eingestellt und die Brücke automatisch abgeglichen.

(Messen, Normen, Prüfen, Qualitätssicherung) des Bundeswirtschaftsministeriums gefördertes Projekt begonnen, das zum Ziel hat, ein Josephson-Messsystem für Gleich- und Wechselspannungen für den Einsatz in industriellen Kalibrierlaboratorien weiterzuentwickeln. Das Messsystem wird für Spitzenspannungen bis ± 10 V und Frequenzen bis 1 kHz ausgelegt. Damit deckt es den Bereich kommerzieller Gleichspannungsreferenzen ab und bildet gleichzeitig eine Plattform für Wechselspannungs-Präzisionsmessungen. Für die Partner in der Industrie werden mit dem neuen System die Vorteile von Quantennormalen verfügbar: hervorragende Messunsicherheiten bei erhöhter Wirtschaftlichkeit durch den Wegfall aufwendiger Rekalibrierungen.

Elektrische Energiemesstechnik

Die Arbeiten im Schwerpunktgebiet *Elektrische Energiemesstechnik* haben zum Ziel, die metrologischen Grundlagen für die Energieversorgungsmesstechnik auszubauen. Dies umfasst die Darstellung der elektrischen Leistung über weite Bereiche von Strom und Spannung, die

Erfassung von Netzstörungen, die Rückführung der Messung von Verlusten beim Energietransport und die Messtechnik für die korrekte Abrechnung der von den Verbrauchern bezogenen elektrischen Energie.

Im Berichtsjahr wurde das Primärnormal der PTB für die elektrische Leistung für Stromstärken bis zu 160 A erweitert. Zur Erfassung von Netzstörungen, die aufgrund der Zunahme von nichtlinearen Lasten und der steigenden Anzahl regenerativer Energiequellen in den Versorgungsnetzen vermehrt auftreten, wurde ein vielseitig einsetzbares digitales Abtastsystem entwickelt, das über eine hohe Linearität verfügt (Bild 7). Derartige Digitalisierer sind das Kernstück von Wechselleistungsmesseinrichtungen und Netzqualitätsmessgeräten, da sie die Signale von Transduktoren in digitale Werte für eine spätere Analyse umwandeln. Das Gerät nutzt ein von der PTB zum Patent angemeldetes Verfahren zur Selbstsynchronisation und kann Spannung, Wechselleistung und Spannungsverhältnisse messen. Eine spezielle Software erlaubt die Messung kurzer Spannungsschwankungen (Flicker, nach IEC 61000-4-15), sodass das System auch als Referenz-Flickermeter verwendet werden kann.

Die Arbeiten zur Messung von Verlusten beim Transport elektrischer Energie konzentrieren



Bild 7: Vielseitig verwendbares dreiphasiges Abtastsystem. Das Messgerät ermöglicht Messungen von Spannungen und der elektrischen Leistung mit Messunsicherheiten von einigen mV/V, mrad oder mW/VA bei Netzfrequenzen.

sich auf die Gleichstrom-Energiemesstechnik. Dieses Gebiet wird im Rahmen eines EMRP-Projektes bearbeitet, das zum Ziel hat, die metrologische Infrastruktur für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) zu schaffen. Das HGÜ-Verfahren erlaubt es, elektrische Energie mit geringen Verlusten über große Distanzen zu transportieren und so z. B. Off-Shore-Windkraftanlagen in das Versorgungsnetz einzubinden. Die PTB entwickelt im Rahmen des Projekts ein Primärnormal für den Wirkungsgrad der Konverter, die das Gleichstrom- an das Wechselstromnetz anbinden. Auch die Arbeiten zur Abrechnungsmesstechnik konzentrieren sich auf die Gleichstrom-Energiemesstechnik.

Metrologie für magnetische Nanostrukturen

Die Arbeiten im Gebiet Nanomagnetismus fokussieren sich auf die Entwicklung und Rückführung von dynamischen Messverfahren für die Kenngrößen nanomagnetischer Strukturen. Hier lag bereits in der Vergangenheit der Schwerpunkt der Aktivitäten. Zur Schärfung des Profils des Arbeitsgebiets soll in Zukunft ausschließlich das Gebiet der Magnetisierungsdynamik bearbeitet werden. In diesem Teilgebiet wurde im Berichtsjahr die Messtechnik für die Untersuchung thermischer Effekte in nanomagnetischen Tunnelstrukturen entwickelt. Derartige Tunnelstrukturen bilden das Herzstück nichtflüchtiger magnetischer Speicherchips (MRAM, magnetic random access

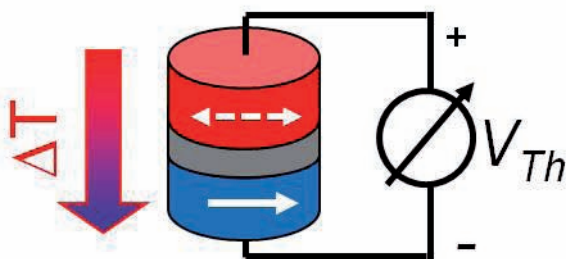


Bild 8: Eine magnetische Tunnelstruktur besteht aus zwei magnetischen Schichten (rot, blau), die durch eine nur etwa einen Nanometer dünne Isolationsschicht (grau), die sogenannte Tunnelbarriere, getrennt sind. Erzeugt man eine Temperaturdifferenz ΔT über die Barriere, so fällt zwischen der heißen (rot) und der kalten (blau) Schicht eine Thermospannung V_{Th} ab. Ändert man die magnetische Ausrichtung der heißen Schicht gegenüber der Ausrichtung der kalten (Pfeile), führt das zu einer starken Änderung der gemessenen Thermospannung.

memory). Experimentell konnte erstmals gezeigt werden, dass die Thermospannung, getrieben von einem Temperaturgradienten über die Tunnelstruktur, stark von der Orientierung der Magnetisierung der beiden Schichten der Tunnelstruktur abhängt (Bild 8). Durch Schalten der Magnetisierung kann also die Thermospannung und letztendlich auch der thermische Strom durch die Tunnelstruktur kontrolliert werden. Diese Arbeiten leisten einen bedeutenden Beitrag zu dem neuen Forschungsgebiet „Spinkalorik“, das sich mit thermischen Effekten in der Spinelektronik beschäftigt.

Eine wichtige Anwendung magnetischer Nanostrukturen ist die Sensorik. Magnetische Sensoren kommen in der Medizintechnik, in der Automobilindustrie und in der Informationstechnologie zum Einsatz. So werden z. B. in heutigen Automobilen im Durchschnitt acht bis zehn magnetische Sensoren verbaut. Die immer höheren Anforderungen an neue Sensorgenerationen in Bezug auf Empfindlichkeit, Signal-Rauschverhältnis und Bandbreite erfordern immer bessere Messtechniken, um diese Sensoren auch in Zukunft zuverlässig charakterisieren zu können. Die Entwicklung neuer und zuverlässiger Messtechniken für magnetische Sensoren ist das Ziel eines im Berichtsjahr begonnenen EMRP Forschungsprojekts, das von der PTB geleitet wird.

Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie

Die Erweiterung der Messmöglichkeiten zu höheren Frequenzen ist das Ziel im Schwerpunktgebiet *Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie*. In diesem Gebiet wird sich die PTB in Zukunft auf Messtechnik für Freiraumstrahlung sowie auf die Messtechnik für Koaxial- und Hohlleiter konzentrieren.

Im Berichtsjahr ist bei der Bestimmung der Frequenz von Freiraumstrahlung ein Durchbruch gelungen. Mit Hilfe optoelektronischer Methoden und unter Nutzung des Frequenzkamms eines unstabilierten Femtosekundenlasers und des aus der optischen Frequenzmessung bekannten Transferoszillator-Konzepts konnte die Frequenz von 100-GHz-Strahlung mit einer Unsicherheit von $9 \cdot 10^{-14}$ bestimmt werden. Dies ist eine Verbesserung von zwei Größenordnungen gegenüber dem bisherigen Stand der Technik.

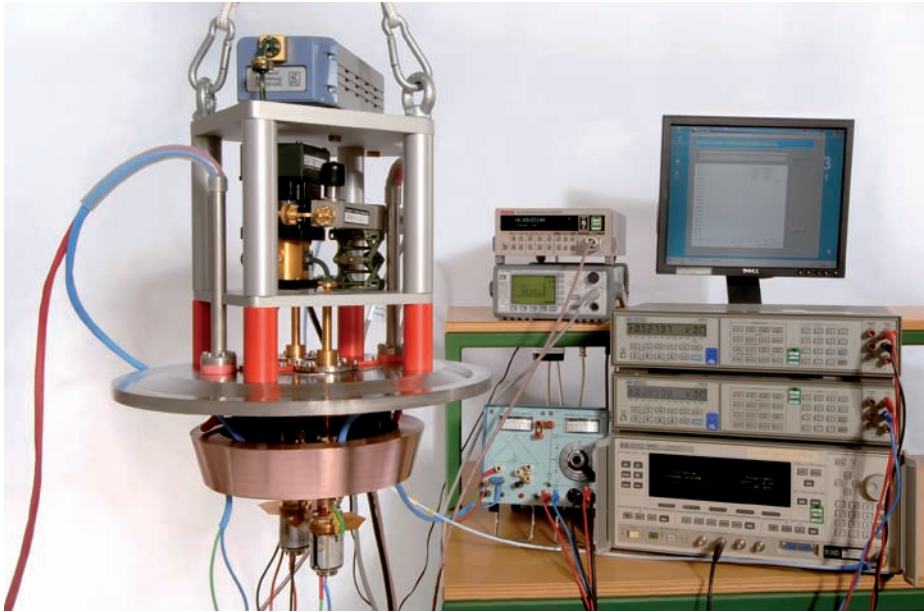


Bild 9: Hohlleiterkalorimeter für den Frequenzbereich 75 GHz–110 GHz

Um die Rückführungsmöglichkeiten für akkreditierte Kalibrierlaboratorien im Bereich der Hochfrequenzleistung auszubauen, wurde ein Hohlleitermikrokalorimeter für den Frequenzbereich 75 GHz–110 GHz aufgebaut und in Betrieb genommen. Damit erweitert die PTB ihr Leistungsangebot im Bereich der Kalibrierung von Hochfrequenzleistungssensoren (Bild 9).

Im Bereich der Dosimetrie nichtionisierender Strahlung sind zwei Projekte erfolgreich abgeschlossen worden. Im iMERA-plus-Projekt „Traceable measurement of field strength and SAR for the Physical Agents Directive“ wurden, koordiniert durch die PTB, messtechnische Lösungen für die Bestimmung der elektrischen Feldstärke und der spezifischen

Absorptionsrate (SAR) bei Frequenzen erarbeitet, bei denen bisher die Rückführung auf die Einheiten des internationalen Einheitensystems nicht möglich war (Bild 10). Dadurch wird die im Bereich des Arbeitsschutzes geltende EU-Direktive EC 2004/40/EC „Physical Agents Directive“ messtechnisch unterlegt. Weiterhin wurde das vom Bundesamt für Strahlenschutz geförderte dreijährige Projekt „Gentoxische Effekte von Terahertz-Strahlung in vitro?“ erfolgreich abgeschlossen. In dem interdisziplinären Vorhaben, in dem Hautzelllinien Terahertz-Strahlung ausgesetzt wurden, wurden keine gentoxischen Effekte gefunden.

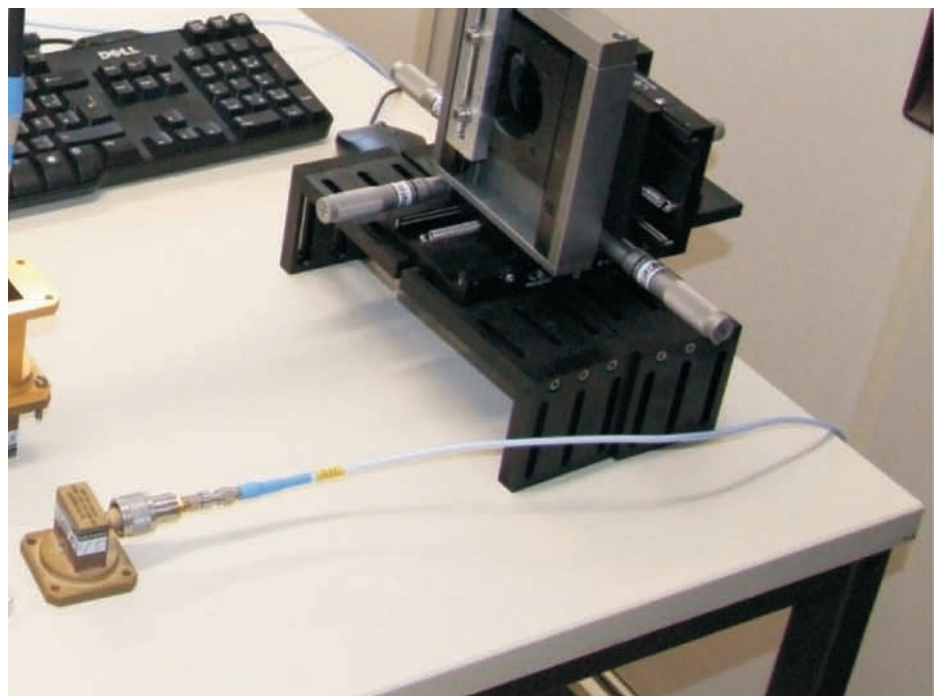


Bild 10: Aufbau zur Kalibrierung einer Sonde für die spezifische Absorptionsrate in einem mit bekanntem Dielektrikum gefüllten Hohlleiter für den Frequenzbereich zwischen 6 GHz und 10 GHz.



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

Hybride Supraleiter-Normalleiter-Einzelelektronenfallen mit extrem langen Haltezeiten

Die Einzelelektronen-Haltezeiten einer hybriden Speicherzelle („two-junction trap“) konnten durch gezielte Unterdrückung des Einzelphotonen-Emissionsrauschens ihrer unmittelbaren elektromagnetischen Umgebung um mehrere Größenordnungen verlängert werden. Dank eines elektrostatisch doppelt-geschirmten Probenraums im Messkryostaten des finnischen metrologischen Instituts MIKES stieg die Haltezeit einer Speicherzelle von ursprünglich 20 s um drei Größenordnungen auf ca. 10 Stunden an. Auch in einer Standard-Messeinrichtung gelang es, durch On-Chip-Integration der Speicherzelle mit einer RC-Filterung und einer Abschirmung der koplanaren Grundplatte die Haltezeiten auf bis zu 40 Minuten zu erhöhen. (S. Lotkhov, FB 2.4, sergey.lotkhov@ptb.de)

Einzelelektronenpumpen mit SET-Fehlerdetektoren: Herstellung und erste Messungen

Zur Detektion von Pumpfehlern wurden Serienschaltungen von Einzelelektronenpumpen zusammen mit Einzelelektronen-Transistoren auf einem Chip integriert. (R. Dolata, FB 2.4, ralf.dolata@ptb.de)

Durchstimmbare Sub-THz-Oszillatoren basierend auf Serienschaltungen von Nb-Nb_xSi_{1-x}-Nb-Josephsonkontakten

In Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich und dem Institut für Mikrostrukturphysik RAS in Nizhny Novgorod, Russland gelang die Herstellung von Josephson-Oszillatoren mit einer bei Zimmertemperatur verfügbaren Leistung von bis zu 7 μ W im Frequenzbereich von 0,15 THz bis 0,25 THz. (F. Müller, FB 2.4, franz.mueller@ptb.de)

Nano-SQUIDs mit SNS-Josephson-Kontakten kleiner als 100 nm

In einer Kooperation mit der Universität Tübingen wurden verschiedene Nano-SQUID-Schaltungen hergestellt und erfolgreich eingesetzt. Durch Weiterentwicklung der Technologie konnten SQUID-Designs weiter miniaturisiert werden, wobei Josephson-Kontakte mit Ab-

messungen kleiner als 100 nm realisiert wurden. (O. Kieler, FB 2.4, oliver.kieler@ptb.de)

Josephson-Kontakte mit Nb_xSi_{1-x}-Barrieren ermöglichen höhere Ausgangsspannungen von pulsgetriebenen AC-Spannungsnormalen

Die Ausgangsspannung von Spannungsnormalen aus pulsgetriebenen AC-Josephson-Schaltungen konnte durch den Einsatz von Josephson-Kontakten mit Nb_xSi_{1-x}-Barrieren erhöht werden, wodurch ein Betrieb bei höheren Pulsfrequenzen ermöglicht wird. (O. Kieler, FB 2.4, oliver.kieler@ptb.de)

Untersuchung von supraleitenden On-Chip-Nb-Resonatoren mit Koppelkapazitäten im Mikrowellenbereich

Für den Frequenzbereich 2 GHz – 6 GHz wurden verschiedene On-Chip-Mikrowellenkomponenten entwickelt und hergestellt, darunter supraleitende Koplanar-Wellenleiter-Resonatoren und LC-Resonatoren hoher Güte. Die Integration von Josephsonkontakten oder SQUIDs in diese supraleitenden Resonatoren soll die Messung von kleinsten Signalen mit hoher Empfindlichkeit ermöglichen. (M. Khabipov, FB 2.4, marat.khabipov@ptb.de)

Nb_xSi_{1-x}-Josephson-Kontakte für programmierbare 10-V-Spannungsnormale

Zur Herstellung optimierter programmierbarer 10-V-Spannungsnormalschaltungen für den Einsatz bei 70 GHz werden in der PTB SNS-Josephson-Kontakte mit Nb_xSi_{1-x}-Barrieren eingesetzt. (J. Kohlmann, FB 2.4, johannes.kohlmann@ptb.de)

Einzel-Cooper-Paar-Transistor auf Basis supraleitender Nanodrähte

Aus einer amorphen NbSi-Schicht wurde eine Transistor-Nanodrahtstruktur hergestellt, die aus einer Insel zwischen zwei schmalen Bereichen und einer daran kapazitiv angekopplten Gateelektrode besteht. Im Experiment zeigte die Struktur die erwartete periodische Abhängigkeit der *IU*-Kennlinie von der Gate-spannung. (A. Zorin, FB 2.4, alexander.zorin@ptb.de)

Ladungsträgeroszillationen in GaAs-Quantenfilmen

Durch Anregung von GaAs-Quantenfilmen mit Femtosekunden-Laserimpulsen wurden ultraschnelle Oszillationen von Ladungsträgern in der Ebene der Quantenfilme induziert. Diese Oszillationen, die ohne das Anlegen eines äußeren Feldes auftreten, zeigen, dass der Übergang von leichten zu schweren Löchern in GaAs-Quantenfilmen zur Emission von THz-Strahlung genutzt werden kann. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

Hochpräzise Frequenzmessungen im THz-Spektralbereich

Durch Konvertierung eines optischen Frequenzkamms in den THz-Bereich wurde eine Technik zur hochpräzisen, rückführbaren Messung von THz-Frequenzen demonstriert. (H. Füser, FB 2.5, heiko.fueser@ptb.de)

Magnetischer Nanoschalter für Thermospannungen

Ein neu entdeckter Effekt in magnetischen Tunnelstrukturen erlaubt die Kontrolle von Thermospannungen in nanoelektronischen Schaltungen. (H.W. Schumacher, FB 2.5, hans.w.schumacher@ptb.de)

Halbleiter-Quanten-Spannungsquelle

In der PTB konnte erstmals mit einer integrierten Halbleiterschaltung eine quantisierte Spannung erzeugt werden. Dies gelang durch Verbindung einer Einzelelektronenpumpe und eines Quanten-Hall-Widerstandes auf einem Halbleiterchip. Bislang konnten solche quantisierten Spannungen nur mittels supraleitender Schaltungen erzeugt werden. (F. Hohls, FB 2.5, frank.hohls@ptb.de)

Kontrolle einzelner Elektronen bei höchsten Magnetfeldern – ein neues Werkzeug für die Forschung

Eine halbleiterbasierte Einzelladungspumpe ermöglicht die kontrollierte Emission einzelner Elektronen und Löcher in ein zweidimensionales Elektronensystem auch noch bei höchsten Magnetfeldern von 30 Tesla. Dies erlaubt die gezielte Erzeugung von Anregungen in ganzzahligen und insbesondere auch fraktionalen Quanten-Hall-Systemen. (F. Hohls, FB 2.5, frank.hohls@ptb.de)

Serienschaltungen von Halbleiter-Einzelelektronenpumpen – Stabilisierung durch Rückkopplung

Die Serienschaltung von Halbleiter-Einzelelektronenpumpen mit integrierter Ladungsdetektion stellt einen wichtigen Schritt auf dem Weg zu einem zukünftigen Quanten-Stromstandard dar. Dabei auftretende Rückkopplungseffekte können zudem die Stabilität der Einzelelektronenpumpen verbessern. (F. Hohls, FB 2.5, frank.hohls@ptb.de)

Superdomänen in ferromagnetischen Schichten mit Lochgittern

Durch Strukturierung ferromagnetischer Filme mit periodischen Lochgittern auf Nanometerskala lassen sich die Eigenschaften der Filme gezielt verändern. In systematischen Untersuchungen der magnetischen Eigenschaften solcher Lochgitter konnte nun erstmals ein neuartiger Typ magnetischer Domänenübergänge, die sogenannten Superdomänenwände, nachgewiesen und untersucht werden. (S. Sievers, FB 2.5, sibylle.sievers@ptb.de)

Erster Durchlauf des „Electron Counting Capacitance Standard“-Experiments in der PTB gelungen

Das „Electron Counting Capacitance Standard“ (ECCS)-Experiment ermöglicht die Durchführung eines fundamentalen Konsistenztests zwischen den in der elektrischen Metrologie eingesetzten Quanteneffekten, dem Josephson- und dem Quanten-Hall-Effekt. In der PTB ist die Durchführung dieses Experiments nun erstmalig gelungen. Die in diesen, noch vorläufigen, Testdurchläufen bereits erzielte geringe relative Unsicherheit von weniger als $2 \cdot 10^{-6}$ ist sehr vielversprechend im Hinblick auf weitere Verbesserungen des Experiments, die in der PTB zurzeit vorangetrieben werden. Nach Umsetzung dieser Optimierung soll das Experiment mit einer um eine weitere Größenordnung verbesserten Unsicherheit durchgeführt und damit erfolgreich abgeschlossen werden. (H. Scherer, FB 2.6, hansjoerg.scherer@ptb.de)

Quantenbasierte Impedanzmessbrücken ermöglichen breitbandige Kalibrierung von Impedanzverhältnissen

Eine neu entwickelte Messbrücke, bei der programmierbare Josephson-Schaltungen eingesetzt werden, erlaubt die breitbandige Charakterisierung von Widerstands- und Kapazitätsverhältnissen mit hoher Präzision in-



nerhalb einer kurzen Messzeit. (L. Palafox, FB 2.6, luis.palafox@ptb.de)

Elektrische Eigenschaften von Graphen auf Galliumarsenid

Nach der erfolgreichen Präparation der ungewöhnlichen Materialkombination Graphen auf Galliumarsenid wurden, als Voraussetzung für mögliche weitere Anwendungen, erstmals auch die elektrischen Transporteigenschaften solcher Proben untersucht. (M. Woszczyzna, FB 2.6, mirosław.woszczyzna@ptb.de)

Graphen-p-n-Reihenschaltungen als quantisierte Widerstandsnormale

Es wurde ein Konzept für ein Quanten-Hall-Effekt-Bauelement demonstriert, bei dem die besondere Eigenschaft des Materials Graphen ausgenutzt wird, elektrischen Transport mit positiven und negativen Ladungsträgern zu ermöglichen. In Reihenschaltungen kann man damit quantisierte Hall-Widerstände als ganzzahlige Vielfache von $h/2e^2$ realisieren. (M. Woszczyzna, FB 2.6, mirosław.woszczyzna@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Breitbandige On-Wafer-Kalibriernormale in CMOS-kompatibler Membrantechnologie

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrotechnologie der TU Braunschweig wurde ein reflexionsarmer Übergang von hochleitfähigem Silizium zu einem in Membrantechnologie gefertigten koplanaren Wellenleiter entwickelt, gefertigt und messtechnisch bis 110 GHz charakterisiert. Die Leitungsstruktur kann als Kalibriernormal für On-Wafer-Streuparametermessungen mit höchster Präzision eingesetzt werden. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

Simulation parasitärer Moden in On-Wafer-Kalibriersubstraten gelungen

In Zusammenarbeit mit dem Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik in Berlin und dem NIST, dem nationalen metrologischen Institut der USA, in Boulder, Colorado, ist erstmals die numerische Simulation unerwünschter Moden in kommerziellen On-Wafer-Kalibriersubstraten gelungen. Die Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgte mit Streuparametermessungen im Frequenzbereich 1 GHz bis 110 GHz. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

Elektromagnetische Charakterisierung von Materialien für Industrieanwendungen bis in den Mikrowellenbereich

Im Rahmen des europäischen Forschungsprogramm EMRP ist im Juli 2011 das Projekt EMINDA (Electromagnetic Characterisation of Materials for Industrial Applications up to Microwave Frequencies) erfolgreich gestartet. Ziel des Projektes ist es, unterschiedliche Methoden für die Charakterisierung von Materialien im Hochfrequenzbereich zu entwickeln und für die Industrie ein entsprechendes Kalibrierangebot zu schaffen. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

Hochfrequenz-Leistungskalibrierung im Frequenzbereich 75 GHz bis 110 GHz

Mit dem Aufbau und der Inbetriebnahme eines Hohlleitermikrokalorimeters für den Frequenzbereich 75 GHz–110 GHz erweitert die PTB ihr Leistungsangebot im Bereich der Kalibrierung von Hochfrequenzleistungssensoren. (Rolf Judaschke, FB 2.2, rolf.judaschke@ptb.de)

Forschungsprojekt „Ultrafast Electronics and High Speed Communications (Ultrafast)“ gestartet

Im Juli 2011 ist der Startschuss für das EMRP-Forschungsprojekt „Ultrafast Electronics and High Speed Communications (Ultrafast)“ gefallen, in dem die PTB zusammen mit sechs weiteren nationalen metrologischen Instituten und weiteren Partnern an neuen Messverfahren für Signale und Komponenten arbeitet, die bei der Übertragung sehr hoher Datenraten verwendet werden. (M. Bieler, T.Kleine-Ostmann, FB 2.5, 2.2, mark.bieler@ptb.de, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

Messtechnik für magnetische Sensoren

In einem von der PTB koordinierten europäischen Forschungsprojekt wird Messtechnik für magnetische Sensoren entwickelt. (H.W. Schumacher, FB 2.5, hans.w.schumacher@ptb.de)

Das MNPQ-Projekt „AC-Quantenvoltmeter“

Im Rahmen des MNPQ-Programms des BMWi wurde in der PTB ein Technologietransferprojekt zur Etablierung von quantenbasierten Wechselspannungsnormale in der Industrie gestartet. (R. Behr, FB 2.6, ralf.behr@ptb.de)

Technologietransfer von Messwerterfassungssoftware

Im Rahmen des MNPQ-Programms des BMWi soll ein in der PTB entwickeltes modulares Messwert-Erfassungsprogramm in ein kommerzielles Softwareprodukt integriert werden. (F. J. Ahlers, FB 2.6, franz-josef.ahlers@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Optimaler Wirkungsgrad ergibt nicht immer den maximalen Nutzen

Im Rahmen des EMRP-Projektes „Energy Harvesting“ wurden erste Untersuchungen an piezoelektrischen Mikrogeneratoren durchgeführt. Die Analyse der Messergebnisse hat gezeigt, dass solche Generatoren am Betriebspunkt des optimalen Wirkungsgrades nicht die maximal mögliche Ausgangsleistung erzeugen. (B. Schumacher, FB 2.1, bernd.schumacher@ptb.de)

Kooperation mit dem Deutschen Amateur-Radio-Club e. V. (DARC)

Im Rahmen einer Kooperation mit dem DARC wurde eine symmetrische Streifenleitung für den Frequenzbereich zwischen 1 MHz und 30 MHz entwickelt, die als Gebrauchsnormale für die Kalibrierung von Feldsonden dienen kann und mit der die einfache und schnelle Kalibrierung von Feldsonden für den DARC mit geringer Messunsicherheit möglich ist. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

EMRP-Forschungsprojekt „Traceable measurement of field strength and SAR for the Physical Agents Directive (EMF and SAR)“ abgeschlossen

Nach dreijähriger Projektlaufzeit konnte das Projekt „EMF and SAR“, in dem sieben europäische nationale metrologische Institute zusammen an der Entwicklung rückgeführter Messtechnik für elektromagnetische Felder im Frequenzbereich bis 300 GHz gearbeitet haben, erfolgreich abgeschlossen werden. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

Projekt zur Feldexposition von Hautzellen im Terahertz-Frequenzbereich abgeschlossen

Das vom Bundesamt für Strahlenschutz geförderte Projekt „Gentoxische Effekte von Terahertz-Strahlung in vitro?“ wurde nach drei Jahren Projektlaufzeit und einer dreimonatigen Projektverlängerung zur Durchführung wei-

terer Untersuchungen erfolgreich abgeschlossen. In dem interdisziplinären Vorhaben, in dem Hautzelllinien Terahertz-Strahlung ausgesetzt wurden, konnten keine gentoxischen Effekte festgestellt werden. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

Messtechnik zur Bestimmung von Wirkungsgraden an HGÜ-Umrichtern

Im Rahmen eines von der EU geförderten Gemeinschaftsprojekts, an dem mehrere europäische metrologische Institute und Universitäten beteiligt sind, befasst sich die TU Braunschweig gemeinsam mit der PTB mit Umrichtertechnik – hier insbesondere mit dem Aufbau einer auf nationale Normale rückführbaren Messmöglichkeit zur Bestimmung der integralen Verluste an Umrichtern. Hintergrund ist die im europäischen Raum zunehmende Anwendung der über große Distanzen im Vergleich zur Wechselspannungsübertragung verlustärmeren Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) elektrischer Energie. (E. Mohns, FB 2.3, enrico.mohns@ptb.de)

Elektroimpulsgeräte (EIG), Waffen für den freien Handel

Der Gesetzgeber fordert seit dem 1. Januar 2011 für das Inverkehrbringen von Elektroimpulsgeräten (im allgemeinen Sprachgebrauch auch Elektroschocker genannt) ein offizielles Prüfzeichen, welches durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt vergeben wird. (H. Seifert, FB 2.3, helmut.seifert@ptb.de)

HGÜ-Gleichstrommesstechnik

Ein Prüfplatz für DC-fähige Stromwandler wurde aufgebaut und auf die Normale der PTB zurückgeführt. (J. Meisner, FB 2.3, johann.meissner@ptb.de)

Dreiphasiges Leistungsnormal

Die Rekalibrierung der dreiphasigen Arbeitsnormale für Leistung wird mit Hilfe eines neu entwickelten Leistungsnormalen bedeutend erleichtert. Basierend auf zwei kaskadierten Direct-Digital-Synthesizern (DDS) ermöglicht das Messsystem quasi-synchrones Abtasten ohne Hardwaremodifikationen von Leistungsquelle und Abtastvoltmeter. (K. Dauke, FB 2.3, kristian.dauke@ptb.de)

Digital-Abtastsystem hoher Linearität für Wechselleistungsmesstechnik und Netzqualitätsmessungen

Für die Wechselleistungsmesstechnik und Netzqualitätsmessungen wurde ein Digitalisierer höchster Abtastgenauigkeit entwickelt. Das kompakte und mehrkanalige Abtastsystem weist integrale Nichtlinearitäten von einigen mV/V bei Abtastraten bis zu 128 kHz auf und wird die Messmöglichkeiten der PTB im Bereich der Wechselleistung- und Netzqualitätsmessungen erweitern. Die damit erreichbaren Messunsicherheiten bei Netzfrequenzen sind mit denen des primären PTB Wechselleistung-Abtastnormals vergleichbar. (G. Kürten Ihlenfeld, FB 2.3, guilherme.ihlenfeld@ptb.de)

Simulation von Bombenblindgängern für die Kampfmittelortung

Wie Schlagzeilen in der Presse immer wieder belegen, ist die Ortung von Bomben-Blindgängern aus dem zweiten Weltkrieg auch heute noch ein Problem. Im Rahmen einer Kooperation zwischen der Arbeitsgruppe *Magnetische Messtechnik* der PTB und der Firma Sensys GmbH, Bad Saarow, wird an neuen Testverfahren gearbeitet, mit denen Sonden für die Suche nach diesen Blindgängern überprüft und zugelassen werden können. (R. Hiergeist, FB 2.5, robert.hiergeist@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Informationsveranstaltung zum erfolgreichen Abschluss der Auftaktrunde des europäischen Metrologie-Forschungsprogramms

Im Mai 2011 wurden der Fachöffentlichkeit auf einer Informationsveranstaltung die Ergebnisse von 4 Forschungsprojekten zu Themen der elektrischen Quantenmetrologie präsentiert. Die Projekte wurden, unterstützt durch die EU, in der IMERA-plus-Phase des europäischen Metrologie-Forschungsprogramms EMRP (European Metrology Research Programme) durchgeführt und sind im Jahr 2011 erfolgreich abgeschlossen worden. (F.J.Ahlers, FB 2.6, franz-josef.ahlers@ptb.de)



Chemische Physik und Explosionsschutz

Berichte der Abteilungen



Neudefinition des Kilogramm

Die Neudefinition der Masse-Einheit Kilogramm auf der Basis einer Naturkonstante ist zurzeit eines der wichtigsten Projekte in der Metrologie. Die PTB arbeitet – zusammen mit BIPM, INRIM, NMI-A, NMIJ – an dem Avogadro-Projekt, das die Rückführung des Kilogramm auf atomare Massen zum Ziel hat. Dies gelingt durch das „Zählen“ der Atome in 1 kg Kugeln aus Silizium. Im Jahr 2011 veröffentlichte die „International Avogadro Coordination“ in einem Sonderband der Fachzeitschrift „Metrologia“ ihr bisher bestes Ergebnis der Avogadro Konstanten

$$N_A = 6,022\,140\,82 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

mit einer relativen Standardunsicherheit von nur $3 \cdot 10^{-8}$ und damit die zurzeit genaueste Bestimmung der Avogadro-Konstanten (s. Bild 1).

Die Avogadro-Konstante wird mit Hilfe der Formel

$$N_A = 8 M V / (m a_0^3)$$

berechnet. Hierin gibt $8 V/a_0^3$ die Anzahl der Atome in der Kugel mit dem Volumen V an, weil a_0^3 die Größe einer Elementarzelle des Kristalls ist, in der sich jeweils 8 Atome befinden.

Zur Berechnung der Avogadro-Konstanten muss die Zahl der Atome in der Kugel noch durch die Stoffmenge, d. h. die Anzahl der Mole geteilt werden, also durch m/M , wobei m die Masse der Kugel und M die molare Masse des Siliziums sind. Fast alle Größen zur Bestimmung von N_A werden (auch) in der PTB gemessen – in der Abteilung 3 *Chemische Physik und Explosionsschutz* insbesondere die molare Masse. Außerdem werden hier noch die Verunreinigungskonzentrationen im Siliziumkristall gemessen, um die Masse der Kugel entsprechend korrigieren zu können. Dichtevergleichsmessungen dienen u. a. zur Homogenitätsuntersuchung des Kristalls.

Um die molare Masse mit der notwendigen Genauigkeit bestimmen zu können, ist es not-

wendig, Isotopen-angereichertes Silizium zu verwenden. Das Silizium in Form des Gases SiF_4 wurde dazu vom Central Design Bureau of Machine Building in St. Petersburg angereichert. Das SiF_4 -Gas wurde danach im Institute of Chemistry of High-Purity Substances der Russian Academy of Sciences in Nishni Novgorod in SiH_4 (Silan) umgewandelt, zersetzt und das Silizium als Polykristall abgeschieden. Im Leibniz-Institut für Kristallzüchtung in Berlin wurde dann der versetzungsfreie Si-Einkristall gezogen (Bild 2), aus dem die notwendigen Proben und insbesondere zwei 1 kg Si-Kugeln hergestellt wurden. Die Kugeln wurden schließlich im Australian Centre for Precision Optics auf eine Unrundheit unter $0,1 \mu\text{m}$ poliert, so dass die Abweichungen von der Rundheit weniger als $0,1 \mu\text{m}$ betragen.

Bestimmung der molaren Masse von in ^{28}Si hochangereichertem Silizium

Die Kombination von modifizierter Isotopenverdünnungsmassenspektrometrie (IDMS) und Multikollektor-ICP-Massenspektrometrie (MC-ICP-MS) hat sich mittlerweile als neue Methode zur Bestimmung der molaren Masse von in ^{28}Si hochangereichertem Silizium bewährt. Die molare Masse dieses Materials kann nun mit einer relativen Messunsicherheit von $< 1 \cdot 10^{-8}$ bestimmt werden – also eine Größenordnung kleiner, als bisher mit Silizium mit einer natürlichen Isotopenverteilung möglich, und hinreichend, um die Avogadro-Konstante mit einer relativen Messunsicherheit von $3 \cdot 10^{-8}$ zu messen. Die Entwicklungsschritte von Theorie und Experiment mit ersten Ergebnissen sind bereits mehrfach in Veröffentlichungen publiziert worden. Um nun detailliertere Kenntnisse über die Homogenität der Isotopenhäufigkeit innerhalb des „Avogadro-Siliziumkristalls“ zu gewinnen, werden weiterhin Proben – zuletzt aus einem zentralen Kristallbereich (Part 7, s. Bild 3) vermessen. In Bild 4 ist das aktuelle Ergebnis – die molare Masse des in ^{28}Si hochangereicherten „Avogadro-Siliziums“ – als Funktionen der Probenherkunft aus dem Kristall mit der jeweiligen kombinierten Standardunsicherheit ($k = 1$) dargestellt. Die relative Messunsicherheit beträgt danach $8,2 \cdot 10^{-9}$.

Titelbild:

Das „alte“ Kilogramm spiegelt sich im vermutlich neuen wider, realisiert durch eine Silizium-Kugel.

Bild 1: Historie der Bestimmungen der Avogadro-Konstanten mit Hilfe der Wattwaagen am NPL, NIST und METAS im Vergleich zur neuesten Bestimmung mit Isotopen-angereichertem Silizium.

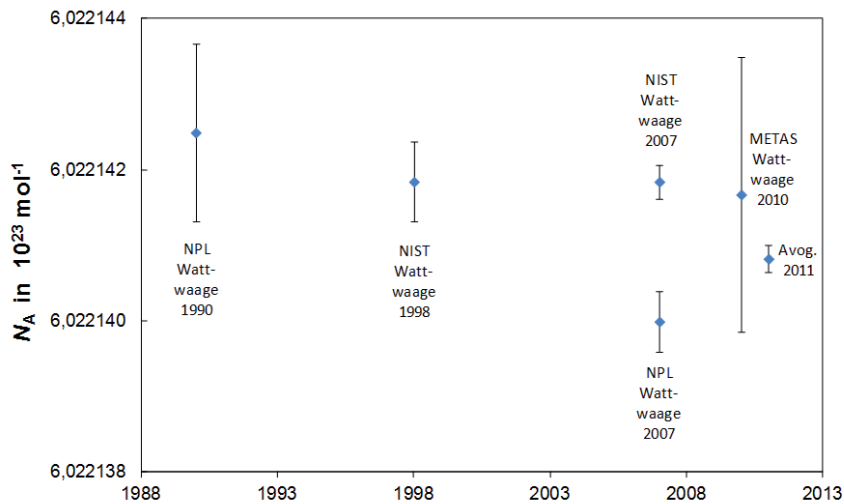


Bild 2: Einkristall aus Isotopen-angereichertem Silizium.

Neue Kooperationen zur Bestimmung der molaren Masse von Si: NIST, NRC-CNRC, IMR-CAGS, NIM

Nach dem Ausscheiden des Institute for Reference Materials and Measurements (EC-JRC-IRMM), Belgien, aus dem Avogadro-Projekt

war in den Jahren 2009/2010 einzig die PTB mit der Bestimmung der molaren Masse des in ^{28}Si hochangereicherten Avogadro-Siliziumkristalls befasst. Mindestens eine weitere Institution sollte jedoch in der Lage sein, diese für die Avogadro-Konstante wichtige Größe unabhängig zu bestimmen und zu bestätigen. In der zweiten Jahreshälfte 2010 ergaben sich neue Kooperationen der PTB auf diesem Gebiet. Die Arbeitsgruppe Inorganic Chemical Metrology des National Institute of Standards and Technology (NIST) wird nach Erhalt geeigneter Si-Kristallproben vergleichbare Messungen zur Bestimmung der molaren Masse mit dem gleichen – wie in der PTB benutzten – Massenspektrometer (Bild 5) durchführen.

Vom 05. bis zum 11. Dezember 2010 waren Vertreter dieser Gruppe zu einem Erfahrungsaustausch in Abteilung 3 der PTB zu Gast (Bild 6). Zusätzlich werden am NIST bereits in der PTB vermessene Siliziumproben hinsichtlich der Isotopenhäufigkeit untersucht. Parallel hat auch eine zweite Kooperation mit dem National Research Council Canada (NRC-CNRC) hinsichtlich der gleichen Zielstellung begonnen. Nach einem Besuch der PTB durch Mitglieder des NRC-CNRC vom 22. bis zum 25. Februar 2011, wird auch dort mit dem gleichen Massenspektrometer nach demselben Verfahren wie bereits in der PTB, die molare Masse am „Avogadro-Silizium“ bestimmt.

Die dritte Kooperation wurde mit der Gruppe um T. Ding vom Institute of Mineral Resources

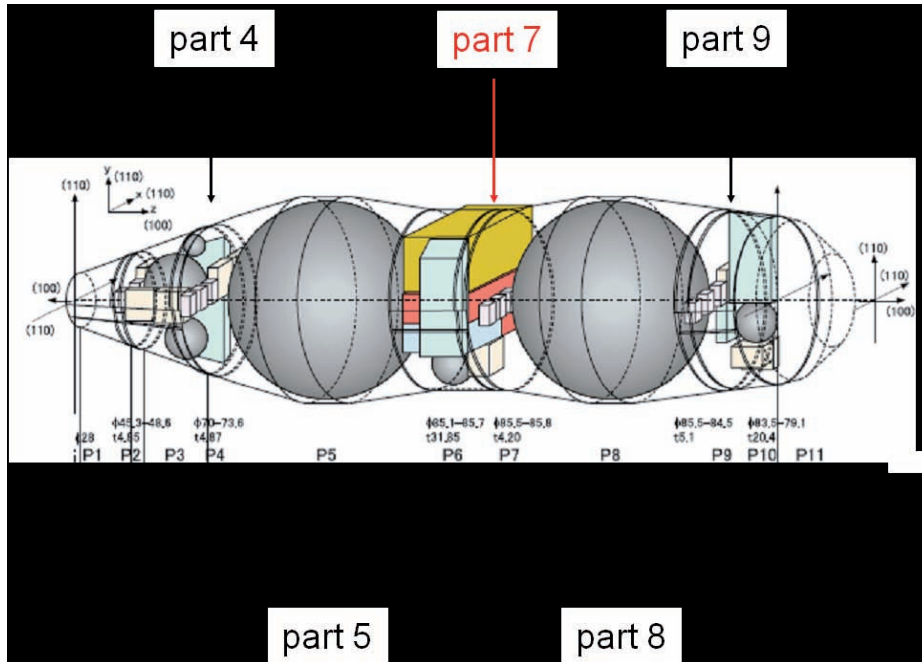


Bild 3: Schematischer Schnitt durch den in ^{28}Si hochangereicherten Silizium-Kristall zur Neubestimmung der Avogadro-Konstanten. Die beiden Kugeln sind aus den Segmenten 5 und 8 gefertigt. Molare Massen des Materials wurden bislang aus den Segmenten 4, 5, 8, 9 und nun auch 7 bestimmt.

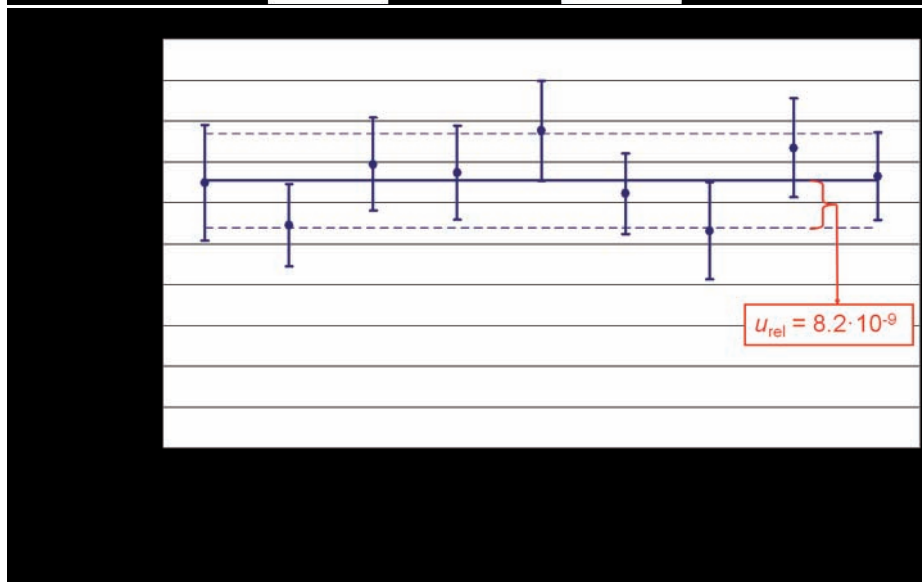


Bild 4: Molare Masse einzelner Proben des in ^{28}Si hochangereicherten Silizium-Kristalls entsprechend der Segmente 4, 5, 7, 8 und 9. Die relative kombinierte Standardmessunsicherheit ist gestrichelt angegeben.

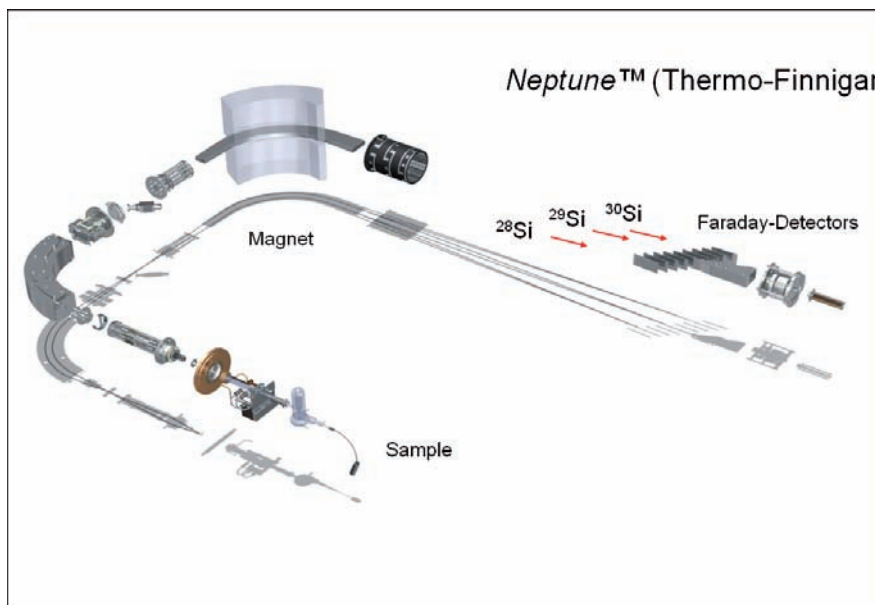


Bild 5: NEPTUNE™-MC-ICP-MS (schematisch) mit Ionenoptik, Magnet und Faraday-Detektoren zur Bestimmung der molaren Masse von Silizium.



Bild 6: v. l. S. Rabb (NIST), D. Schiel (PTB), G. Turk (NIST), B. Vocke (NIST), A. Pramann (PTB) vor dem Multi-kollektor-ICP-Massenspektrometer der AG 3.11 zur Bestimmung der molaren Masse von Silizium



ces – Chinese Academy of Geological Sciences (IMR-CAGS) in China initiiert. Dort wird ebenfalls mit dem gleichen Spektrometertyp die molare Masse der Si-Proben bestimmt. Ein vierter Kooperationspartner – das National Institute of Metrology (NIM), ebenfalls in China – versucht mit einer anderen massenspektrometrischen Methode, nach Umwandlung des Siliziumkristalls in SiF_4 , die molare Masse zu bestimmen.

Erweiterte Unsicherheitsmodellierung der Isotopenverhältnismessung unter Einbeziehung relevanter Korrelationen

In die Bestimmung der molaren Masse gehen insgesamt zehn gemessene Isotopenverhältnisse sowie sechs Massen ein. Einer der wesentlichen Vorteile der in der PTB entwickelten Messmethode ist die Möglichkeit, die sogenannten Blindwerte (verursacht durch die als Lösungsmittel verwendete Natronlauge und Desorptionsprozesse im Spektrometer) im Rahmen der Messung zu ermitteln und entsprechende Korrekturen auf die gemessenen Isotopenverhältnisse anzuwenden. Die Anwendung der Korrektur ergibt für jedes einzelne Isotopenverhältnis eine gebrochen-rationale Funktion, wobei bedingt durch die jeweilige parallele Detektion die eigentlichen Messsignale sowie die Korrekturterme korreliert sind. Mittlerweile wurde die ursprüngliche konservative Messunsicherheitsermittlung ohne Beachtung möglicher Korrelationen durch eine verfeinerte ersetzt, bei der aus den Messsignalen die empirischen Kovarianzen berechnet wurden, um die relevanten Korrelationen in

die Berechnung der Messunsicherheit einzu beziehen. Erwartungsgemäß (denn hierin liegt der Grund für die Verwendung parallel detektierender Massenspektrometer) wurde durch die Berücksichtigung der Korrelationen die Messunsicherheit der molaren Masse in etwa halbiert, was einem Wert entspricht, der die reine externe Reproduzierbarkeit einschließt und der somit als realistisch anzusehen ist.

Verunreinigungen in angereichertem Silizium

Siliziummaterial mit einem hohen Anreicherungsgrad des Isotops ^{28}Si wurde zur Herstellung der beiden Avogadrokugeln AVO28-S5 und AVO28-S8 verwendet. Neben dem Grad der Isotopenanreicherung ist die chemische Reinheit dieses „Si28“-Materials bei der Neubestimmung der Avogadrokonstanten N_A von zentraler Bedeutung. Abhängig von Art und Konzentration der herstellungsbedingten Verunreinigungen im Einkristall hat die chemische Reinheit Einfluss auf die Anzahl der Atome in der Einheitszelle, den Gitterparameter und die Masse.

Die Infrarotspektrometrie ist eine schnelle und unkomplizierte Methode zur Bestimmung von Verunreinigungen in kristallinem Silizium (Bild 7). Unter tiefkalten Bedingungen bei 7 K können Elemente mit hoher Sensitivität detektiert werden, die sich bei Raumtemperatur nicht bestimmen lassen. Die Art der Verunreinigung lässt sich anhand der Frequenz ihrer Absorptionsbande bestimmen, während eine quantitative Auswertung anhand der Maximalabsorption erfolgt. Zuerst muss an

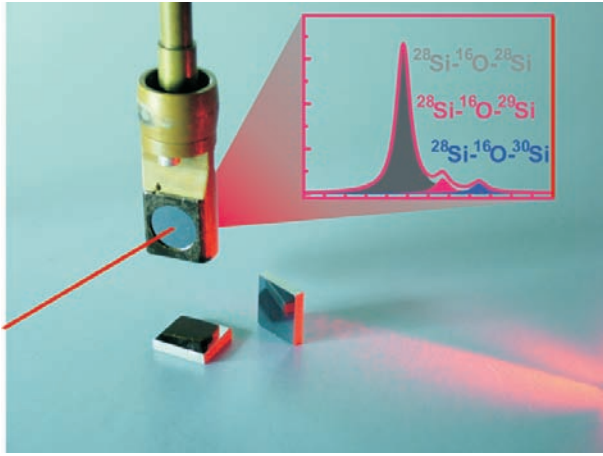


Bild 7: Verunreinigungen im Silizium-Einkristall sind als Absorptionen im Infrarotspektrum erkennbar. Die Analyse dieser Absorptionen liefert sowohl die Art und Stärke der Verunreinigung als auch Rückschlüsse auf die Isotopenverteilung. Um die Infrarotspektren messen zu können, werden dem Kristall 3 mm dicke Proben entnommen und auf 7 K abgekühlt.

die Messwerte eine Korrektur zur Berücksichtigung der Mehrfachreflexion innerhalb der Probe angelegt werden. Im Anschluss werden Kalibrierspektren von Proben bekannten Gehaltes zur Auswertung der Maximalabsorption herangezogen. Da diese Kalibrierproben im Falle des monoisotopisch angereicherten Siliziums nicht zur Verfügung standen, wurde im Rahmen dieser Untersuchungen ein Modell entwickelt, mit dessen Hilfe die Kalibrierfaktoren von Silizium mit natürlicher Isotopenverteilung auf hochangereichertes Material übertragen werden können. Dieses Modell berücksichtigt einen Korrekturfaktor, der aus der Entfaltung der Anteile von isotopenbedingten Frequenzverschiebungen resultiert.

Auf der Basis des Modells konnten die Konzentrationen der drei dominanten Verunreinigungen – Sauerstoff, Kohlenstoff und Bor – im „Si28“-Einkristall bestimmt werden (Bild 8). Während Sauerstoff auf Zwischengitterplätzen zu einer Aufweitung des Kristallgitters führt, nehmen Kohlenstoff und Bor im Kristallgitter die Plätze von Siliziumatomen ein und kontrahieren die Gitterstruktur. Obwohl die gemessenen Konzentrationen der drei Hauptverunreinigungen den bisherigen Anforderungen des Avogadro-Projekts entsprechend gering sind, ist ihr Anteil hoch genug, um eine Korrektur der Kugelmasse und des Gitterparameters im hochangereicherten „Si28“-Material notwendig zu machen.

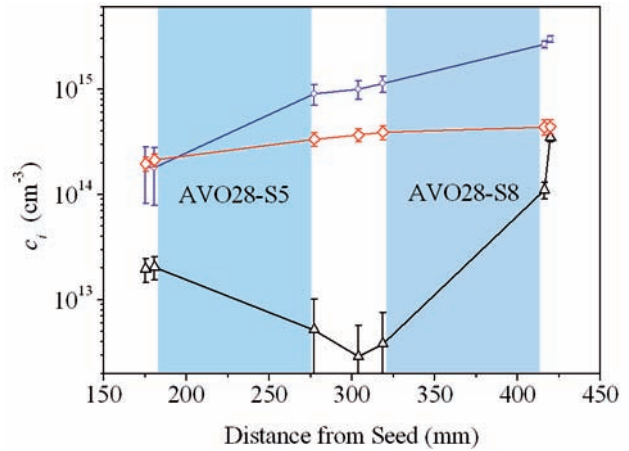


Bild 8: Verunreinigungskonzentrationen c_i im „Si28“-Einkristall, gemessen entlang der Längsachse des Kristalls (Kreise: Kohlenstoff, Rauten: Sauerstoff, Dreiecke: Bor). Die blauen Bereiche markieren die Bereiche des Kristalls, aus denen die Avogadro-Kugeln S5 und S8 gefertigt wurden.

Die Infrarotspektrometrie ist ferner dazu geeignet, Ablagerungen von Kohlenwasserstoffen an der Oberfläche der Siliziumkugeln zu identifizieren. Da die Kugeln im Frequenzbereich der Absorption von Kohlenwasserstoffen transparent sind, können sie direkt im Spektrometer bei Raumtemperatur auf ihre Oberflächenverunreinigungen getestet werden. Die Methode ist empfindlich genug, um die Effektivität von Reinigungsprozeduren bis hinunter zu Schichtdicken von 0,1 nm zu beurteilen.

Dichtevergleichsmessungen

Dichteunterschiede von Silizium-Proben werden in der PTB mit Hilfe einer Flotationsmethode gemessen. In der Apparatur wird eine spezielle Flüssigkeitsmischung verwendet, in der Silizium – bei entsprechend ausgewähltem Mischungsverhältnis, Temperatur und Druck – schwebt. Der Dichteunterschied von zwei Siliziumproben wird bestimmt, indem die beiden Proben abwechselnd durch Veränderung des Drucks zum Schweben gebracht werden („Druckflotation“). Aus dem Druckunterschied und der Kompressibilität der Flüssigkeit wird dann der Dichteunterschied berechnet. Die Vorteile dieser Methode liegen in der extrem hohen Auflösung und in der Tatsache, dass auch sehr kleine Proben fast ohne Genauigkeitsverlust mit großen Proben verglichen werden können.

Diese Methode wird daher benutzt, um die Dichte (und dann die Avogadro-Konstante) mit Kristallen zu bestimmen, die zu klein für

eine genaue interferometrische Volumenbestimmung sind. So kann nachgewiesen werden, dass der verwendete große Siliziumkristall keine unerkannten Fehler hat.

Außerdem wurde mit der Druckflotation die Dichte von thermischem Oxid gemessen (Bild 9). Die Oxiddichte wird benötigt, um aus der Dicke der Oxidschicht (und der Oberfläche der Kugel) die Masse der Oxidschicht zu berechnen, die von der Gesamtmasse der Kugel subtrahiert werden muss, um die für die Berechnung der Avogadro-Konstante nötige Masse der reinen Silizium-Kugel zu bestimmen.

Da bei den hohen Temperaturen der thermischen Oxidierung auch andere Atome in das Silizium eindiffundieren und damit die Dichte verfälschen könnten, wird die Druckflotation auch verwendet, um dies zu prüfen.

Hauptaufgabe der Druckflotation ist aber die Überprüfung der Homogenität des Kristalls, z. B. mit den in Bild 3 eingezeichneten kleinen Kugeln. 2011 wurden die beiden 1-kg-Kugeln aus Isotopen-angereichertem Silizium (AVO28-S5 und AVO28-S8) neu in der Dichte verglichen, nachdem die Metallkontaminationen auf den Oberflächen entfernt worden waren, s. Bild 10. In diesen Messungen wurden die Positionen der beiden Kugeln im Messgefäß zweimal getauscht, um eine mögliche Asymmetrie der Apparatur zu messen und zu korrigieren.

Der gemessene relative Dichteunterschied von $8(8) \cdot 10^{-9}$ dient zur Kontrolle der Konsistenz aller Messgrößen, die die Dichte beeinflussen, z. B. molare Masse und Verunreinigungskonzentration.

Zukünftige Arbeiten

Die nächste Möglichkeit für eine Neudefinition des Kilogramm bietet sich auf der Generalkonferenz für Maße und Gewichte (CGPM) im Jahr 2014. Bis dahin soll die Genauigkeit der Avogadro-Konstante weiter verringert werden. Außerdem sollen einige Messgrößen durch unabhängige Messungen bestätigt werden. Schließlich soll – in Zusammenarbeit mit den Wattwaagen-Projekten weltweit – versucht werden, die Gründe für abweichende Ergebnisse für die Avogadro-Konstante zu finden, damit eine sichere und genaue Neudefinition der Masseneinheit gewährleistet werden kann.

Entwicklung eines Quecksilber-Mikromanometers in der PTB

Durch das Aufkommen einer neuen Klasse von hochgenauen Messgeräten für niedrige Druck bis hinunter zu 1 Pa, den sogenannten kraftkompensierten nichtrotierenden Druckwaagen, die aber bisher erst bei Drücken oberhalb von 5 kPa kalibriert werden können, ist in der PTB ein Bedarf für die rückführbare genaue Bestimmung von Absolutdrücken zwischen 1 Pa und 1 kPa entstanden. Für die Darstellung

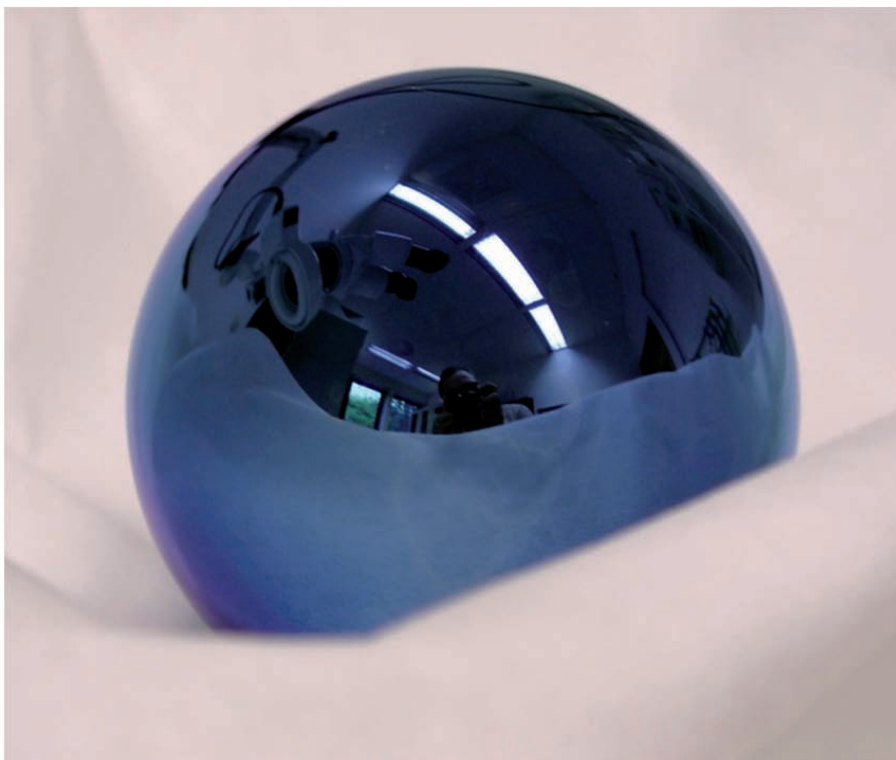


Bild 9: Kugel aus natürlichem Silizium mit einem thermischen Oxid der Dicke $0,14 \mu\text{m}$. Aus der Dichteänderung durch das Oxid konnte die Dichte des Oxids zu $2228(18) \text{ kg/m}^3$ bestimmt werden.

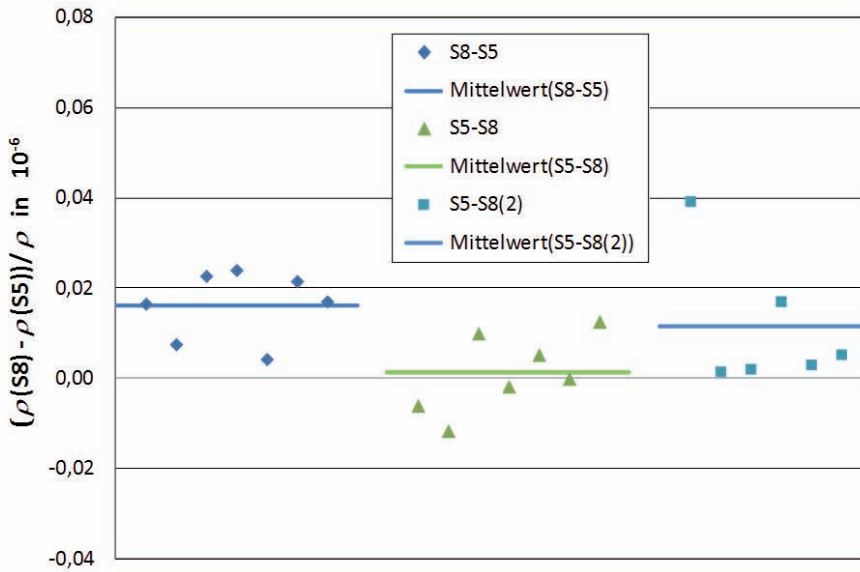


Bild 10: Dichtevergleich der beiden Kugeln AVO28-S5 und AVO28-S8 aus Isotopen-angereichertem Silizium mit Hilfe der Druckflotation. Die Position der beiden Kugeln wurde zweimal getauscht.

dieses Druckbereichs wird als Primärnormal ein interferometrisches, mit Quecksilber gefülltes U-Rohr-Manometer entwickelt (Bild 11). Der zu bestimmende Druck ist hierbei „fundamental“ mit der interferometrisch gemessenen Länge der Flüssigkeitssäulen in den Schenkeln des U-Rohr-Manometers verbunden. Da die Dichte des verwendeten Quecksilbers und der Wert der örtlichen Fallbeschleunigung mit hoher Genauigkeit bekannt sind, können die Messdrücke zurückgeführt auf die Basisgrößen Masse, Längendifferenz und Zeit errechnet werden. Durch die Verwendung eines Planspiegel-Interferometers mit heterodyner

Signalverarbeitung wird ein stabiler Betrieb, d. h. eine schnelle Druckwerterfassung ohne dynamische Messabweichungen, ermöglicht. Im Zuge des Projekts wurden zur Validierung erste Druckmessungen durchgeführt und ein vorläufiges Messunsicherheitsbudget aufgestellt. Mit den erzielten Ergebnissen können die Unsicherheit bei der Realisierung der Absolutdruck-Skala im Bereich von 170 mPa bis 10 kPa reduziert und entsprechende Kalibrierdienstleistungen für die neuartigen kraftkompensierten Druckwaagen angeboten werden.

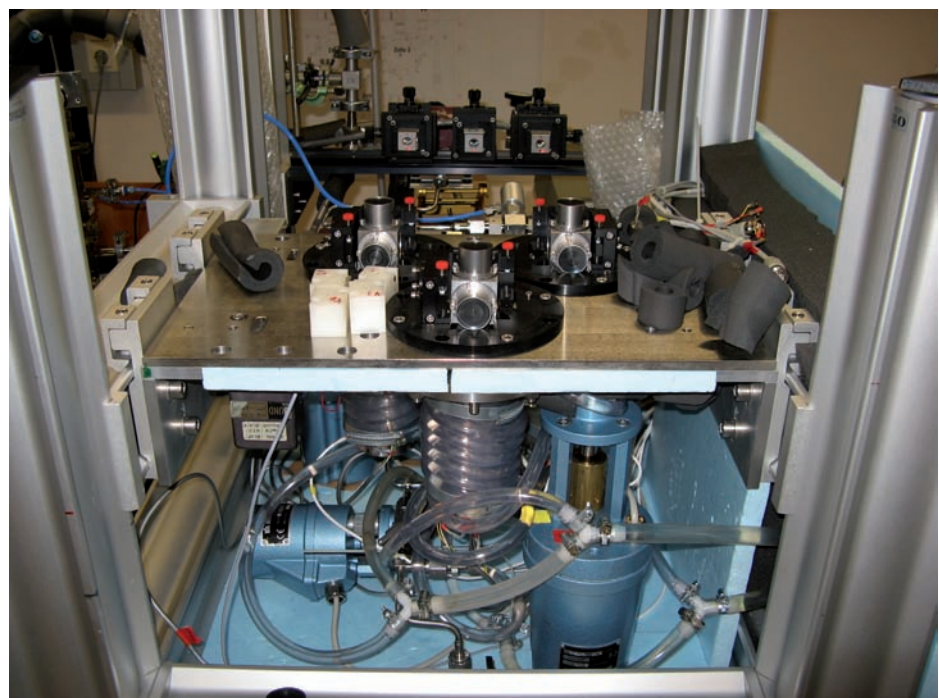


Bild 11: Quecksilber-Mikromanometer für kleine Absolut- und Überdrücke.



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

Entwicklung einer Methode mit verbesserter Empfindlichkeit zur Bestimmung von Wachstumshormon in klinischen Proben

Zur Bestimmung von Wachstumshormon in klinischen Proben wurde eine auf Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie (IDMS) basierende Methode mit verbesserter Empfindlichkeit entwickelt. Die verbesserte IDMS-Methode kann in Zukunft zur genauen und unabhängigen Neudefinition der Entscheidungsgrenze in klinischen Wachstumshormon-Suppressionstests eingesetzt werden. (C. Arsene, FB 3.1, cristian.arsene@ptb.de)

Rückgeführte Bestimmung der Ionenaktivität als neues Referenzverfahren in der klinischen Diagnostik

Im Rahmen des europäischen Metrologieforschungsprojektes (EMRP) wurde zwischen den Metrologieinstituten METAS (schweizerisches Bundesamt für Metrologie), SMU (slovakisches Institut für Metrologie) sowie der PTB ein Verfahren entwickelt, mit dem Ionenaktivitäten mit einer für die zuverlässige klinische Diagnostik essentiellen geringen Messunsicherheit rückgeführt bestimmt werden können. (F. Bastkowski, FB 3.1, frank.bastkowski@ptb.de)

Rückgeführte Spektraldaten für Umweltwissenschaften und Industrie

Im Schwerpunkt Umwelt des Europäischen Metrologieforschungsprogramms EMRP entwickelt die PTB eine zentrale europäische Spektrometer-Infrastruktur zur Messung rückgeführter Spektralparameter von Molekülen. Diese Infrastruktur basiert auf einem höchstauflösenden Fourier-Transform-Spektrometer ($\Delta n < 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$), zugehörigen Gasmesszellen sowie den notwendigen Messprotokollen zur Messung von Linienstärken und -positionen sowie der Druckverschiebung und der Druckverbreiterungskoeffizienten. Diese Daten werden für zahlreiche spektroskopische Messverfahren zur Fernerkundung der Erdatmosphäre und Klimaüberwachung beispielsweise mit Satelliten, Flugzeugen oder Ballons benötigt, aber auch in der Industrie für die Prozesskontrolle bzw. -optimierung eingesetzt. (V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Neues EMRP-Projekt zur Feuchtemessung in der oberen Troposphäre und der unteren Stratosphäre (UT/LS) gestartet

Im Oktober 2011 startete unter starker Beteiligung der PTB das EU-geförderte EMRP-Projekt ENV07 MeteoMet „Metrology for pressure, temperature, humidity and airspeed in the atmosphere“. Ziele der PTB sind eine verbesserte Vergleichbarkeit atmosphärischer Feuchtemessstechnik und die Rückführung atmosphärischer Feuchtemessverfahren. Die Aufgaben der PTB sind dabei die Entwicklung und Charakterisierung kalibrationsfreier Laser-Hygrometer auf Basis der Diodenlaserabsorptionsspektroskopie (TDLAS) und die rückgeführte Bestimmung von H₂O-Spektralparametern. Schließlich organisiert die PTB in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) einen international angelegten Vergleich atmosphärischer Feuchtemessgeräte in der Wolkensimulationskammer AIDA des KIT, in der die Bedingungen der oberen Atmosphäre kontrolliert simuliert werden können. Zur Rückführung dieser Geräte wird auch ein mobiler, rückgeführter Sekundärfeuchtestandard für den Feldeinsatz entwickelt. (N. Böse, FB 3.2, norbert.boese@ptb.de)

Neues Absolutes Laserhygrometer für den Feldeinsatz auf Forschungsflugzeugen

Im Rahmen eines FP7-geförderten Projektes wird derzeit für den Einsatz in der European Facility for Airborne Research (EUFAR) ein kompaktes, extraktives, autonom arbeitendes Laserhygrometer (SEALDH) für die optische Feuchtemessung unter Feldbedingungen entwickelt. Der erste erfolgreiche Flugeinsatz dieses selbstkalibrierenden Absolutfeuchte-Sensors wurde nun auf einem Learjet 35A realisiert. Auf mehreren Messflügen bis in Tropopausennähe (Druck bis -50 hPa) erfolgte auch ein Blind-Vergleich mit vier weiteren Feuchtesensoren; kennzeichnend waren ein extrem großer Messbereichsumfang (15 ppm -25000 ppm Volumenanteile Wasser), eine hohe zeitliche Auflösung ($< 1 \text{ sec}$) sowie geringe Nachweisgrenzen. Eine unabhängige Validierung der Absolutgenauigkeit wurde über einen Vergleich des SEALDH mit dem natio-

nalen Normal für mittlere Gasfeuchte der PTB vorgenommen. Erste Auswertungen zeigen, dass SEALDH über einen Konzentrationsbereich von 600 ppmV bis 20000 ppmV (Druck um 1013 hPa) auch ohne Kalibration, allein auf Basis von H₂O-Spektralparametern und Messungen von Druck, Temperatur und Weglänge eine ausgezeichnete, mittlere relative Abweichung von lediglich -1.4 % zum Normal aufweist. Dieser Wert ist vollständig mit der derzeitigen Unsicherheit der H₂O-Linienstärke von ±3 % erklärbar, wobei genauere Messungen der H₂O-Spektralparameter in der PTB in Vorbereitung sind. (B. Buchholz/ V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

Isotopenaufgelöste Laserhygrometrie zur Entschlüsselung mikrophysikalischer Prozesse in Wolken

Modelle zur Wolkenbildung sind von entscheidender Wichtigkeit in modernen Klimamodellen. Zur Entschlüsselung mikrophysikalischer Prozesse bei der Wolkenbildung wird in der PTB im Rahmen des DFG- und NSF- geförderten Projekts „IsoCloud“ in Zusammenarbeit mit der University of Chicago und dem Karlsruher Institute of Technologie, KIT, ein isotopomere-auflösendes In-situ-Laserhygrometer für den Einsatz in Eiswolken entwickelt, charakterisiert und unter Nah-Troposphärischen Bedingungen an der Wolkensimulationskammer AIDA eingesetzt. Auch die dazu benötigten Spektralparametern der Wasserisotopomere werden in der PTB bestimmt. Ziel dieser Arbeiten ist es, die Dynamik der Isotopensignatur des Wasserdampfes während der Bildung von Cirrus-Wolken in situ zu beobachten und so mikrophysikalische Wolkenmodelle zu testen. (B. Kühnreich/V. Ebert, AG 3.22, volker.ebert@ptb.de)

EMRP-JRP „LNG“ – Metrology for Liquefied Natural Gas

Ziel des Projekts ist es, die Messunsicherheit bei der Abrechnung von Liquefied Natural Gas (LNG) auf die Hälfte zu reduzieren. Von der Ruhr-Universität Bochum wird im Rahmen dieses Projekts eine Dichtemessanlage entwickelt. Hierzu gewährleistet die PTB durch die Einmessung der Senkkörper die Rückführbarkeit auf SI-Einheiten. Um Standards und Richtlinien zu entwickeln, liefert die PTB auch Berechnungen, einschließlich eines Unsicherheitsbudgets, zum Energiegehalt von Erdgas in flüssigem Zustand. (H. Bettin, FB 3.2, horst.bettin@ptb.de; J. Rauch, FB 3.3, juergen.rauch@ptb.de)

Elektrostatistische Zündgefahren

Elektrostatistische Aufladung und die damit einhergehende Gefahr von zündfähigen elektrostatischen Entladungen ist in der Praxis des Explosionsschutzes ein nach wie vor wichtiges Thema. Zur Bewertung potenzieller Gefahren wird die in einer Entladung übertragene Ladung als Kriterium herangezogen. (T. Langer, FB 3.5, tim.langer@ptb.de)

Druckentlastung von explosionsgeschützten Geräten

Der maximale Explosionsdruck im Inneren von druckfest gekapselten Geräten kann durch die Integration von hochpermeablen Materialien in die Gehäusewandungen signifikant reduziert werden, ohne deren Zünddurchschlagsicherheit zu gefährden. Das ermöglicht eine wirtschaftlichere Konstruktion dieser Geräte. (J. Hornig, FB 3.5, julia.hornig@ptb.de)

PTB Ex Proficiency Testing Program

In einem internationalen Pilotprojekt organisiert die PTB die Durchführung von Ringvergleichen in den Zündschutzarten Druckfeste Kapselung und Eigensicherheit. Weltweit nehmen über 40 Ex-Prüflaboratorien aus 24 Ländern teil. Erste Ergebnisse über Prüfungen beider Zündschutzarten liegen vor und werden ausgewertet. Das Programm erlaubt die quantitative Beurteilung der Prüfmethode einzelner Labore und liefert dadurch einen Kompetenznachweis für Kunden, Regulierer und Endverbraucher. (T. Krause, FB 3.5, tim.krause@ptb.de)

Deutliche Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten für die Zündschutzart Eigensicherheit durch das innovative Energieversorgungskonzept „Power-i“

Durch den erfolgreichen Abschluss des von einem Industriekonsortium finanzierten Projektes „Power-i“ konnten notwendige wissenschaftliche Untersuchungen zur Vorlage eines Entwurfes für eine IEC-Technical Specification realisiert werden. Neben den normativen Spezifikationen bestand ein wesentlicher Aufgabenanteil in der Vorgabe von industrietauglichen Hardwarekonzepten, wodurch eine schnelle Umsetzung der Ergebnisse in die industrielle Praxis erreicht werden kann. (U. Gerlach, FB 3.6, udo.gerlach@ptb.de)

Beginn der Erarbeitung des neuen IEC-Standards „Technical Specification TS 60079-39“

Nach der erfolgreichen Annahme eines über den DKE Arbeitskreis UAK 241.0.14 „Power-i“ eingereichten „New Work Item Proposal“ konnten im Mai 2011 offiziell die Arbeiten an der neuen IEC-TS 60079-39 beginnen. Dazu fand am 14.09.2011 in der PTB ein „Kick-Off“-Meeting mit internationaler Beteiligung statt. Der Abschluss der Arbeiten ist für Anfang 2013 geplant. (U. Gerlach, FB 3.6, udo.gerlach@ptb.de)

Maßgebliche fachinhaltliche Mitarbeit in der IEC Ad hoc group SC31G AHG 3 „Spark Test Apparatus“

Wegen der vielen Nachteile, die bei der Durchführung praktischer Zündversuche mit dem nach IEC-60079-11 genormten Funkenprüfgerät verbunden sind, soll die Ad hoc Group AHG 3 der IEC alternative Prüfverfahren analysieren und Vorschläge erarbeiten. Diese Arbeiten werden maßgeblich aufgrund der in der PTB vorliegenden Erfahrungen in Kooperation mit der australischen Forschergruppe CRC Mining und der University of Queensland (Australien) durchgeführt. Aufgrund der vielversprechenden Vorarbeiten wurde durch die IEC vorgeschlagen, die weiterführenden Arbeiten in einer dauerhaft arbeitenden neuen Working Group SC31G WG 4 unter maßgeblicher Beteiligung der PTB durchzuführen. (U. Gerlach, FB 3.6, udo.gerlach@ptb.de)

PTB Ex Proficiency Testing Program

Die PTB ist Koordinator für die im Jahr 2009 angelaufene Pilotphase des internationalen Ringvergleiches im Explosionsschutz. Es wurden die statistischen Methoden der Datenauswertung, der Bestimmung und Beurteilung von Leistungskenngrößen von Funken sowie der Präsentation des Datenmaterials erarbeitet und in einem internen Leitfaden dokumentiert. (T. Horn, FB 3.6, thomas.horn@ptb.de)

Eigensicherheitsbeurteilung elektrischer Leitungen

In der konventionellen Beurteilung eigensicherer Stromkreise werden elektrische Leitungen vereinfacht als konzentrierte Kapazitäten behandelt. Dieser ausgesprochen konservative Ansatz führt in der Praxis zu dem Nachteil einer übermäßigen Limitierung der Leitungslänge. Zurzeit werden Versuchsreihen durchgeführt, welche die Zündfähigkeit von elektrischen Leitungen in bestimmten Fehler-

fällen untersuchen, um aus den experimentellen Ergebnissen neue Grenzwerte abzuleiten. (T. Horn, FB 3.6, thomas.horn@ptb.de)

Zündwirksamkeit mechanisch erzeugter Zündquellen in Wasserstoff/Luft-Atmosphären

Mechanische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen erzeugen in bestimmten Fehlerzuständen, z. B. beim Ausfall von Schmiermittel, mechanisch erzeugte Funken und heiße Oberflächen. Aktuell wurden Zündgrenzen bei Trockenreibung ermittelt. (M. Beyer, FB 3.7, michael.beyer@ptb.de)

Zeitlich aufgelöste Bestimmung des Drehzahl- und Drehmomentverlaufes

Explosionsschutz elektrische Antriebe werden hinsichtlich des Erwärmungsverhaltens untersucht, damit keine kritischen Temperaturen erreicht werden, die oberhalb der festgelegten Temperaturklasse für den Explosionsschutz liegen. Um moderne Antriebssysteme hinsichtlich der Verluste untersuchen zu können, sind die mechanischen Größen Drehzahl und Drehmoment zur Festlegung der Ausgangsleistung relevant. Der zeitlich aufgelöste Verlauf gibt Aufschlüsse über die Charakteristik der Antriebe. (F. Lienesch, FB 3.7, frank.lienesch@ptb.de)

Rotorstromermittlung an Asynchronmaschinen

Für explosionsgeschützte Asynchronmaschinen der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ muss im Rahmen der Typprüfung die Auslösezeit t_E bestimmt werden. Insbesondere für Maschinen großer Leistung stößt die messtechnische Bestimmung an die Grenzen der Prüffelder. Ein erster Schritt zur rechnerischen Bewertung der erwarteten Temperaturen ist die Vorausberechnung der im blockierten Zustand des Motors zu erwartenden Rotorströme. (U. Dreger, FB 3.7, uwe.dreger@ptb.de)

Verifizierung der Messung übertragener Ladungen von Büschelentladungen

Es ist Stand der Technik, Kunststoffe unter kritischsten klimatischen Bedingungen experimentell auf ihre elektrostatische Aufladbarkeit zu prüfen. Bei der elektrischen Prüfung entsteht hierbei ein Messfehler durch Influenzladung auf die Messelektrode. Es wird gezeigt, dass dieser Messfehler nur eine geringe, akzeptable Größe aufweist. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)

Zündwirksamkeit von Ultraschall gegenüber Partikeln und Staub-Luft Gemischen

Ultraschall ist in der Europäischen Explosionschutz-Richtlinie 94/9/EG (ATEX) als eine von 13 potenziellen Zündquellen genannt. Allerdings fehlte bisher der Nachweis, dass Ultraschall tatsächlich explosionsfähige Gemische zünden kann. Nun ist es erstmals gelungen, in einem Ultraschallstehwellenfeld diesen Nachweis zu führen und ein Schwefelstaub-Luft-Gemisch zu zünden. (L. H. Simon, FB 3.7, lars.h.simon@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Erfolgreicher Spurenfuchte-Vergleich zwischen NIST – NPL – NMIJ – PTB (EURAMET 1002)

Nach mehrjähriger Vorbereitung wurden im Zeitraum 2008–2010 im Rahmen des EURAMET-Projektes 1002 zwischen NIST, NPL, NMIJ und PTB erstmals Vergleichsmessungen im extremen Spurenfuchte-Bereich 10 nl/l bis 2000 nl/l Wasserdampf in Inertgas durchgeführt. Als TransfERNormale wurden zwei CRD-Spektrometer verwendet. Die Generierung und Rückführung dieses Spurenfuchte-Bereiches ist seit Längerem aufgrund seiner Bedeutung insbesondere für die Reinstgas- und die Halbleiter-Industrie Gegenstand intensiver Entwicklungsarbeiten in den o. g. Instituten. Ein erster Ergebnisbericht über die Vergleichsmessungen zeigt den Erfolg dieser Entwicklungsarbeiten und die hervorragende Eignung des coulometrischen Spurenfuchte-Generators der PTB, der im Rahmen der Messunsicherheiten sehr gut mit den gravimetrischen Spurenfuchte-Generatoren übereinstimmt. Damit haben sich die von der PTB bisher ermittelten und angegebenen Messunsicherheiten für den Spurenbereich bestätigt. (P. Mackrodt, FB 3.2, peter.mackrodt@ptb.de)

Neues Primärnormal für die Feuchte in Methan

Im Rahmen der Tätigkeiten im EMRP-Projekt ENG01 „Energy Gases“ wurde in der PTB ein neuer Primärgenerator auf der Basis eines coulometrischen Feuchtegenerators aufgebaut, der mit gasförmigem Methan (CH_4) betrieben wird. Die Arbeitsgruppe „Feuchte“ besitzt weltweit die größten Erfahrungen mit coulometrischen Spurenfuchte-Generatoren und wendet dieses Prinzip in dem neuen Generator an, um definiert rückgeführte Mengen an Feuchte in Methan zu erzeugen. Methan ist der dominie-

rende Bestandteil in Erdgas. Der neue Generator wird dazu beitragen, die Unsicherheit von rückgeführten Feuchtemessungen in der Erdgas-, -fördernden und -verarbeitenden Industrie deutlich zu verbessern. Eine Erweiterung auf komplexere Gaszusammensetzungen, auch im Hinblick auf Biogase, ist konzeptionell möglich und kann in Abstimmung mit der Industrie realisiert werden. (P. Mackrodt, FB 3.2, peter.mackrodt@ptb.de)

Laserspektrometrie für Reinstgase

Für den Schwerpunkt Umwelt des Europäischen Metrologieforschungsprogramms EMRP entwickelt die PTB ein laserspektrometrisches Verfahren zur Bestimmung von Verunreinigungen in Reinstgasen und Gasgemischen. Ziel ist es, durch Kombination etablierter metrologischer Konzepte der laserspektrometrischen Gasanalytik mit neuen, z. T. auch faserbasierten Mehrwellenlängen-Spektrometern mehrere Inhaltsstoffe gleichzeitig zu quantifizieren. Für die in der PTB eingesetzte Messmethode der kalibrierfreien Laserspektrometrie ist zudem die genaue Kenntnis von spektralen Referenzdaten der zu messenden Spezies entscheidend. Diese werden ebenfalls in der Arbeitsgruppe *Metrologische Molekülspektroskopie* gemessen. (O. Werhahn, FB 3.2, olav.werhahn@ptb.de)

Erzeugung eines definierten Rußaerosols für die streulichtbasierte Sensoren in der Diesel-Abgasmesstechnik

Im Rahmen eines gemeinsamen Projektes mit dem ASA-Verband e.V. wurde ein Messaufbau realisiert, der die Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Korrelation zwischen dem Ruß-Trübungskoeffizienten, Rußmassenfracht und dem Streulichtsignal der Russpartikel ermöglicht, um die derzeit noch fehlenden Grundlagen für die zukünftige Bauartzulassung neu entwickelter Streulichtbasierter Messgeräte zu erarbeiten. (A. Nowak / N. Böse, FB 3.2, norbert.boese@ptb.de)

EMRP-Projekt zu den zukünftigen Anforderungen in der Rußpartikelmesstechnik

Mit einem Kick-Off-Workshop im Juni 2011 ist das Forschungsprojekt ENV02 „Emerging requirements for measuring pollutants from automotive exhaust emissions“, PartEmission, unter der Federführung der PTB gestartet. Bei diesem auf drei Jahre ausgelegten Projekt im Rahmen des EMRP geht es u. a. um die rückführbare Messung von Dieselpartikeln in

Autoabgasen gemäß den Anforderungen der EURO-Norm 5 sowie um Verfahren zur periodischen Abgaskontrolle. (M. Thedens/V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

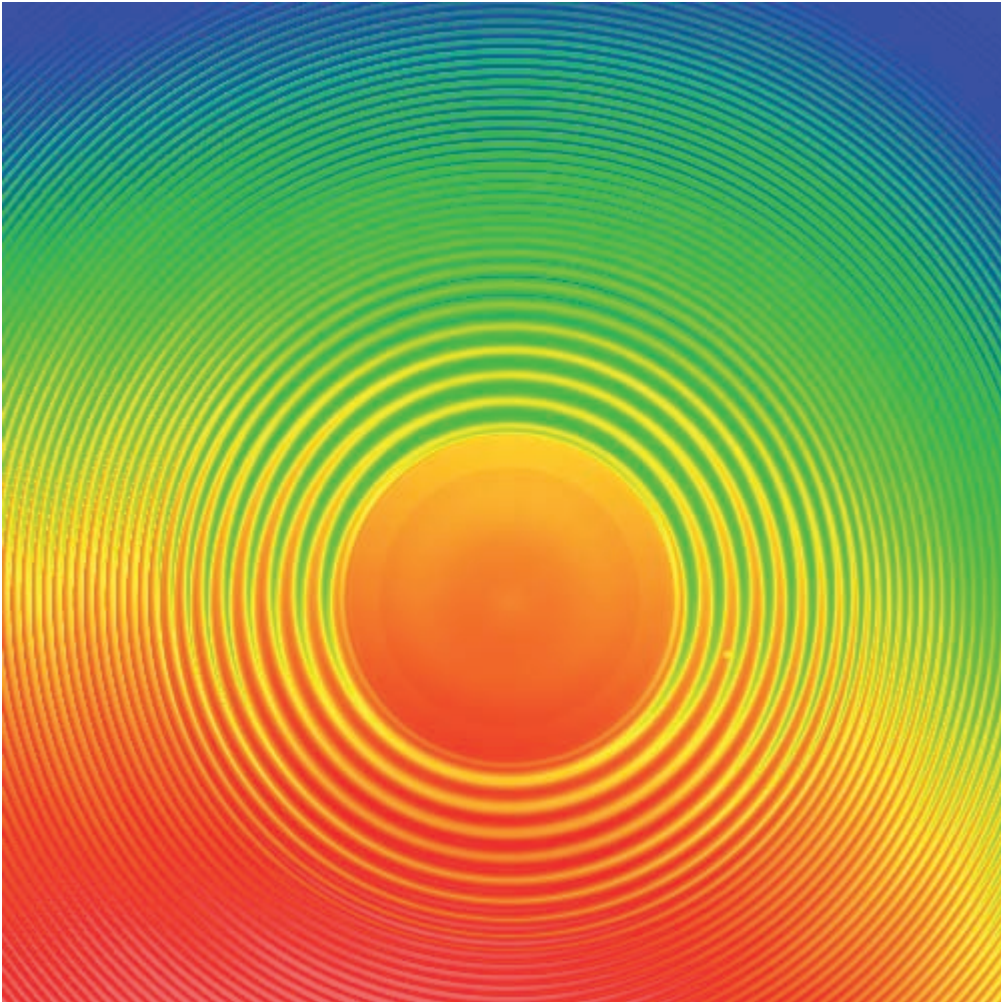
In-situ-Restgasquantifizierung mit Diodenlaser-Absorptionsspektroskopie

Zum besseren Verständnis und zur Optimierung der zur Schadstoffminimierung in Verbrennungsmotoren eingesetzten Abgas-Rückführungssysteme, ist eine schnelle probe-nahmefreie Gasanalyse im Brennraum der Motoren nötig. Für diesen Zweck wird derzeit im Rahmen eines AIF-geförderten Projektes ein neues rein optisches, fasergekoppeltes High-speed-in-situ-Laser-Hygrometer entwickelt, das in der Lage ist, absolute H_2O -Konzentrationen kurbelwinkel-aufgelöst, d. h. mit einer Zeitauflösung von unter 100 μs , zu erfassen. (O. Witzel/V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

Für weitere zwei Jahre ist der Zertifizierungssektor Explosionsschutz der PTB in führender Rolle in Europa unterwegs

Auf der letzten Sitzung im November 2011 von ExNB, der europäischen Gruppe aller nach der ATEX-Richtlinie 94/9/EG Benannten Stellen, wurde Martin Thedens erneut zum Chairman gewählt. Thedens vertritt die 64 Benannten Stellen gegenüber der EU-Kommission und nimmt über die Beteiligung an den relevanten europäischen und internationalen Gremien Einfluss auf die zukünftigen Normen und Regeln. Eine wichtige Unterstützung der deutschen Industrie, gerade auch von KMU, ist die aktive Gremienarbeit in leitenden Positionen, um durch eine einheitliche und ausgewogene Positionierung die deutschen Interessen international vertreten zu können. (M. Thedens, FB 3.5, martin.thedens@ptb.de)





Zu den Aufgaben der Abteilung *Optik* gehören in besonderem Maße die Darstellung und Weitergabe von Einheiten im Messwesen im Bereich der Optik und dort, wo optische Methoden vorzugsweise benötigt werden. Die Abteilung *Optik* arbeitet daher auf den metrologischen Themenbereichen *Radiometrie und Photometrie, Länge und Dimensionelles* und *Zeit und Frequenz*. Die Aufgaben in *Radiometrie und Photometrie* und *Länge und Dimensionelles* teilt sich die Abteilung *Optik* mit anderen Abteilungen, den Themenbereich *Zeit und Frequenz* bearbeitet sie allein. Dabei stellt die Abteilung *Optik* mit der Sekunde, dem Meter und der Candela drei der sieben Basiseinheiten des internationalen Einheitensystems (SI) und die davon abgeleiteten wichtigsten Einheiten dar und gibt sie mit kleinstmöglichen Unsicherheiten weiter.

Besondere Forschungsaufgaben in den drei Themenbereichen bearbeitet die Abteilung *Optik* mit europäischen Partnern im Rahmen des von der EU geförderten European Research Metrology Programme (EMRP). In diesem Jahr sind im Themenbereich *Länge und Dimensionelles* zwei Joint Research Projects des EMRP begonnen und eines neu genehmigt worden, bei denen die Koordination in der Abteilung *Optik* liegt. Letzteres gilt auch für zwei neu genehmigte Projekte aus dem Themenbereich *Zeit und Frequenz*. Mit den zusätzlichen Ressourcen können jetzt in beiden Themenbereichen anderweitig nicht durchführbare zukunftsweisende Forschungsthemen bearbeitet werden. Einige der wichtigsten Entwicklungen und Fortschritte im Jahr 2011 in den Arbeitsschwerpunkten der Abteilung *Optik* und des *QUEST-Instituts in der PTB* werden im Folgenden nach den Themenbereichen gegliedert vorgestellt.

Titelbild:

Interferometrische Topografiemessung eines Chirp-Prüflings, bei dem radial eine sinusförmige Struktur mit nach außen ansteigender Ortsfrequenz aufgebracht wurde. Der Prüfling wurde in einem Diamant-Drehprozess in der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* gefertigt und wird zur Bestimmung der lateralen Auflösung des Interferometers eingesetzt.

Radiometrie und Photometrie

Gesetzliche und gesellschaftliche Forderungen nach höherer Energieeffizienz, Farbtreue, Lebensdauer und Umweltverträglichkeit von Lampen und Leuchten führen gegenwärtig zu neuartigen Lichtquellen, die ihrerseits wieder ganz neue Anwendungsfelder erschließen. Reichte früher dem Verbraucher die Angabe der elektrischen Leistung in Watt zur Lampenkennzeichnung, begründet nun der Bedarf an modernen, effizienten Lichtquellen die gestiegene Bedeutung der photometrischen SI-Einheiten Candela und Lumen. Verschiedene Beispiele der PTB-Arbeit im Berichtsjahr auf dem Feld Leuchtdioden (LEDs) und organische Leuchtdioden (OLEDs) oder der Laserlichtquellen sollen die sich daraus ergebenden Herausforderungen an die Metrologie verdeutlichen: Die Entwicklung von OLEDs mit großer Fläche, sogenannten OLED-Kacheln, für die direkte Raumbeleuchtung wird von der deutschen und europäischen Industrie vorangetrieben. Sowohl für die Entwickler als auch für die Kunden sind dabei Eigenschaften wie die Homogenität der Leuchtdichte, die exakte Position im Farbraum oder die zeitliche Stabilität dieser Größen wichtig. Die PTB hat daher einen Messplatz entwickelt, an dem gleichzeitig 60 OLEDs über lange Zeiträume betrieben und ihre relevanten Eigenschaften charakterisiert werden (Bild 1 und Nachrichten aus der Abteilung). Die Ergebnisse fließen direkt in eine erste nationale und internationale Norm zur Messung der Lebensdauer von OLEDs ein, die gegenwärtig erarbeitet wird.

Nachdem OLED-Beleuchtungselemente jetzt als Serienprodukte verschiedener Hersteller erhältlich sind, werden geeignete Referenznormale immer wichtiger, mit denen Kalibrierungen und Überprüfungen vor Ort mit geringer Unsicherheit durchgeführt werden können. Da sich OLED-Quellen hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften erheblich von den bisherigen Lichtquellen unterscheiden, sind die geforderten geringen Unsicherheiten nur erreichbar, wenn TransfERNormale zur Verfügung stehen, die ebenfalls auf einer OLED-Quelle basieren. In der PTB wurde jetzt weltweit erstmals solch ein Normal entwickelt (Bild 2 und Nachrichten aus der Abteilung), das für Kalibrierungen und Prüfungen in Industrie und Technik genutzt werden kann.

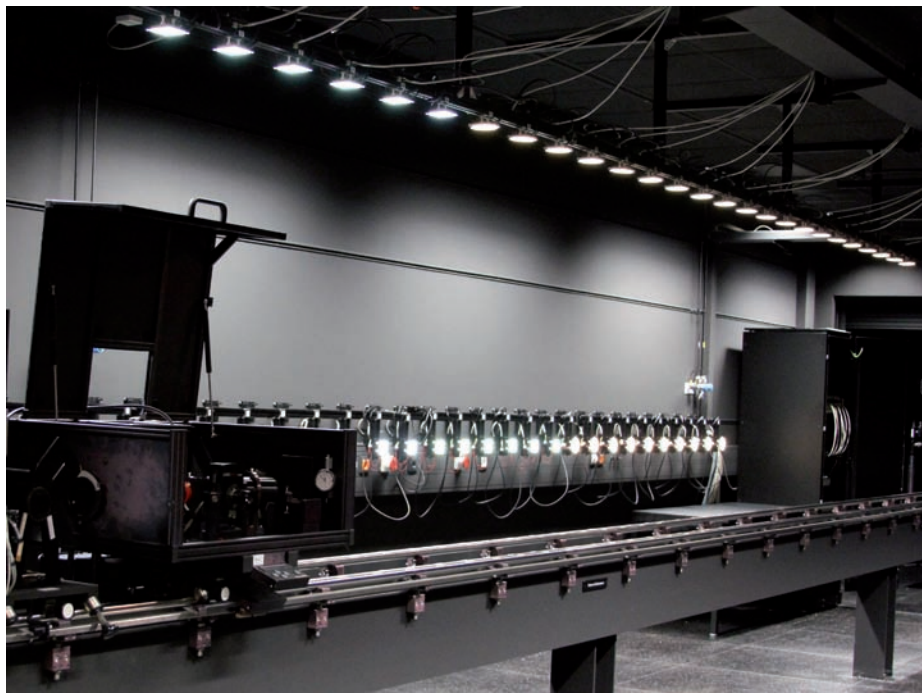


Bild 1: Messplatz der PTB zur Charakterisierung von großflächigen OLEDs

In der optischen Metrologie werden Strahlungsquellen, die sich über den gesamten sichtbaren und die angrenzenden Spektralbereiche durchstimmen lassen und dabei auch noch hinreichend Leistung besitzen, in vielen Anwendungen benötigt. Gepulste Femtosekundenlaser-Systeme erfüllen diesen Anspruch. Für viele metrologische Anwendungen ist es allerdings nachteilig, dass die hohen Spitzenleistungen der kurzen Pulse zu Sättigungseffekten und anderen Nichtlinearitäten führen können. In der PTB wurde daher ein Puls-zu-Gleichlicht-Konverter entwickelt, der die Laserpulse unterschiedlich verzögert und wieder zusammenfasst, so dass im Wesentlichen am Ausgang des Konverters ein nahezu zeitlich konstantes Lasersignal entsteht. Die gegenüber monochro-

matisierter Strahlung bis zu 1000-mal höhere spektrale Ausgangsleistung erlaubt zukünftig eine deutlich reduzierte Messunsicherheit für Kalibrierungen in Photometrie, Photovoltaik oder Reflektometrie.

Bei der Nutzung von kohärenter Laserstrahlung in der optischen Messtechnik können bei Mehrfachreflexionen in den einzelnen optischen Komponenten Interferenzstrukturen auftreten, die zu Fehlmessungen führen. Wenn die üblichen Methoden zur Unterdrückung der Interferenzstrukturen durch Diffusoren, keilförmige Fenster oder Antireflexionsbeschichtungen nicht anwendbar sind, muss der Einfluss der Interferenzen korrigiert und die Unsicherheit dieser Korrektur quantitativ er-

Bild 2: OLED-Transfernormal mit Steuerelektronik



fasst werden. In der PTB wurde dazu ein Algorithmus mit digitaler Filterung entwickelt und hinsichtlich der erreichbaren Unsicherheit an einem Photodetektor mit Fenster charakterisiert. Der Detektor wurde sowohl mit durchstimmbarer Laserstrahlung als auch mit einem klassischen monochromatorbasierten Messplatz kalibriert. Im Ergebnis zeigt die Abweichung zwischen den gefilterten und den interferenzfreien Messungen von nur 0,05 %, dass bei der Anwendung des Algorithmus' laserbasierte Interferenzeffekte die Unsicherheit bei der Nutzung von Lasern in der Photometrie gegenwärtig nicht mehr begrenzen.

Die quantitative Bestimmung der spektralen Reflexions- und Transmissionscharakteristik makroskopischer und mikroskopischer Materialien hat zunehmend wachsende Bedeutung. In der PTB sind dazu drei neue Messplätze entwickelt worden, deren jüngster als Referenzmessplatz für gerichtete spektrale Transmission und Reflexion genutzt wird und das nationale Normal darstellt. Mit ihm sind hochgenaue Untersuchungen sowohl der regulären Reflexion als auch von „off-axis“- oder irregulären Streuverteilungen möglich. Mit den sich ergänzenden Messplätzen sind jetzt erstmals Messungen zur vollständigen Charakterisierung von sogenannten goniochromatischen Farben durchgeführt werden, deren Winkelabhängigkeit auf einem Interferenzeffekt beruht. Von Anwendern (Bild 3) wird verstärkt eine vollständige Charakterisierung der Reflexionseigenschaften benötigt, die nicht mehr

nur auf die bisher genutzten Reflexionsgeometrien zurückgehen, bei denen einfallender und reflektierter Strahl in einer Ebene liegen. Mit den neuen Messeinrichtungen ist die PTB für die kommenden Anforderungen und ihre Auswirkungen auf Normung und industrielle Messtechnik gerüstet.

Länge und Dimensionelles

Moderne Optiken basieren zunehmend auf asphärischen Linsen und Freiformflächen, weil damit sehr viel kleinere optische Baugruppen bei gleichzeitiger Verbesserung der optischen Abbildung realisiert werden können. Die Metrologie steht damit vor der Herausforderung, rückgeführte Form- und Strukturmessungen mit (Sub-) Nanometergenauigkeit an optischen Funktionsflächen wie Asphären, Freiformoptiken oder hybriden Optiken zu garantieren. Optische Planflächen werden als Referenzflächen für Formmesssysteme wie z. B. Interferometer benötigt, wobei für hochgenaue Anwendungen Unsicherheiten von $\lambda/1000$ gefordert werden, die einer Abweichung im Subnanometerbereich entsprechen. Dazu hat die PTB ein neues Ebenheitsreferenzsystem entwickelt (s. Jahresbericht 2010), das jetzt zur Bestimmung der Unsicherheiten in die bestehende Simulationsumgebung der PTB eingebunden wurde. An großflächigen Spiegeln wurden über eine Länge von mehr als einem halben Meter Standardabweichungen von unter 0,5 nm erreicht.

In Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin am BESSY II und dem Fachbereich

Bild 3: Teilnehmer der 37. Jahrestagung der Deutschen Farbwissenschaftlichen Gesellschaft in der PTB



Mathematische Modellierung und Datenanalyse der PTB wurden neuartige interferometrische Messverfahren zur Topografiebestimmung eines Ellipsoidspiegels untersucht, der zur Fokussierung der Synchrotronstrahlung eingesetzt wird. Bei solchen Spiegeln mit großer Höhenvariation der spiegelnden Oberfläche sowie großer und unterschiedlicher Krümmung in den einzelnen Richtungen sind die üblichen interferometrischen Methoden nicht mehr anwendbar. In dem neu entwickelten Verfahren werden mehrere tausend Subtopografien der Oberfläche mit einem Interferometer lokal gemessen und aneinandergeheftet (Stitching-Verfahren). Gegenüber den herkömmlichen Stitchingverfahren erlaubt das neue Verfahren es, auch den absoluten Radius zu bestimmen. Für einen Synchrotron-Fokussierspiegel mit einer Topografievariation von 5 mm konnte im Rahmen von virtuellen Experimenten, die das reale Experiment unter Einbeziehung aller relevanten Parameter simulieren, eine Rekonstruktionsgenauigkeit von 100 nm (rms) ermittelt werden. Diese virtuellen Experimente liefern damit wertvolle Informationen zur Konzipierung von neuen Messverfahren.

Genau dimensionelle Messungen von Mikro- und Nanostrukturen werden auch in der Halbleiterindustrie und der Nanotechnologie mit immer höherem Auflösungsvermögen und geringerer Messunsicherheit gefordert. Das ist mit optischen Verfahren durch Nutzung kurzer Wellenlängen (193 nm), abbildungs-freier Verfahren (Scatterometrie) sowie einer

möglichst exakten und realitätsnahen Modellierung der Experimente möglich. In einer Zusammenarbeit mit dem Advanced Mask Technology Center (AMTC) in Dresden wurden mit dem Deep-UV-Scatterometer der PTB (Bild 4) Messungen von Strukturbreiten auf einer phasenschiebenden MoSi-Fotomaske durchgeführt. Vergleiche mit Messungen an einem Rasterelektronenmikroskop ergaben, dass die dort erzielten Ergebnisse sehr empfindlich von der Beschaffenheit des Strukturbreitennormals abhängen, das für die Kalibrierung des Rasterelektronenmikroskops verwendet wird. Hinzu kommt, dass die Ergebnisse vom verwendeten Geometriemodell abhängen. Die Untersuchungen zeigen, dass mit der gleichzeitigen Anwendung von UV-optischen und elektronenmikroskopischen Messtechniken und einer quantitativen Modellierung die angestrebten geringsten Unsicherheiten erreichbar sind.

In der höchstgenauen dimensionellen Metrologie wie z. B. bei der Bestimmung des Durchmessers der Siliziumkugeln für das Avogadroexperiment (s. Jahresbericht 2010) werden Laser-Interferometer mit Optiken zur Strahlformung und Wellenfront-Anpassung eingesetzt. Für die Abschätzung der Messunsicherheiten, die im Subnanometer-Bereich liegen, müssen die Effekte der Beugung quantitativ berücksichtigt werden. In der PTB wird dazu eine rigorose Beschreibung der Beugung mit der tatsächlichen Geometrie der optischen Systeme kombiniert. Die Simulation realistischer optischer Subsysteme (s. Nachrichten aus der

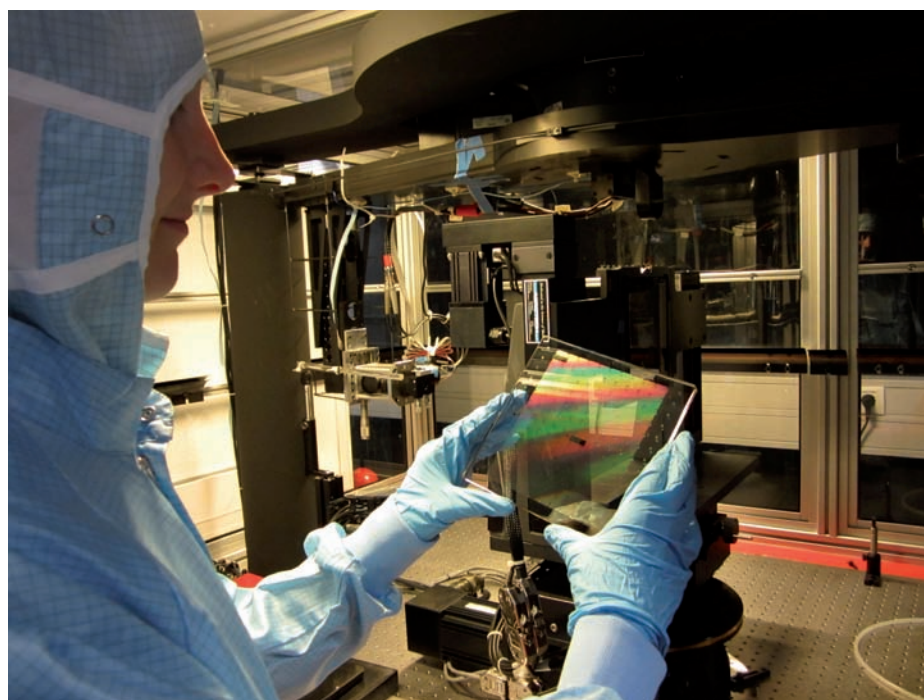
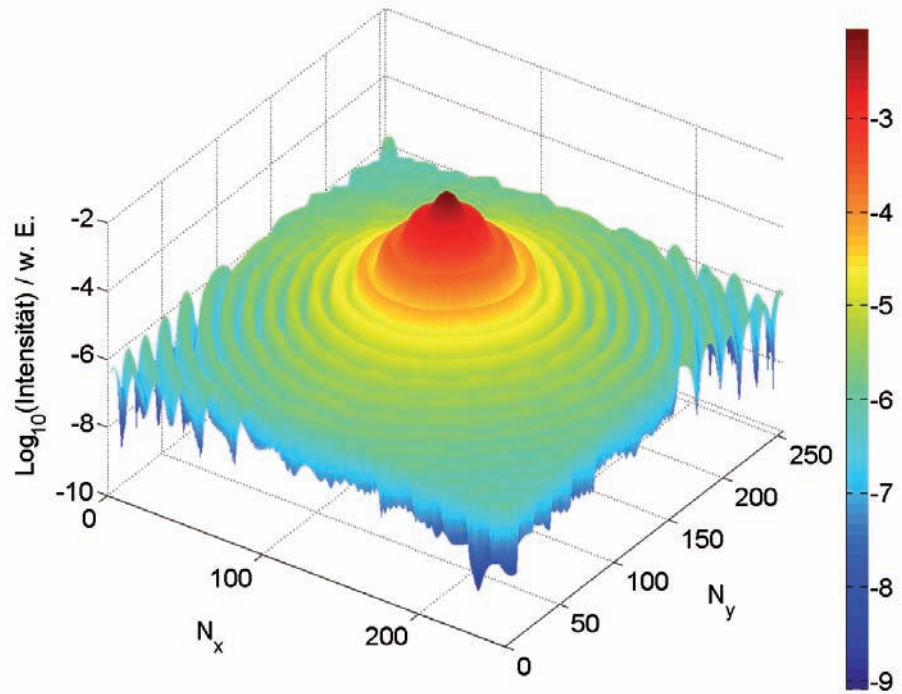


Bild 4: Am Scatterometrie-Messplatz werden Linienbreiten von phasenschiebenden Fotomasken für das tiefe Ultraviolett bestimmt.

Bild 5: Simulation der Intensität nach Beugung an einer Kreisblende in der Brennebene einer dicken bikonvexen Linse im Bildbereich in halblogarithmischer Auftragung.



Abteilung; Bild 5) zeigt, dass die Beugungseffekte, z. B. durch den Einfluss der sphärischen Aberration, zu wesentlichen Fehlern bei der üblicherweise verwendeten paraxialen Näherung führen.

Zeit und Frequenz

Mit dem Einheiten- und Zeitgesetz ist der PTB die Darstellung und Weitergabe der Einheit der Zeit, der Sekunde, sowie die Verbreitung der gesetzlichen Zeit in Deutschland übertra-

gen. Da überdies Uhren und Frequenznormale zu den genauesten Messgeräten überhaupt gehören, üben die Arbeiten der PTB auch eine ungeheure Faszination auf viele Bevölkerungsgruppen von Fachleuten bis zu interessierten Laien aus (Bild 6).

Die PTB betreibt vier primäre Atomuhren, von denen CS1 und CS2 thermische Caesiumatomstrahlen nutzen und CSF1 und CSF2 lasergekühlte Atomfontänen. Nach 24 Jahren



Bild 6: Andreas Bauch (PTB) erklärt dem Reporter Pete die Zeitmessung bei den Dreharbeiten für den Tigerentenclub im Studio des Südwestrundfunks. (Foto: SWR)

in ununterbrochenem Betrieb musste der Caesiumvorrat (Bild 7) in den beiden Öfen von CS2 erneuert werden. Nach einer Messunsicherheitsanalyse erfolgte eine unabhängige Validierung der Messwerte durch das Internationale Büro für Maße und Gewichte (BIPM).

Seit Juni 2011 wird CS2 erneut vom BIPM zur Realisierung der koordinierten Weltzeit (UTC) verwendet. In der PTB dient CS2 als eine der Referenzuhren für die Realisierung der Atomzeitskala UTC(PTB) (vergl. Jahresbericht 2010) und damit auch der gesetzlichen Zeit.



Bild 7: CS2 tickt wieder, nachdem nach 24-jährigem Betrieb der Caesiumvorrat von zwei Ampullen mit je 5 g Caesium-133 in den beiden Atomstrahlöfen der Uhr aufgefüllt worden war.

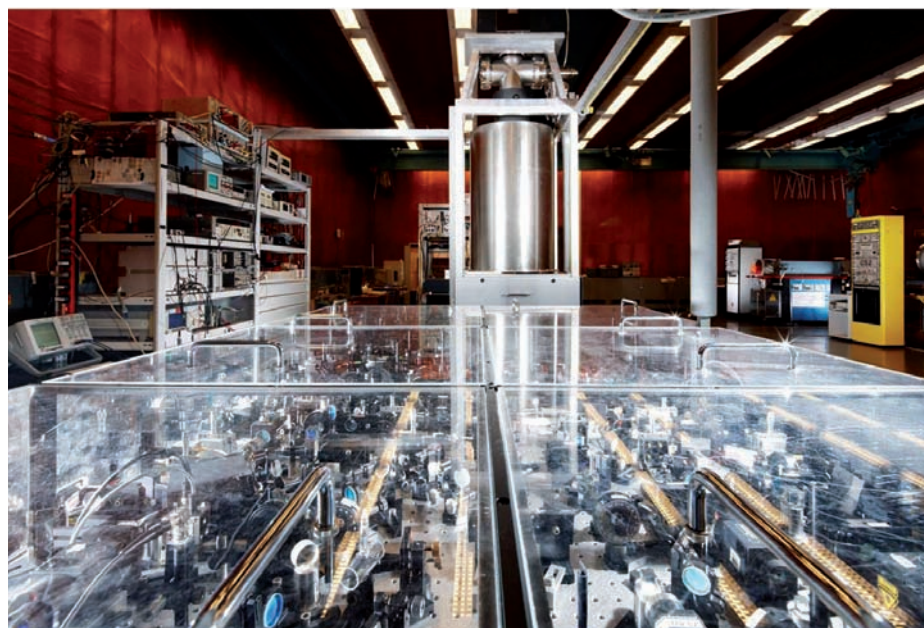


Bild 8: CSF2, die genaueste Caesiumfontänenuhr der PTB

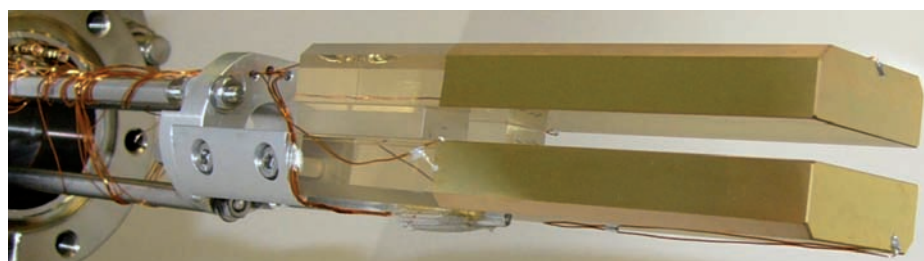


Bild 9: Kondensator zur Bestimmung der Abhängigkeit der Übergangsfrequenz der elektrischen Feldstärke in der optischen Gitteruhr mit Strontiumatomen

Bei der um mehr als eine Größenordnung genaueren Fontänenuhr CSF2 konnte im Berichtszeitraum die systematische Unsicherheit auf $4,1 \cdot 10^{-16}$ reduziert werden. Das bedeutet eine Halbierung der vorherigen Unsicherheit, die durch eine Neuevaluation von Phasenfehlern und eine verringerte statistische Unsicherheit bei der Ermittlung der Stoßverschiebung erreicht wurde. Zudem wurde ein Verfahren implementiert, durch das die systematische Unsicherheit der Stoßverschiebung deutlich reduziert wird. Damit kann die Uhr jetzt auch mit höheren Atomzahlen bei gleicher systematischer Unsicherheit betrieben werden, wodurch sich die Stabilität der Uhrenfrequenz verbessert. Dadurch werden systematische Untersuchungen von frequenzverschiebenden Effekten mit höherer Genauigkeit möglich. Bereits jetzt gehört CSF2 als genaueste Uhr der PTB zu den Uhren mit den weltweit geringsten Unsicherheiten (Bild 8).

Die erreichbare Unsicherheit der genauesten Atomuhren im Mikrowellen- wie auch im optischen Bereich wird gegenwärtig unter anderem durch den Einfluss der Temperaturstrahlung begrenzt. Diese Strahlung verschiebt die beiden Niveaus der Atome, zwischen denen der Uhrenübergang abgefragt wird, und damit die Uhrenfrequenz temperaturabhängig. Für die Strontium-Gitteruhr der PTB wurde die relative Verschiebung zu etwa $5 \cdot 10^{-15}$ berechnet. Um den Wert auch experimentell genau bestimmen zu können, müssen die Atome in der Atomuhr in eine abgeschirmte Umgebung verschoben werden, in der z. B. das elektrische Feld oder die Umgebungstemperatur definiert eingestellt werden kann. In der PTB ist es jetzt gelungen, die Atome im optischen Gitter definiert um etwa 5 cm in 0,2 s z. B. in einen Kondensator (Bild 9) zu verschieben, wobei weniger als 5 % der Atome bei der Verschiebung verloren werden. Damit sind die Voraussetzungen geschaffen, die Temperaturverschiebung mit hoher Genauigkeit auch experimentell zu bestimmen. Gemeinsam mit dem Institut für Laserphysik in Novosibirsk wurde zur Beherrschung der Temperaturverschiebung ein alternatives Konzept entwickelt, das es ermöglicht, aus zwei geeigneten Uhren eine reproduzierbare „synthetische“ Ausgangsfrequenz zu erzeugen, die in einem weiten Bereich von der Umgebungstemperatur unabhängig ist. Ein besonders gut geeigneter Kandidat für dieses Verfahren ist das $^{171}\text{Yb}^+$

Frequenznormal der PTB, in dem abwechselnd zwei Uhrenübergänge im selben Ion abgefragt werden können.

Der Vergleich räumlich weit entfernter optischer Uhren mit den erwarteten relativen Unsicherheiten von 10^{-17} und darunter ist gegenwärtig mit konventioneller Zeit- und Frequenzverteilung über Satellitentechniken nicht möglich, wohl aber schon heute über phasenstabilisierte Glasfaserverbindungen. Als weltweit längste realisierte Strecke ist vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching und der PTB gemeinsam eine 900 km lange Strecke in Betrieb genommen und charakterisiert worden. Es konnte in diesem Jahr gezeigt werden, dass die erreichte Frequenzunsicherheit kleiner als $2 \cdot 10^{-18}$ ist. Die Verbindung wurde bereits für eine direkte Messung des 1S-2S-Übergangs im Wasserstoff (MPQ) mit der Caesiumfontänenuhr (PTB) genutzt.

Die Frequenzmetrologie der PTB erschließt auch neue praktische Anwendungen: Die Spektrallinien eines optischen Frequenzkamms, der aus den phasenkohärenten Pulsen eines Femtosekundenlasers erzeugt wird, stellt eine neue Art von weißem Licht dar, das in der Frequenzmetrologie, der Präzisionsspektroskopie oder in der dimensionellen Metrologie neuartige Anwendungen gefunden hat. In allen diesen Bereichen werden optische Stallelemente benötigt, die es gestatten, die Frequenz der Kammlinien schnell und gezielt über einen weiten Bereich zu verschieben. Dazu wurde in der PTB ein universelles Stallelement entwickelt, bei dem die optische Phase der aufeinanderfolgenden Pulse so verschoben werden kann, dass jeder beliebige Frequenzverlauf eingestellt werden kann (Bild 10 und Nachrichten aus der Abteilung). Das vorgestellte Verfahren wurde patentiert und wird gegenwärtig im Rahmen eines Transferprojektes in die Industrie übertragen.

Forscher am QUEST-Institut für Experimentelle Quantenmetrologie der PTB und der Leibniz Universität Hannover haben mit der sogenannten π -Detektionsmethode ein neues Verfahren entwickelt, das die Unsicherheit der Bestimmung des quantenmechanischen Zustands signifikant reduziert, wenn dieser nur mit wenigen Photonen nachgewiesen werden kann. Die neue Detektionsmethode wurde mit Magnesium-Ionen implementiert und soll in Zukunft für den empfindlichen Nachweis des Spektro-

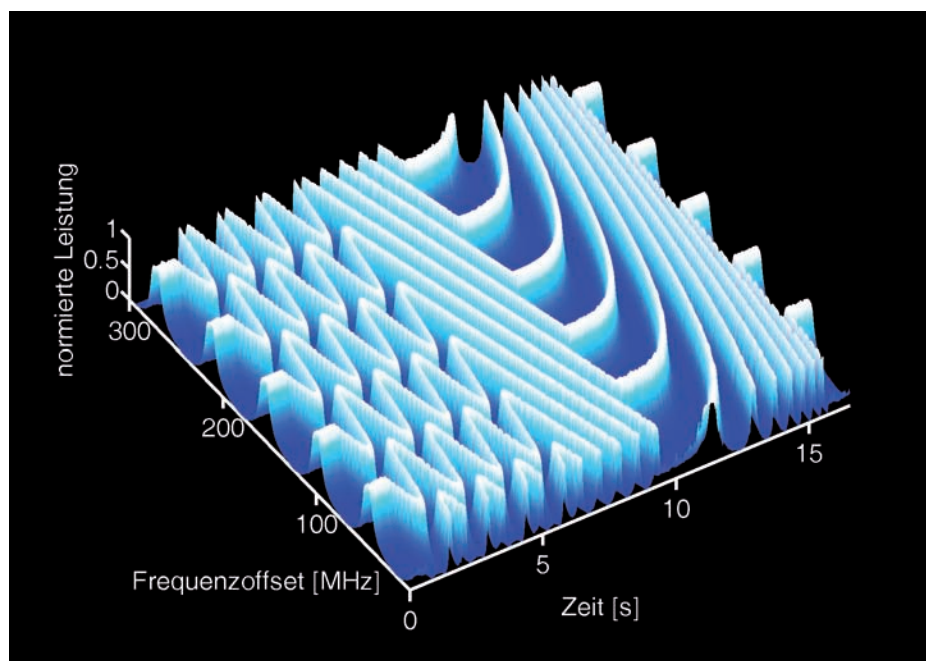


Bild 10: Spektrallinien eines optischen Frequenzkamms (Frequenzachse), die zeitlich nach einem vorgegebenen Verlauf (sinusförmig, lineare Rampe, kubische Verschiebung und Rückstellung) frequenzverschoben werden.

skopiesignals von komplexen Ionen und Molekülen eingesetzt werden. Darüber hinaus ist diese Bestimmung des internen Zustands einzelner Ionen von zentraler Bedeutung für die Spektroskopie, für Frequenznormale und Atomuhren oder für die Entwicklung eines zukünftigen Quantencomputers.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

Rückgeführte Messung der Größe von Nanopartikeln mit einem Rasterelektronenmikroskop

Mit einem Transmissionsdetektor in einem Rasterelektronenmikroskop (REM) lassen sich Nanopartikel mit gutem Kontrast abbilden. Der Vergleich der gemessenen REM-Signalsprofile mit entsprechenden simulierten Profilen liefert die Größe der Nanopartikel. Die Rückführung auf die SI-Einheit Meter gelingt mit Hilfe von kalibrierten Gitterstrukturen. Damit können Nanopartikel mit Durchmessern von etwa 6 nm bis hinauf zu derzeit rund 200 nm mit einer erweiterten Unsicherheit ($k = 2$) von ca. 1,5 nm bis 5 nm gemessen werden. (T. Klein, E. Buhr, FB 4.2, G. Frase, FB 5.2, tobias.klein@ptb.de)

Umwandlung gepulster Laser-Strahlung in cw-Strahlung

Mit der Entwicklung eines Impuls-zu-Dauerstrich-Konverters wurde ein entscheidender Nachteil beim Einsatz leistungsstarker fs-Lasersysteme im Bereich der Metrologie beseitigt. Die Neuentwicklung ermöglicht es nun, herkömmliche Monochromatorsysteme durch fs-Lasersysteme zu ersetzen, die eine bis zu 1000-mal höhere spektrale Ausgangsleistung besitzen. (S. Winter, FB 4.1, stefan.winter@ptb.de)

Korrekturalgorithmus für interferenzüberlagerte Messdaten

Werden photometrische oder radiometrische Empfänger ohne Diffusor an laser-basierten Messplätzen charakterisiert oder kalibriert, so wird das Messsignal oft durch Interferenzoszillationen überlagert. Es wurde ein Algorithmus mit digitaler Filterung entwickelt, der das Messsignal bezüglich der Interferenzen korrigiert. Sein Beitrag zur Messunsicherheit kann – im Gegensatz zu anderen Verfahren – quantitativ bestimmt werden, ist jedoch meistens vernachlässigbar klein. (M. Schuster, FB 4.1, michaela.schuster@ptb.de)

SiC-Photodioden unter hohen Bestrahlungsstärken zum Einsatz in UV-Radiometern

Neuartige SiC-Photodioden wurden auf ihre spektrale und integrale Ansprechempfindlichkeit insbesondere bei hohen UV-Bestrahlungsstärken untersucht. Zur Bestimmung ihres Alterungsverhaltens wurden diese mit einem leistungsstarken UV-Mitteldruckstrahler künstlich gealtert. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Photodioden nach ca. 100 Stunden Bestrahlung vorgealtert sind und in UV-Radiometern verwendet werden können. (S. Nowy, FB 4.1, stefan.nowy@ptb.de)

Faserfrequenzkämme für den Vergleich optischer Uhren

Für den Vergleich verschiedener optischer Uhren ist der faserbasierte Femtosekunden-Frequenzkamm ein unverzichtbares Instrument. Bei der fortschreitenden Entwicklung der optischen Uhren stellt sich daher die Frage, inwieweit das Eigenrauschen des Frequenzkamms eine Begrenzung für diese Vergleiche darstellt. Messungen zeigen, dass auch mit den faserbasierten Frequenzkämmen derzeit Uhren mit einer relativen Stabilität von $1 \cdot 10^{-16}$ in einer Sekunde und einer Unsicherheit unter $1 \cdot 10^{-17}$ ohne parasitäre Einflüsse des Frequenzkamms verglichen werden können. (C. Grebing, FB 4.31, christian.grebing@ptb.de)

Orientierungserhaltende Politur von Saphir-Einkristall-Spiegeln

Im Rahmen des Projekts „Röntgen-Fabry-Perot-Interferometrie“ müssen Saphir-Kristalle orientiert poliert werden. Hierbei konnten vor kurzem wesentliche Fortschritte erzielt werden, sodass die erreichte maximale Abweichung von der Ebenheit derzeit kleiner als 180 nm ist. Um die Zielvorgabe weniger Nanometer zu erreichen, kann jetzt die Nachbearbeitung mit einem Ionenstrahl durchgeführt werden. (B. Andreas, FB 4.31, Birk.Andreas@ptb.de)

Raytracing mit Beugung

Für die Abschätzung der Messunsicherheit von Laser-Interferometern, die Optiken zur Strahlformung und Wellenfront-Anpassung enthalten, wurde eine Methode entwickelt, die unter Ausnutzung von geometrischer Strahlverfol-

gung und Interpolationsverfahren auf der rigorosen Sommerfeld'schen Beugungstheorie aufbaut. Die Methode ist dabei nicht mehr nur auf den paraxialen Bereich beschränkt und soll für die Ermittlung von Messunsicherheiten in Interferometern im Subnanometerbereich eingesetzt werden. (B. Andreas, FB 4.31, Birk.Andreas@ptb.de)

900-km-Faserlink für den Vergleich weltbesten Uhren charakterisiert

Optische Telekommunikationsfasern werden inzwischen auch zur Zeit- und Frequenzübertragung genutzt. Als weltweit längste realisierte Verbindung wurden jetzt zwei 900 km lange phasenstabilisierte Glasfaserverbindungen zwischen der PTB Braunschweig und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching charakterisiert. In Langzeitmessungen konnte gezeigt werden, dass der relative Frequenzfehler dabei kleiner als $1,5 \cdot 10^{-18}$ ist. (G. Grosche, FB 4.3, gesine.grosche@ptb.de)

Messung des Synchronisationsfehlers zweier Frequenzzähler über einen 900 km-Glasfaserlink mit Sub-ms-Genauigkeit

Bei Frequenzvergleichen zwischen verschiedenen Laboren kann ein Synchronisationsfehler der jeweils verwendeten Frequenzzähler zu einer systematischen Frequenzabweichung führen. Mittels eines neu entwickelten optischen Verfahrens war es möglich, über eine phasenstabilisierte Glasfaserverbindung von 900 Kilometern Länge den Synchronisationsfehler zweier Zähler in Braunschweig und München mit einer statistischen Unsicherheit von $40 \mu\text{s}$ zu bestimmen. (S.M.F. Raupach, FB 4.3, smf.raupach@ptb.de)

Neuevaluation von Phasenfehlern in der Caesium-Fontäne CSF2

Phasengradienten in Mikrowellen-Resonatoren von Fontänen-Uhren bewirken Frequenzverschiebungen des Uhrenübergangs. Die entsprechenden Effekte wurden neu und umfassend an der Fontänen-Uhr CSF2 untersucht. Zusammen mit einer verringerten Unsicherheit der Stoßverschiebung ist die Gesamtunsicherheit von CSF2 gegenüber der früheren Evaluation auf $4,1 \cdot 10^{-16}$ annähernd kalibriert worden. (S. Weyers, FB 4.4, stefan.weyers@ptb.de)

Ein Fahrstuhl für Atome in der Strontium-Gitteruhr

Um optische Uhren weiter zu verbessern müssen die Einflüsse äußerer elektrischer Felder oder der Temperaturstrahlung auf die Atome in speziellen Umgebungen genau untersucht werden. Die im optischen Gitter der Strontium-Gitteruhr gehaltenen kalten Atome können jetzt um 5 cm mit einer Transporteffizienz $> 95 \%$, innerhalb von 230 ms, ohne signifikante Heizung transportiert werden. (T. Middelmann, FB 4.3 thomas.middelmann@ptb.de)

Verbesserte Messung der Stoßverschiebung an der Fontänen-Uhr CSF2

Die Verwendung der sogenannten Rapid Adiabatic Passage in der Fontänen-Uhr CSF2 ermöglichte es, die systematische Unsicherheit bei der Ermittlung der Stoßverschiebung um eine Größenordnung zu verringern. Damit konnte die statistische Messunsicherheit durch den Betrieb mit höheren Atomzahlen gesenkt werden, ohne dass die systematische Unsicherheit aufgrund von Stößen signifikant steigt. (V. Gerginov, FB 4.4, vladislav.gerginov@ptb.de)

Synthetische Frequenznormale

Es wurde theoretisch ein neues Konzept für atomare Frequenznormale untersucht, das es ermöglicht, eine reproduzierbare „synthetische“ Ausgangsfrequenz zu erzeugen, die in einem weiten Bereich von der Verschiebung der atomaren Übergangsfrequenz durch thermische Strahlung unabhängig ist. (Chr. Tamm, FB 4.4, christian.tamm@ptb.de)

Neuartiges Frequenzverschiebungsverfahren für optische Frequenzkämme

Mit einem in der PTB neu entwickelten Frequenzverschiebungsverfahren kann die Frequenz optischer Frequenzkämme und damit jede einzelne Frequenz nach einem vorgegebenen zeitlichen Verlauf verschoben werden. Der externe Frequenzverschieber besteht aus einem geeignet angesteuerten elektrooptischen Modulator. Das Frequenzverschiebungsverfahren ist universell, d. h. ohne Resonatoreingriff, für modengekoppelte Laser einsetzbar, weist eine große optische Bandbreite (limitiert durch die Breite des Frequenzkamms) auf und ermöglicht so z. B. die Vorgabe unlimitierter arbiträrer zeitlicher Verläufe der Verschiebefrequenz oder hohe Regelbandbreiten bis in den 10 MHz-Bereich. (E. Benkler, FB 4.5, erik.benkler@ptb.de)

Tomografie von NV-Zentren für die Kalibrierung von Einzelphotonendetektoren

Häufig weist die Emission praxisrelevanter Einzelphotonenquellen, wie z. B. Stickstofffehlstellen in Diamant (NV-Zentren), einen verbleibenden Mehrphotonenanteil auf, welcher zu abweichenden Ergebnissen bei der Kalibrierung von in der Quantenkommunikation, Biologie oder Astronomie genutzten Einzelphotonendetektoren führt. Deshalb wurde die Photonenstatistik des abgestrahlten Fluoreszenzlichts verschiedener NV-Zentren mit einem photonenzahlauflösenden Detektor, einem sogenannten Transition Edge Sensor, sowie mit der sogenannten „On/Off“-Methode bestimmt, die auf der Umverteilung der Photonenstatistik mittels definierter Filter beruht. Mit Kenntnis der gemessenen Photonenzahlverteilungen lassen sich jetzt für die Kalibrierung geeignete NV-Zentren auswählen sowie Messabweichungen aufgrund einer vorhandenen Mehrphotonenkomponente im Messunsicherheitsbudget besser berücksichtigen. (S. Peters, FB 4.5, silke.peters@ptb.de)

Robuste Zustandsdetektion einzelner Ionen

Die Bestimmung des internen Zustands von einzelnen Ionen ist von zentraler Bedeutung für die Spektroskopie und für Frequenznormale. Bei diesem Schrotrausch-limitierten Messprozess werden nur einige wenige Photonen detektiert. Die Güte und Robustheit dieses Messprozesses konnte nun durch ein neuartiges Verfahren signifikant erhöht werden. Die Implementierung mit Magnesium-Ionen ermöglicht es, Spektroskopie mit verbesserter Nachweiseffizienz durchzuführen. (P.O. Schmidt, QUEST, piet.schmidt@quantummetrology.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Erste Messungen mit dem neuen Ebenheitsreferenzsystem

Die optischen und mechanischen Komponenten des neuen Ebenheitsreferenzsystems wurden mit Winkelsekundengenauigkeit zueinander justiert. Messungen an einem Prüfling mit 540 mm Durchmesser zeigten Reproduzierbarkeiten von unter 0,5 Nanometer. Damit ist die Grundvoraussetzung für das Erreichen von Subnanometer-Unsicherheiten gegeben. (G. Ehret, FB 4.2, M. Stavridis, FB 8.4, gerd.ehret@ptb.de)

Strukturbreitenmessungen an einer phasenschiebenden Photomaske mittels verbessertem DUV-Scatterometer

Das DUV-Scatterometer der PTB wurde hinsichtlich des Dynamikbereichs, der Linearität und des Auswerteverfahrens zur Bestimmung der zu messenden Beugungseffizienzen weiterentwickelt. Mit dem verbesserten System wurden Strukturmessungen an einer Molybdänsilizid-Photomaske durchgeführt. Ein Vergleich mit Ergebnissen zweier Messplätze des Advanced Mask Technology Center, Dresden, konnte vormals bestehende Diskrepanzen auflösen. (M. Wurm FB 4.2, matthias.wurm@ptb.de)

37. Jahrestagung der DfwG in der PTB

Vom 4.–6. Oktober 2011 fand im neueröffneten Tagungszentrum der PTB die 37. Jahrestagung der Deutschen farbwissenschaftlichen Gesellschaft (DfwG) als Gemeinschaftsveranstaltung zwischen PTB und DfwG statt. Die DfwG ist das deutsche Spiegelgremium der CIE (CIE: International Commission on Illumination) für die Division 1 (Vision and Color) und Division 8 (Image Technology). Die Tagung stand im Zeichen des 80. Geburtstags der CIE-Normfarbtafel (CIE 1931) und des damit verbundenen 2°-Normalbeobachters. Die Mitglieder der DfwG kommen aus den verschiedensten Bereichen von Industrie und Forschung und arbeiten an der Verbreitung der Farbmessung, der Verbesserung der Messmethoden sowie der Beschreibung durch eine geeignete Farbmessmetrik. (A. Höpe, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

Internationaler Messvergleich zur hochgenauen Ab-initio-Brechzahl-Messung begonnen

Unter Leitung der PTB wurde ein neuer Brechzahl-Messvergleich gestartet, der nicht wie sonst üblich von bereits gefertigten prismatischen Proben, sondern von den ursprünglichen Glasblanks ausgeht. Dadurch wird auch der Einfluss der Prismenherstellung mit erfasst. Teilnehmer sind Firmen und Institute, die die Brechzahl von Gläsern mit sehr geringer Unsicherheit messen können. (A. Fricke, FB 4.2, andreas.fricke@ptb.de)

In-Situ-Lebensdauermessungen an OLEDs

In der Abteilung Optik wurde ein Alterungsmessplatz zur Identifizierung lebensdauerbeeinflussender Kriterien von OLEDs aufgebaut. Hier werden ständig optische und elektrische

Größen von 60 OLEDs während des Betriebs gemessen. Die Ergebnisse werden in dem von der PTB geleiteten technischen Komitee TC2-68 bei der CIE zur Entwicklung einer internationalen Norm zur Bestimmung der Lebensdauer von OLEDs verwendet. (T. Gerloff, FB 4.1, thorsten.gerloff@ptb.de)

Goniophotometrischer Nahfeld-Fernfeld-Vergleich für LEDs

Ein LED-Messplatz für die photometrische und colorimetrische Charakterisierung von LEDs im Fernfeld wurde zur Messung der Leuchtdichteverteilung im Nahfeld erweitert. Aus den Messergebnissen werden Strahlendaten generiert, die beim optischen Design moderner Lichtquellen verwendet werden können, um von den Nahfeldmessungen auf das Fernfeld zu schließen. Bei dem gemessenen Lichtstrom und der Lichtstärkeverteilung einer Hochleistungs-LED, sowohl im Fern- als auch im Nahfeld gemessen, zeigt der Vergleich beider Messungen eine mittlere Abweichung von unter 3,0 % und damit die Tragfähigkeit des Konzepts. (M. A. López Ordoñez, FB 4.1, marco.lopez@ptb.de)

Weltweit erstes OLED-Transfornormal entwickelt

In der PTB wurde das weltweit erste photometrische Transfornormal auf Basis organischer Leuchtdioden (OLED) entwickelt. Es kann jetzt von der Industrie für die Justierung von Messsystemen zur Bestimmung wichtiger photometrischer Größen dieser neuartigen Lichtquellen eingesetzt werden. (T. Gerloff, FB 4.1, thorsten.gerloff@ptb.de)

Erste Messungen mit dem neuen Ebenheitsreferenzsystem

Der neue Ebenheitsstandard wurde konzipiert, um optische Oberflächen mit Durchmessern bis zu 1 m sowohl liegend als auch stehend zu messen. Die grundlegenden Justierungen wurden durchgeführt und erste Ebenheitsmessungen zeigen die Leistungsfähigkeit des Systems. (G. Ehret, FB 4.2, M. Stavridis, FB 8.4, gerd.ehret@ptb.de)

Start zweier neuer EMRP-Projekte zur Förderung der europäischen optischen Industrie

Die beiden Forschungsprojekte „Form Metrology“ und „Scatterometry“ wurden im Rahmen des European Metrology Research Programme (EMRP) zur Förderung ausgewählt. Beide Projekte werden von der PTB koordiniert und

zusammen mit europäischen Partnern durchgeführt. Es werden drängende metrologische Herausforderungen bei der Messung der Form optischer Oberflächen, z. B. von Asphären, sowie bei der optischen Messung kleinster Strukturen auf Oberflächen bearbeitet. Nähere Informationen zu beiden Projekten: <http://www.ptb.de/emrp/ind10.html> (Form Metrology, Koordinator: M. Schulz, FB 4.2, michael.schulz@ptb.de) beziehungsweise <http://www.ptb.de/emrp/ind17.html> (Scatterometry, Koordinator: B. Bodermann, FB 4.2, bernd.bodermann@ptb.de).

Virtuelle Experimente zur Vermessung von Synchrotronspiegeln

In Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (BESSY II) wurden neuartige interferometrische Messverfahren zur Topografiebestimmung von Synchrotronspiegeln mithilfe von virtuellen Experimenten simuliert. Für einen Synchrotron-Fokussierspiegel mit einer Topografievariation von 5 mm konnte eine Rekonstruktionsgenauigkeit von 100 nm (rms) ermittelt werden. Die virtuellen Experimente liefern wertvolle Informationen zur Konzipierung von neuen Messverfahren. (A. Wiegmann, FB 4.2, M. Stavridis, FB 8.4, axel.wiegmann@ptb.de)

Goniochromatische Farben in drei Dimensionen

Mit dem neuentwickelten Gonioreflektometer für Appearance der PTB sind erste Messungen zur vollständigen Charakterisierung von sogenannten goniochromatischen (winkelabhängigen) Farben durchgeführt worden. Mit dem Messplatz können für beliebige Ein- und Ausfallwinkel auf einer Probe komplette Reflexionsspektren im sichtbaren Spektralbereich aufgenommen werden und daraus Farbkoordinaten in beliebigen Farbraumsystemen berechnet werden. Eine absolute Messung in 190 Winkelkombinationen, gleichmäßig verteilt über den Viertelraum, dauert hierbei nur noch ca. 4 Stunden. Die so erhaltenen Daten bilden die Basis für Verbesserungen in der Messtechnik für Anwender und Hersteller. (A. Höpe, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Wie schnell fliegen Neutrinos?

Für die hochgenaue Messung der Flugzeit von Neutrinos zwischen ihrer Quelle am CERN, Genf, und dem Detektor OPERA im Gran

Sasso Untergrundlaboratorium, Italien, muss die Zeitdifferenz zwischen den zwei Zeitreferenzpunkten an beiden Orten auf wenige Nanosekunden genau bekannt sein. Die PTB kalibrierte die Signallaufzeiten der hierfür verwendeten GPS-Empfänger. (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

Die primäre Uhr CS2 der PTB tickt weiter

Nach 25 Jahren Betrieb war in der primären Atomstrahluhr CS2 der Caesiumvorrat aufgebraucht. 10 Gramm Caesium ermöglichen nun den Betrieb für weitere 20 Jahre. Nun dient CS2 wieder als eine der Referenzuhren für die Realisierung der Atomzeitskala UTC(PTB) und damit auch der gesetzlichen Zeit. (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

Zeitaussendung mit DCF77 bis 2021 gesichert

Der Langwellensender DCF77 ist weiterhin das wichtigste Medium zur Verbreitung der gesetzlichen Zeit, zu der die PTB nach dem Einheiten- und Zeitgesetz verpflichtet ist. Nach Verhandlungen mit dem Betreiber des Senders, der Media Broadcast GmbH, wird die bestehende vertragliche Vereinbarung bis in das Jahr 2021 fortgesetzt. (D. Piester, FB 4.4, dirk.piester@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Bilateraler Vergleich der Skale der spektralen Empfindlichkeit für Laserleistungsempfänger mit dem VNIIOFI (Russland)

Mit dem VNIIOFI (Russland) wurde ein bilateraler Vergleich (COOMET.PR-S4) der Skale der spektralen Empfindlichkeit von Laserleistungsempfängern durchgeführt. Hierzu wurden zwei Transferdetektoren bei den Wellenlängen 530,9 nm bzw. 532 nm, 1064 nm und 10,6 μm bei jeweils einer Strahlungsleistung von ca. 1 W verglichen. Die Ergebnisse des Vergleichs zeigen eine Abweichung der Skalen von deutlich unter einem Prozent. Die Ergebnisse dieses Vergleichs werden demnächst publiziert. (S. Kück, F. Brandt, FB 4.5, stefan.kueck@ptb.de)

Internationaler Single Photon Workshop

Vom 27.–30. Juni 2011 fand der 5. Single Photon Workshop mit ca. 100 Teilnehmern aus 12 Ländern in Braunschweig statt. Dieser alle zwei Jahre stattfindende Workshop hat das Ziel, die wissenschaftliche Gemeinschaft auf dem Gebiet der Einzelphotonenmetrologie, der Einzel-

photonentechnologie und ihrer Anwendungen zusammenzubringen. Dazu gehören insbesondere aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der Einzelphotonenquellen und -detektoren sowie die dazugehörige Messtechnik. In einer eigenen Sitzung wurden die Entwicklungen auf dem Gebiet der Photonen-basierten Standards vorgestellt, insbesondere auch die Ergebnisse des ERA-NET-Plus-Projektes „Candela: towards quantum-based photon standards“ (7. Europäisches Rahmenprogramm, Nr. 217257, www.quantumcandela.org). (S. Kück, FB 4.5, stefan.kueck@ptb.de)

Skalenvergleiche des spektralen Strahl-dichtefaktors in gonioreflektometrischen Geometrien mit dem NIST und mit dem NRC

Mit den beiden nordamerikanischen nationalen Metrologieinstituten NIST (USA) und NRC (Kanada) wurden jeweils zwei bilaterale Vergleiche der Skalen des spektralen Strahl-dichtefaktors in gonioreflektometrischen Geometrien, sogenannten gerichtet/gerichteten Geometrien, durchgeführt. Die Vergleiche beinhalteten Messungen an sehr unterschiedlichen Reflexionsmaterialien, wie z. B. matten Keramiken, gesintertem PTFE, poliertem Opalglas, gespachteltem Bariumsulfat-Pulver und sandgestrahltem Aluminium. Es erfolgten sowohl Messungen in den Standardgeometrien 45 : 0 und 0 : 45, als auch Messungen der Reflexionsindikator in einem Winkelbereich von $\pm 85^\circ$ zur Probennormalen. Die Ergebnisse der Vergleiche zeigen eine gute Übereinstimmung der jeweiligen Apparaturen mit kombinierten Messunsicherheiten im Bereich einiger Promille. (A. Höpe, K.-O. Hauer, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

Fertigungsmesstechnik



Berichte der Abteilungen

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 auch verbesserte messtechnische Dienstleistungen im Bereich der Kalibrierung von Normalen, der Validierung von messtechnischen Verfahren sowie der Prüfung von speziellen Auswertalgorithmen angeboten und durchgeführt. Dabei wird bei Anfragen das Subsidiaritätsprinzip konsequent beachtet, d. h. falls eine angefragte messtechnische Dienstleistung durch akkreditierte Konformitätsbewertungsstellen in vergleichbarer Weise erbracht werden kann, wird dorthin weiterverwiesen. Die Baumuster- und Entwurfsprüfungen für Längenmess-Maschinen und -Geräte nach der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) sowie die Prüfung und innerstaatliche Zulassung zur Eichung von dimensionellen Messgeräten runden das Aufgabenspektrum der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* ab. Darüber hinaus sind Mitarbeiter der Abteilung als Fach- und Systemexperten im Rahmen der Begutachtung von Kalibrierlaboratorien für dimensionelle Messgrößen für die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkKS) im Einsatz. Die Mitwirkung bei peer reviews von anderen Metrologieinstituten ergänzt die fachlichen Gutachtertätigkeiten.

Die Bearbeitung der fachlichen Aufgaben in der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* erfolgt in den Fachbereichen *Oberflächenmesstechnik*, *Dimensionelle Nanometrologie*, *Koordinatenmesstechnik* sowie *Interferometrie an Maßverkörperungen*. Darüber hinaus unterstützt der Fachbereich *Wissenschaftlicher Gerätebau* der Abteilung

Titelbild:

Die Abbildung zeigt die neue Referenzwand der PTB zur Prüfung mobiler 3D-Messsysteme im Brückenraum des ehemaligen Forschungsreaktors. Die Referenzwand wird durch temperaturstabile Stäbe aus Kohlefaser-Verbundmaterial gebildet, die mittels Koppelstellen an der Wand des Brückenraums montiert sind an denen zusätzlich Retroreflektoren montiert werden können.

die gesamte PTB mit qualitativ hochwertigen Dienstleistungen im Bereich der Konstruktion, Fertigung und Montage von Prototyp-Messeinrichtungen sowie von speziell gefertigten Normalen.

Im Bericht der Abteilung für das Jahr 2010 wurde ein Schwerpunkt auf die Darstellung der Ergebnisse verschiedener Forschungsprojekte mit Beteiligung von Arbeitsgruppen aus der Abteilung gelegt. Hierzu zählten Beiträge zu einem satellitengestützten Grundlagenexperiment zum Test der Äquivalenz von träger und schwerer Masse sowie zu vier verschiedenen europäischen Verbund-Forschungsprojekten im Rahmen des iMERA-plus-Programms, darunter zwei Projekte zu Themen der Nanometrologie. Der Schwerpunkt dieses Berichts liegt auf der Darstellung neuerer Entwicklungen und Ergebnisse im Bereich der Rückführung von Längenmessungen über größere Distanzen bis hin zu ca. 1 km sowie der messtechnischen Erfassung und Bewertung funktionsrelevanter Geometrieparameter an großen Strukturen und Komponenten mit Abmessungen von bis zu ca. 10 m. Die Nachrichten aus der Abteilung in diesem Jahresbericht sowie deren Langfassung im Internet ergänzen die nachfolgende Darstellung der Arbeitsergebnisse der Abteilung.

Messung großer Strukturen und Komponenten

Als ein Beispiel für die Herangehensweise bei der messtechnischen Rückführung von funktionsrelevanten Geometrieparametern an größeren Bauteilen und Strukturen mit Abmessungen von 1 m bis zu ca. 10 m ist im Folgenden die Entwicklung eines Großverzahnungsnormalen beschrieben. Große Verzahnungen sind zu einem unverzichtbaren Bestandteil des modernen Maschinenbaus geworden. Neben der Windenergieerzeugung sind es Industriezweige wie der Schiffsbau und die Erdölfördertechnik, in denen große Getriebe zum Einsatz kommen. Der Wirkungsgrad, die Geräuschemission und die Betriebsdauer hängen entscheidend von der Qualität der eingesetzten Zahnräder ab. In den höchsten Genauigkeitsklassen sind beispielsweise für ein 1-m-Zahnrad Maß- und Form-Toleranzen unter 10 µm gefordert. Innerhalb eines EU-Forschungsprojektes hat die PTB ein Großverzahnungsnormal und eine hochgenaue Messeinrichtung (M3D3) zur Durchführung von Kalibrierungen

großer Bauteile zur Anwendung direkt in der Industrie entwickelt.

Die besondere Ausführungsform des Großverzahnungsnormals als Segment macht es möglich, dass das Normal ein ganzes Zahnrad von einem Meter Durchmesser verkörpert, aber zunächst noch auf den etablierten Messeinrichtungen innerhalb der PTB kalibriert werden kann. Unterschiedliche Steigungen (0° , 10° , 20°) und Steigungsrichtungen (gerade, links, rechts) machen das Normal universell einsetzbar. Alle relevanten Messgrößen wurden auf einem Koordinatenmessgerät im Mehrlagenverfahren kalibriert. Die Ergebnisse liegen innerhalb der abgeschätzten Messunsicherheiten von unter $5\ \mu\text{m}$.

Das Großverzahnungsnormal kann für Ringvergleiche eingesetzt werden. Aktuell ist ein industrieller Ringvergleich für 2012 in Vorbereitung, an dem sowohl Messgerätehersteller als auch Getriebehersteller teilnehmen werden. Darüber hinaus wurde mit dem Großverzahnungsnormal die Basis für zukünftige Akkreditierungen im Bereich großer Zahnräder über die DAkkS geschaffen.

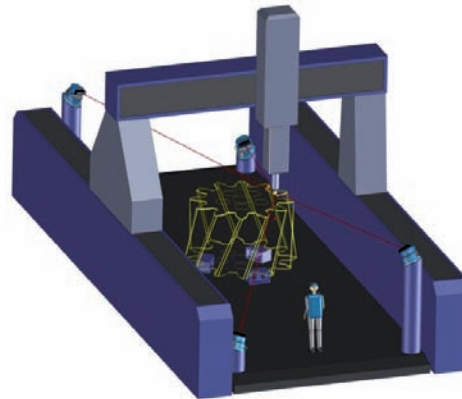
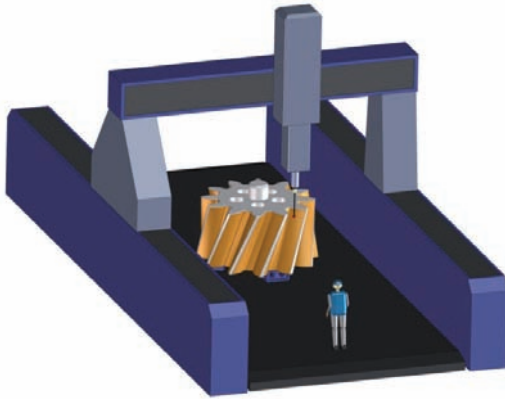


Bild 1: Nur ein Segment – und doch repräsentiert das neue Normal drei unterschiedliche, komplette Zahnräder von je einem Meter Durchmesser.

Anwendung von LaserTracern zur Messung großer Strukturen (M3D3)

Noch größere Strukturen und Komponenten als das zuvor vorgestellte Verzahnungsnormal können aufgrund ihrer Abmessungen als auch ihrer Masse nicht mehr auf den in der PTB betriebenen Referenz-Koordinatenmessgeräten kalibriert werden. Um die messtechnische Rückführung von Messergebnissen an funktionsrelevanten Geometrieparametern auch an sehr großen Strukturen mit den hierfür geforderten Messunsicherheiten sicherzustellen, wurde ein Messverfahren entwickelt, welches auf der Anwendung von mehreren selbstnachführenden Laserinterferometern zur 3D-Koordinatenmessung basiert. Mit einem selbstnachführenden Laserinterferometer (LaserTracer) lassen sich die Distanzen von einer im Drehzentrum des LaserTracers angeordneten Referenzkugel zu einem sich im Raum beliebig bewegenden optischen Retro-Reflektor sehr genau bestimmen. Durch die Anordnung von minimal 4 LaserTracern im Raum, die die verschiedenen Abstände zu dem Reflektor bestimmen, lässt sich dessen 3D-Position absolut und Abbe-konform mit hoher Genauigkeit bestimmen. Wenn der Retro-Reflektor mit einem 3D-Antastsystem kombiniert wird, lassen sich die 3D-Koordinaten der angetasteten Oberflächen auch an sehr großen Messobjekten bestimmen. Man benötigt hierfür nur noch ein Zustellsystem (Mover), um das Tastsystem an die interessierenden Positionen an der Messobjekt-Oberfläche sukzessive heranzuführen. Da die Koordinatenmessung durch das mobile System von LaserTracern realisiert wird, sind die Genauigkeitsanforderungen an das Zustellsystem gering. Das mobile 3D-Messverfahren auf Basis der LaserTracer wird kurz als M3D3 bezeichnet und drückt damit aus, dass es ein mobiles System zur 3D-Koordinatenbestimmung darstellt. Abbildung 2 zeigt das Prinzip zur Messung eines großen Zahnrades mit dem M3D3-Verfahren.

Bei dem in Abbildung 2 illustrierten 2-stufigen Verfahren wird zunächst die Oberfläche des Messobjektes auf konventionelle Weise an den interessierenden Positionen abgetastet. In diesem ersten Schritt werden die 3D-Koordinaten auf Basis des – ungenaueren – Zustellsystems bestimmt. Danach wird das Messobjekt aus dem Zustellsystem entfernt und der gleiche Messablauf ein zweites Mal durchgeführt. In diesem zweiten Schritt können nun die Laser-



Tracer die Bewegung des am Antastsystem befindlichen Retroreflektors verfolgen und somit die 3D-Koordinaten an den – virtuellen – Antastpunkten hochgenau bestimmen. Auf diese Weise ist eine Korrektur der Ergebnisse der Messung aus dem ersten Schritt möglich.

Bild 2: Prinzipdarstellung der Kalibrierung eines Großzahnrades mit dem M3D3-Verfahren. links: Messung des Werkstücks mit einem Koordinatenmessgerät und Abspeicherung der Messpunkte, rechts: Anfahren der Antastpositionen ohne Werkstück, Messung mit M3D3-Verfahren und Korrektur der Messpunkte.

Abbildung 3 zeigt die praktische Anwendung des beschriebenen Verfahrens für die Kalibrierung des in der PTB entwickelten Großverzahnungsnormals. Die hierbei für die Bestimmung der Geometrieparameter des Zahnradnormals mit dem M3D3-Verfahren ermittelten Messunsicherheiten liegen, je nach Messgröße zwischen $1\ \mu\text{m}$ und $2\ \mu\text{m}$. Die Abweichungen zu den zuvor ermittelten Referenzwerten am Großverzahnungsnormal liegen innerhalb von $\pm 2\ \mu\text{m}$ und dokumentieren somit das hohe Potenzial des M3D3-Verfahrens für die messtechnische Rückführung von geometrischen Parametern an sehr großen Strukturen. Da das Messsystem mobil ist, kann es auch direkt in der Industrie angewandt werden. Der Aufbau

eines akkreditierten Messlabors zur Anwendung des M3D3-Verfahrens ist bereits in Vorbereitung.

Um die Genauigkeit von interferometrischen Messsystemen, wie u. a. der LaserTracer, in fertigungsnaher Umgebung mit den dort vorliegenden größeren Schwankungen von Temperatur, Feuchte und Luftdruck zu verbessern, werden in der Abteilung zudem Arbeiten zur brechzahlkompensierenden Mehrwellenlängen-Interferometrie mit dem Ziel durchgeführt, diese robusteren Interferometrieverfahren in industriell eingesetzte laserinterferometrische Messsysteme zu integrieren.

Bild 3: Darstellung der Messung des Großverzahnungsnormals mit dem mobilen M3D3-Verfahren unter Laborbedingungen. links: Messung des Großverzahnungsnormals mit dem Koordinatenmessgerät und Abspeicherung der Messpunkte, rechts: Anfahren der Antastpositionen ohne Großverzahnungsnormals, Messung mit M3D3-Verfahren und Korrektur der Messpunkte.

Normgerechte Prüfung von mobilen 3D-Messsystemen mit der neuen Referenzwand der PTB

Neben den zuvor beschriebenen selbstnachführenden LaserTracern, die eine hochgenaue Distanzmessung im dreidimensionalen Raum durchführen, gibt es mit den sogenannten La-

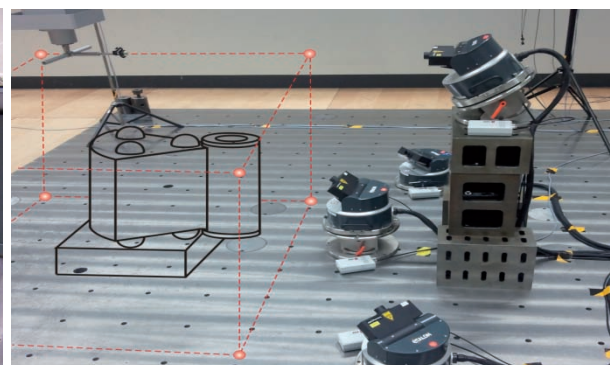
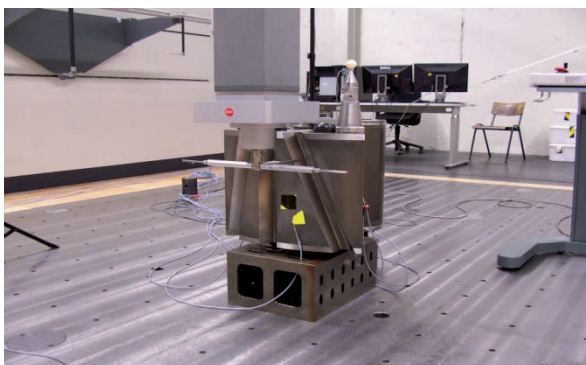


Bild 4: Foto der neuen Referenzwand zur Prüfung mobiler 3D-Messsysteme im Brückenraum.



sertrackern eine Klasse von selbstnachführenden Messgeräten, mit denen die Bestimmung von Absolut-Koordinaten im dreidimensionalen Raum möglich ist. Hierbei wird die Position des Retro-Reflektors im Raum durch Kombination der laserbasierten Distanzmessung (Abstand Lasertracker–Retro-Reflektor) mit zwei Winkelmessungen (Azimut- und Elevationswinkel des Messkopfes bei Nachführung des Laserstrahls) bestimmt.

Lasertracker werden in der Qualitätssicherung bei der Produktion von großen Strukturen, wie z. B. in der Luft- und Raumfahrtindustrie, im Schiffsbau, in der Energiewirtschaft, aber auch im Bauwesen eingesetzt. Ein weiterer Anwendungsbereich der mobilen 3D-Messtechnik ist bei Forschungseinrichtungen zu sehen, z. B. bei der Bestimmung der Position und Lage von strahlführenden Komponenten in Elektronenspeicherringen oder Freielektronen Lasern.

Zur richtlinienkonformen Prüfung von mobilen 3D-Messgeräten, wie z. B. Lasertrackern, wurde in der PTB eine sogenannte „Referenzwand“ in Betrieb genommen. Diese besteht aus einer Anordnung von temperaturstabilen Stäben aus Kohlefaser-Verbundmaterial, die über Koppellelemente an der Wand des Brückengebäudes im ehemaligen Forschungs- und Versuchsreaktor der PTB angebracht ist. In die Koppellelemente sind zudem magnetische Halterungen für die Aufnahme von Retroreflektoren zur Prüfung optischer 3D-Messsysteme integriert. Die 12 m lange Referenzwand in Kombination mit dem zur Verfügung stehenden großen Messraum, in den die zu prüfenden Messgeräte im 1 m-Raster an unterschiedlichen

Positionen aufgestellt werden können, ermöglicht erstmals die richtlinienkonforme Prüfung von mobilen 3D-Koordinatensystemen in diesem großen Messbereich. Viele der Fehlerkomponenten von Lasertrackern konnten zuvor nur in eingeschränkten Messbereichen bestimmt werden. Die neue Einrichtung wurde von der PTB kalibriert und bereits im Rahmen eines Verbund-Projektes von verschiedenen Geräteherstellern zur Charakterisierung ihrer Messsysteme genutzt. Abbildung 4 zeigt ein Foto der neuen Referenzwand im Brückenraum.

Die erweiterte geodätische Messstrecke der PTB (600-m-Referenz-Messstrecke)

Für Untersuchungen an sowie vergleichende Messungen von geodätischen Längenmesssystemen betreibt die PTB eine Pfeilerstrecke von 600 m Länge, die am Nordrand des PTB-Geländes gelegen ist. Diese Pfeilerstrecke besteht aus insgesamt 8 in einer Flucht angeordneten Pfeilern, auf denen Reflektoren definiert gelagert und als Ziele der zu untersuchenden Längenmessgeräte verwendet werden können.

Um die Pfeilerstrecke zu einer Referenz-Messstrecke weiterzuentwickeln, wurde ein Netzwerk von Sensoren zur genauen Erfassung der Luftparameter Temperatur, Druck und Feuchte entlang der 600-m-Strecke realisiert. Die genannten Luftparameter haben einen starken Einfluss auf die Ergebnisse laserbasierter Längenmessverfahren. So führt z. B. eine Abweichung der Lufttemperatur von 1 °C vom angenommenen Wert bereits zu einer relativen Längenmess-Abweichung von ca. 10^{-6} . Es ist

deshalb wichtig, die zeitlichen und örtlichen Änderungen dieser Parameter entlang der Strecke mit hoher Auflösung erfassen und für die Korrektur der Messwerte von zu prüfenden Längenmessgeräten verwenden zu können. Deshalb wird die effektive Temperatur entlang der kompletten Strecke durch 60 äquidistant verteilte Pt100-Temperatursensoren erfasst, die effektive Feuchte durch 6 kalibrierte Feuchtesensoren und der Luftdruck durch mindestens zwei kalibrierte Barometer. Die Daten werden über ein Glasfasernetz simultan ausgelesen und zentral erfasst.

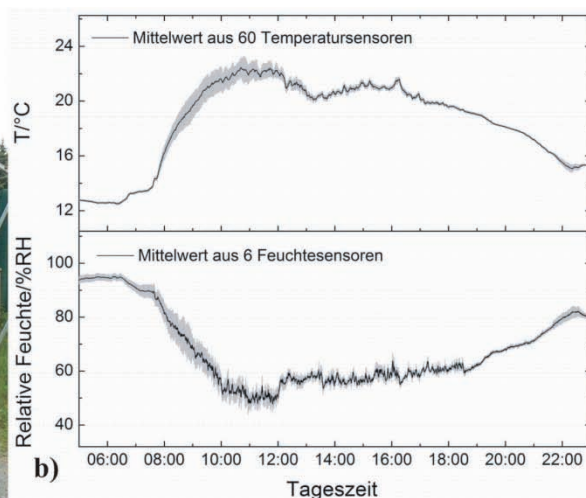
Abbildung 5 zeigt die erweiterte Pfeilermessstrecke sowie exemplarische Ergebnisse der Temperatur- und Feuchtemessungen über den Verlauf eines Tages.

Kalibrierungen von geodätischen Entfernungsmessgeräten können nun auf dieser Strecke mit relativen Messunsicherheiten unter 10^{-6} durchgeführt werden. Diese Arbeiten erfolgen oftmals in Kooperation mit dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der TU Braunschweig. Darüber hinaus wurde die

Strecke mit einem klimatisierten Außenlabor ausgestattet, welches den zuverlässigen Betrieb sensibler Elektronik und Lichtquellen gestattet. Ferner erlauben die installierten Sicherungsmaßnahmen die Freiluftprobung von modernen Entfernungsmesssystemen im Entwicklungsstadium. So können Laser bis zur maximalen Schutzklasse 4, z. B. Femtosekundenlaser-basierte Entfernungsmesser, auf der Strecke betrieben werden. Dies sind beste Voraussetzungen für die Entwicklung und Kalibrierung von Entfernungsmessern der nächsten Generation.

Auf die erweiterten Möglichkeiten der PTB bei der messtechnischen Rückführung von funktionsrelevanten Geometrieparametern an größeren Strukturen und Komponenten sowie in der geodätischen Längenmessung wurde bereits durch Publikationen, Messeauftritte sowie Vorträge bei Fachkonferenzen aufmerksam gemacht. Darüber hinaus wird das Know-how der PTB in diesen Fachgebieten durch Mitarbeit in den entsprechenden Normungs- und Richtliniengremien sowie den zugeordneten Fachverbänden eingebracht.

Bild 5: Ausgebaute 600 m Pfeilerstrecke der PTB. a) Sicht auf die Messstrecke. Im Hintergrund ist das Außenlabor zu sehen. Der mit undurchsichtiger grüner Folie behangene Zaun dient dem Laserschutz. b) Exemplarischer Verlauf der effektiven Temperatur und der effektiven relativen Feuchte über die gesamten 600 m während eines Tages. Die grauen Bänder geben die Standardabweichungen der einzelnen Sensoren vom Mittelwert an.



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

Neue lichtinduzierte Anziehungskraft zwischen zwei parallelen Metallplatten

Im Rahmen der Untersuchung kleiner Kräfte und dem Aufbau der Nanokraftnormalmesseinrichtung wurde ein Modell über Lichtkräfte zwischen zwei dicht benachbarten (Subwellenlängenabstand) metallischen Platten aufgestellt. Auf der Basis dieses Modells konnte eine neue lichtinduzierte Anziehungskraft hergeleitet werden. (V. Nesterov, FB 5.1, vladimir.nesterov@ptb.de)

Atomic force microscope cantilevers as encoders for real-time displacement measurements

The high resolution of AFM cantilever has been used in combination with a 1-D grating of known pitch to determine the displacement of a moving stage with high-resolution for forward and backward movements. (X. Chen, L. Koenders, FB 5.1, ludger.koenders@ptb.de)

Erweiterte Selbstkalibrierung von Winkelencodern durch Bestimmung des Gitterversatzes

Das in der PTB entwickelte Selbstkalibrierverfahren erlaubt eine schnelle und hochgenaue In-situ-Kalibrierung des Winkelprimärnormals mittels Analyse der Messwerte der Abtastköpfe im Fourierraum. Erstmals ist nun auch die Bestimmung und Berücksichtigung des Lateralversatzes des Radialgitters während dessen Rotation mit Unsicherheiten auf dem Niveau von nm bis sub-nm möglich. (R. Geckeler, FB 5.2, ralf.geckeler@ptb.de)

Ausbau der 600-m-Pfeilerstrecke zu einer Referenzstrecke für Kalibrierung und Entwicklung elektronischer Distanzmesser

Die 600-m-Pfeilerstrecke der PTB wurde im Jahr 2011 grundlegend überholt mit einem Netzwerk von Umweltsensoren für Temperatur, Feuchte und Druck versehen und auf die SI-Einheit der Länge rückgeführt. Nun können modernste elektronische Distanzmesser mit einer relativen Messunsicherheit von besser als 10^{-6} kalibriert werden, zudem ist der Einsatz von Lasern bis zur maximalen Schutzklasse 4 möglich.

(F. Pollinger, M. Wedde, T. Meyer, K. Meiners-Hagen, FB 5.4, florian.pollinger@ptb.de)

Erste absolute Längenmessungen bei tiefen Temperaturen

Für einige Anwendungen im Bereich der Industrie und der Forschung ist es wichtig, absolute Längen von Endmaß-ähnlichen, prismatischen Körpern bei z. B. sehr niedrigen Temperaturen genau zu kennen. In Bezug auf kryogene Temperaturen ist hierzu in der PTB ein neuartiges Konzept umgesetzt worden, welches auf der Erweiterung des PTB-Ultrapräzisionsinterferometers mit einem externen Vakuum-Messpfad und dessen Temperierung basiert. Hier wurden erste absolute Längenmessungen bei Temperaturen von ca. 80 K durchgeführt. (R. Schödel, FB 5.4, rene.schoedel@ptb.de)

Konstruktion und Fertigung einer Vakuumkammer.

Für die kurzzeitige Vorstabilisierung eines Lasers, der in einer optischen Uhr zum Einsatz kommt, ist eine Vakuumkammer erforderlich, die einen Resonator gegen äußere Einflüsse bestmöglich abschirmt, um die Schwingungen eines Lasers im Resonator messen zu können. Mit dieser optischen Uhr soll die Zeitmessung, im Vergleich zu den Atomuhren, noch präziser realisiert werden. (W. Kirst, FB 5.5, waldemar.kirst@ptb.de)

Konstruktion und Fertigung eines erweiterten Messpfades für das Ultrapräzisionsinterferometer

Das PTB-Ultrapräzisionsinterferometer sollte im Rahmen eines ESA-Projektes mit einem erweiterten Messpfad ausgestattet werden, um Messungen der absoluten Länge von Probekörpern in einem Temperaturbereich von Raumtemperatur bis hinunter zu 10 K zu ermöglichen. Dieser erweiterte Messpfad wurde im „Wissenschaftlichen Gerätebau“ der PTB konstruiert und gefertigt. (E. Luiken, FB 5.5, enno.luiken@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Traceable Profile Scanner with a Piezoresistive Cantilever

The profile scanner enables characterizing high-aspect-ratio surface features of micro components, which is a challenge for micro- and nanometrology. A slender silicon cantilever with an integrated piezoresistive strain gauge is applied for signal read-out. The contact force between cantilever tip and artifact can be down to 1 μN . Three laser interferometers with 1 nm resolution enable metrological traceability of the instrument. (M. Xu, FB 5.2, min.xu@ptb.de)

Maskenmessungen an Längenteilungen mit dem Nanometerkomparator

Mit dem Nanometerkomparator wurde für das AMTC Dresden eine qualitativ hochwertige Photomaske kalibriert. Dabei wurde eine Reproduzierbarkeit der Positionsmessungen an der verkörperten Längenteilung von 0,2 nm erreicht. (R. Köning, FB 5.2, rainer.koenig@ptb.de)

New developments in 3D-AFM with tapping and torsion AFM mode and vector approach probing strategy

A new 3D-AFM with tapping and torsion AFM mode and vector approach probing strategy for true 3D measurements of nanostructures has been developed. It offers capabilities in measuring critical dimension, sidewall angle and line edge/width roughness of nanostructures for semiconductor industry. (G. Dai, FB 5.2, gaoliang.dai@ptb.de)

Untersuchung eines hochpräzisen Miniatur-Nullpunktspannsystems für die Mikro-Fertigung

Ein Nullpunktspannsystem für die Mikro-Fertigung wurde mithilfe eines Mikro-Koordinatenmessgerätes auf seine Eigenschaften untersucht. Die Wechselgenauigkeit des untersuchten Spannsystems betrug dabei 1 μm , die Wiederholgenauigkeit lag sogar deutlich unter 0,1 μm . (M. Neugebauer, FB 5.3, michael.neugebauer@ptb.de)

Referenzwand zur Prüfung von Lasertrackern

In der PTB ist eine Referenzwand zur Prüfung von Lasertrackern eingerichtet worden, die es Anwendern weltweit erstmalig ermöglicht, die messtechnische

Leistungsfähigkeit ihrer Tracker unabhängig vom Hersteller nach standardisierten Verfahren (VDI/VDE 2617 Blatt 10) zu prüfen. (K. Rost, FB 5.3, kerstin.rost@ptb.de)

Koordinatenmessgerät höchster Genauigkeit

In der PTB konnte durch die Aufrüstung eines Koordinatenmessgerätes die Messgenauigkeit von 3D-Messungen um ca. 60 % gesteigert werden. Die Gerätespezifikation liegt nun bei $\text{MPEE} = 0,3 \mu\text{m} + L/1000$. Die deutlich verbesserte Scanningtechnologie ermöglicht zudem das ganzheitliche Erfassen von 2D- bis 3D-Oberflächen komplexer Bauteile. (J. Hirsch, FB 5.3, juergen.hirsch@ptb.de)

Industrieller Computertomograf einsatzbereit

Seit Ende 2010 steht in der PTB im Fachbereich Koordinatenmesstechnik ein industrieller Computertomograf (CT) mit maximalen Beschleunigungsspannungen von 225 kV zur Verfügung. In ersten Untersuchungen wurde ein Silizium-Testkörper gemessen. Die dabei erreichten Messabweichungen betragen nur wenige Mikrometer. (U. Neuschaefer-Rube, FB 5.3, ulrich.neuschaefer-rube@ptb.de)

Online-Softwarevalidierung via Internet

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes „Metrology for New Industrial Measurement Technologies“ (NIMTech), an dem vier weitere europäische Metrologieinstitute beteiligt waren, ist ein neues Verfahren entwickelt worden, um via Internet online die Genauigkeit von rechenintensiven Auswertearithmen im Bereich der Koordinatenmesstechnik zu validieren. (K. Wendt, FB 5.3, klaus.wendt@ptb.de)

Rückführbare hochgenaue Distanzmessungen über mehrere hundert Meter durchgeführt

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes „Absolute long distance measurement in air“ wurde in der PTB ein hochgenauer Entfernungsmesser entwickelt und auf mehreren Referenzstrecken mit Entwicklungen von europäischen Partnerinstituten sowie dem präzisesten etablierten Verfahren verglichen. Die Vergleiche zeigen, dass mit dem entwickelten System bei Messstrecken um 800 m Länge die Abweichungen zu Referenzsystemen unterhalb von $\pm 0,75 \text{ mm}$ liegen.



(K. Meiners-Hagen, R. Doloca, F. Pollinger, FB 5.4, karl.meiners-hagen@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Vorrichtung zur mechanischen Stimulation des Wachstums von Knorpelgewebe

Eine im Rahmen einer Kooperation der PTB mit der Charité in Berlin entwickelte Vorrichtung ermöglicht die mechanische Stimulation von Knorpelgewebe bei gleichzeitiger in-situ-Messung der Steifigkeit des Gewebes schon während des Kultivierungsprozesses. In ersten Tests konnte ein positiver Einfluss auf das Wachstum nachgewiesen werden. (S. Bütetfisch, FB 5.1, sebastian.buetefisch@ptb.de)

Herstellung von Messblenden mittels Heißprägen und Laserbearbeitung

Für die AG „Durchflusszytometrie und Mikroskopie“ werden Messblenden zur Zellzählung hergestellt. Der verarbeitungstechnisch anspruchsvolle Werkstoff Cyclo-Olefin-Copolymer (COC) sowie die besondere Geometrie schließen spanende Bearbeitungsverfahren weitestgehend aus. Eine geeignete Fertigungskette mit den Schritten Heißprägen und Laserbearbeitung ist entwickelt und erfolgreich erprobt worden. (R. Meeß, FB 5.5, rudolf.meess@ptb.de)

Konstruktion und Fertigung eines zylindrischen Wasserkalorimeters

Zur Bestimmung der Wasser-Energiedosis an klinischen Beschleunigern wurde ein neuartiges Wasserkalorimeter entwickelt, welches Messungen unter praxisnahen Bestrahlungsbedingungen, z. B. überlagerte Strahlungsfelder aus unterschiedlichen Winkeln, ermöglicht. In der Folge ermöglicht dies nun die direkte Kalibrierung klinischer Dosimeter unter „planspezifischen“ Bedingungen. (M. Müller, FB 5.5, michael.mueller@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Abteilung Fertigungsmesstechnik aktiv bei Organisation internationaler Fachkonferenzen

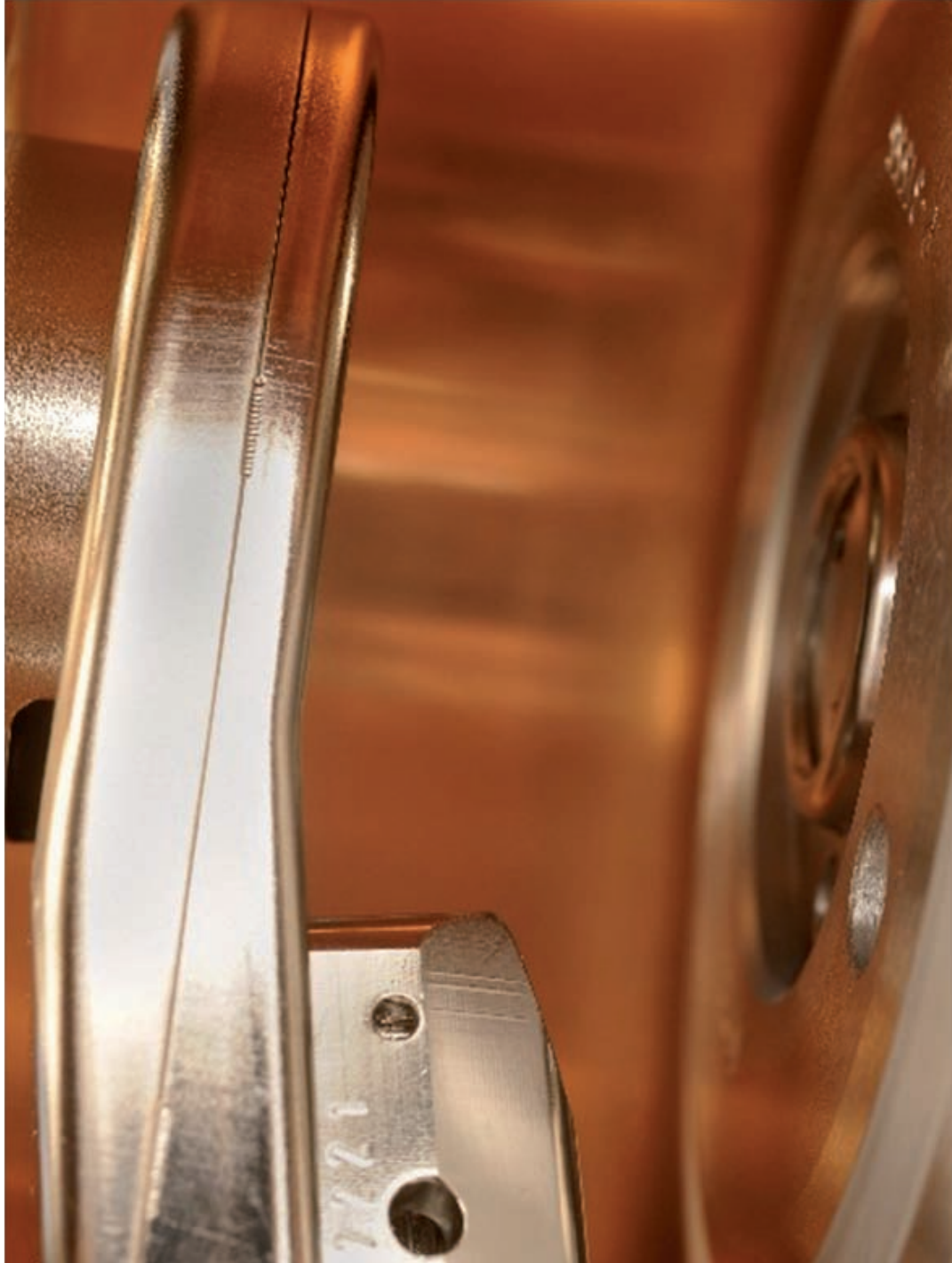
Mitarbeiter der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* engagieren sich bei der Organisation von sowie mit Fachbeiträgen zu den internationalen Konferenzen „Nanoscale 2010“, „Laser Metrology 2011“ sowie „Macroscale 2011“. (H. Bosse, Abt. 5, harald.bosse@ptb.de)

EURAMET-Projekt 1105 – Bilaterale Vergleichsmessungen an Normalen für Mikro-KMG

In den Jahren 2009 und 2010 führten das METAS und die PTB bilaterale Vergleichsmessungen an Normalen für Mikro-Koordinatengeräte durch. Dabei wurden eine spezielle Halbkugelplatte sowie eine Kugel und ein Ring mit je 1 mm Durchmesser gemessen. Die Messergebnisse stimmten sehr gut im Bereich der angegebenen Messunsicherheiten überein. (M. Neugebauer, FB 5.3, michael.neugebauer@ptb.de)



Ionisierende Strahlung



Berichte der Abteilungen

Tumorthherapie mit ionisierender Strahlung

Die modernen Formen der Tumorthherapie mit ionisierender Strahlung nutzen heute Strahlenfelder mit immer kleineren und irregulären Querschnitten, damit das Zielvolumen möglichst genau erfasst und das umliegende Gewebe weitgehend geschont werden kann. Im Rahmen von internationalen Projekten des Europäischen Metrologie-Forschungsprogramms EMRP wurden in der Abteilung dosimetrische Fragestellungen sowohl für die externe Strahlentherapie als auch für die Brachytherapie bearbeitet. Dabei wurden die Strahlenfelder der beiden medizinischen Elektronenbeschleuniger genutzt, um die Dosimetrie für die kleinen Strahlenfelder mit besonders starken Dosisgradienten zu entwickeln. Für die Brachytherapie wurden neue Rückführungsketten zu Primärnormalen für die von den Bestrahlungsquellen absorbierte Dosis entwickelt und das Verständnis der dreidimensionalen Dosisverteilungen in Patienten verbessert. Beide Projekte konnten im Berichtszeitraum erfolgreich abgeschlossen werden.

Erfolgreicher Einsatz des PTB-Wasserkalorimeters bei Ionenstrahlung

Die Strahlentherapie mit Ionenstrahlung (z. B. Protonen oder ^{12}C -Ionen) findet in jüngster Zeit zunehmende Anwendung. Dabei wird der Ionenstrahl mittels der sogenannten Raster-Scan-Methode sehr präzise über das gesamte Tumolvolumen gelenkt. Für Kohlenstoff-Ionen wurde diese Methode bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI, Darmstadt) entwickelt und wird jetzt unter anderem am HIT (Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum) in der Therapie eingesetzt. Für die Dosimetrie bei diesen Bestrahlungsbedingungen existiert bislang jedoch kein geeignetes Primärnormal für die Bestimmung der Wasser-Energiedosis DW. In ersten Experimenten wurde daher das transportable Wasserkalorimeter der PTB in einem 300-MeV/u-Kohlenstoff-Strahl bei der GSI eingesetzt, um die Eignung des kalorimetrischen Messverfahrens aufzuzeigen.

Titelbild:

Innenansicht einer speziellen Röntgenröhre zur Erzeugung von gepulster Röntgenstrahlung. Der Ausschnitt zeigt links die Kathode und rechts die rotierende Anode

Die Ergebnisse der vorliegenden Messungen erlauben die Bestimmung von DW mit einer relativen Standardmessunsicherheit von ca. 0,5 %. Hierbei wird jedoch die durch Modellrechnungen begründete Annahme gemacht, dass ein möglicher Einfluss der Radiolyse auf das Ergebnis der kalorimetrischen Bestimmung von DW auch bei Ionenstrahlung vernachlässigt werden kann. Weitere Experimente mit dem Wasserkalorimeter werden zukünftig auch im therapeutisch relevanten Bereich des verbreiterten Bragg-Peaks (SOBP) durchgeführt. Es ist zu erwarten, dass die kalorimetrische Bestimmung der Wasser-Energiedosis mit einer relativen Messunsicherheit von kleiner als 1% erfolgen kann. Dies verringert die heute übliche Messunsicherheit von ca. 3 % in der Referenzdosimetrie für die Strahlentherapie mit Ionenstrahlung deutlich.

Vergleich von Verfahren zur Ermittlung der Fluenz von Sekundärelektronen in Ionenspuren

In Zusammenarbeit mit dem Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS) werden verschiedene Verfahren zur Berechnung von Eigenschaften der Spurstruktur von Kohlenstoffionen mit Energien im Bereich des Bragg-Maximums untersucht. Dazu werden Spurstruktursimulationen mit dem in der PTB entwickelten Monte-Carlo-Programm PTra durchgeführt, deren Ergebnisse die Festlegung der Parameter von analytischen Modellen erlaubten, die am FIAS entwickelt werden. Erste Ergebnisse sind in Bild 2 dargestellt. Die aus den Simulationen bestimmte Abhängigkeit der Sekundärelektronenfluenz vom Abstand von der Trajektorie für Kohlenstoffionen lässt sich mit dem nur zwei Parameter enthaltenden analytischen Modell gut reproduzieren. Wenn sich für die anderen noch zu betrachtenden Eigenschaften der Spurstruktur eine ähnlich befriedigende Übereinstimmung ergeben sollte, dann eröffnet dies die Möglichkeit, in künftigen Anwendungen der Nanodosimetrie die sehr zeitaufwendigen Simulationsrechnungen durch die schnelle und einfache Berechnung der vom Modell gelieferten mathematischen Funktionen zu ersetzen.

Modernisierung und Charakterisierung des 50-MeV-Magnetspektrometers

An der hochenergetischen Sektion des Forschungsbeschleunigers für die Dosimetrie in



Bild 1: Transportables Wasserkalorimeter (rechts) mit zugehörigem Kühlaggregat (links). Die Strahlung trifft horizontal auf das Strahleintrittsfenster des Kalorimeters (rot umrandet). Die Kantenlänge des fast quaderförmigen Kalorimeters beträgt ca. 60 cm.

der Strahlentherapie ist ein Benchmark-Experiment in Vorbereitung, mit dem die Richtigkeit von Monte-Carlo-Simulationen beurteilt werden kann. Eine relevante Eingangsgröße für die Simulation ist die Energie der Elektronen. Diese wird experimentell mit geringer Messunsicherheit mit Hilfe eines Magnetspektrometers bestimmt. In der neu entwickelten Vakuumkammer des Spektrometers können am Eintritt und Austritt des Elektronstrahls Spalte eingefahren werden, mit denen die Elektronenbahn im Magnetfeld des Spektrometers genau festgelegt wird. Aus der Kenntnis von Elektronenbahn und magnetischer Flussdichte

kann dann auf die Elektronenenergie geschlossen werden.

Im Zuge der Charakterisierung des Spektrometers wurde die relative magnetische Flussdichte im Spektrometer im Bereich typischer Elektronentrajektorien erfasst, wobei besonders der Einfluss der Vakuumkammer (Material, Schweißnähte, magnetische Komponenten) untersucht wurde. Im homogenen Bereich des Magnetfeldes konnte die Flussdichte mit einer Unsicherheit von 0,41 % bestimmt werden. Das entspricht einer Unsicherheit der kinetischen Energie von 103 keV.

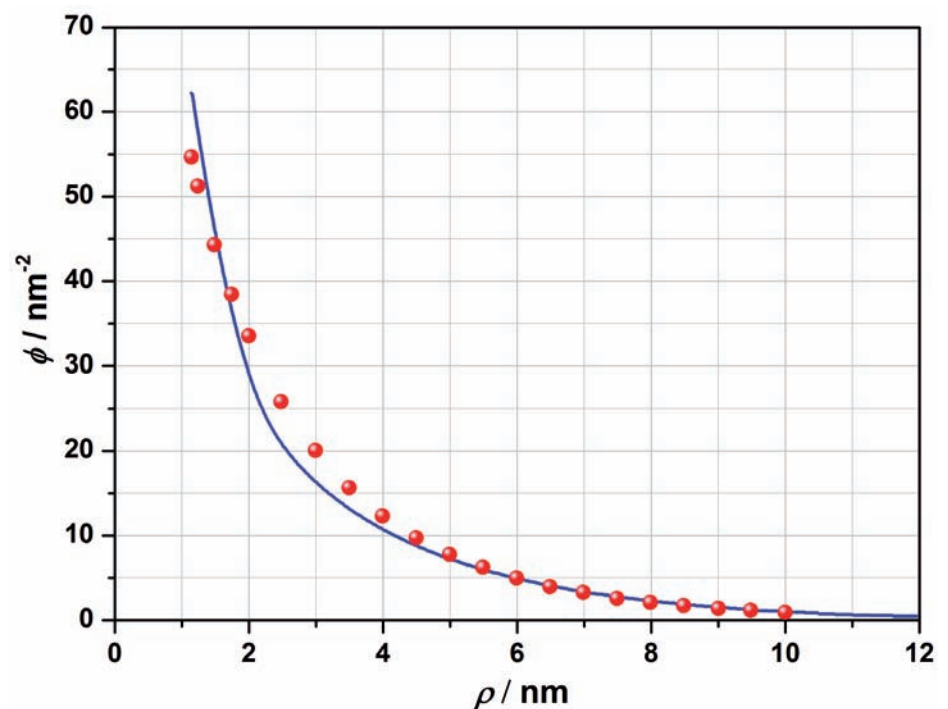


Bild 2: Radiale Verteilung der Fluenz von Sekundärelektronen in der Spur eines Kohlenstoff-Ions von 0,3 MeV/u kinetischer Energie (Linie: analytisches Modell, Punkte: Ergebnisse aus Spursturksimulationen).

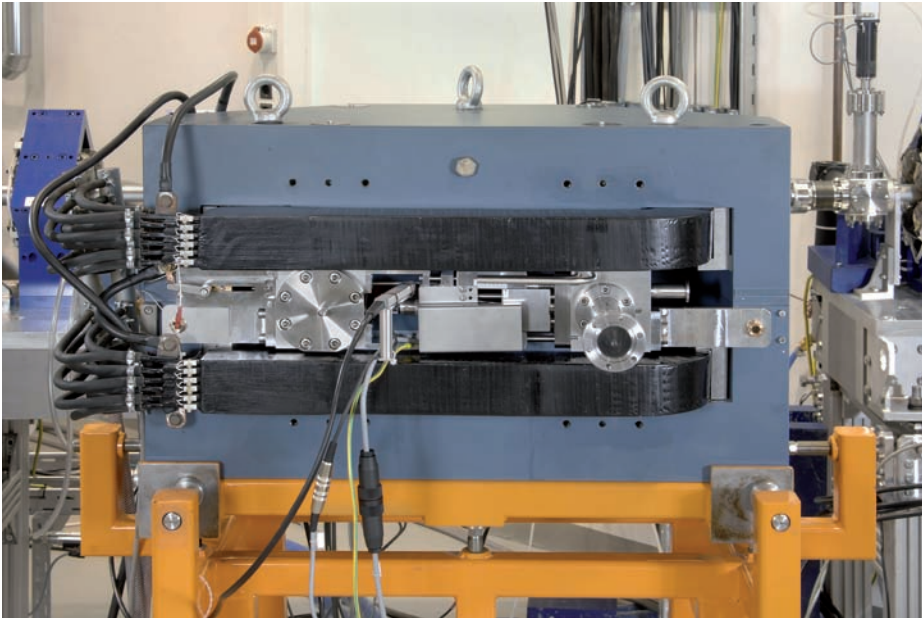


Bild 3: 50-MeV-Magnetspektrometer mit neuer Vakuumkammer.

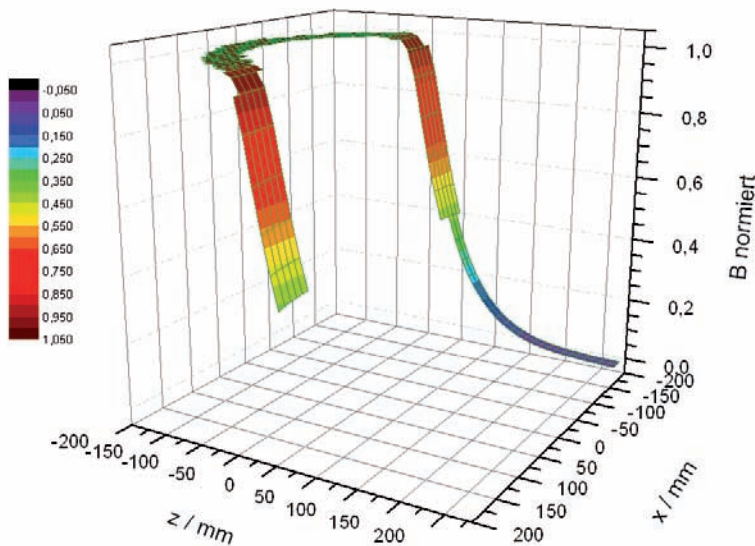


Bild 4: Relative magnetische Flussdichte im Spektrometer entlang einer Ebene parallel zu den Polen des Magneten.

Die Thoron-Aktivitätskonzentration: Wer misst, misst Mist?!

Die Messung der Aktivitätskonzentration von Radon-220 (Thoron) in Luft ist eine besondere Herausforderung, denn dieses radioaktive Edelgas hat eine Halbwertszeit von nur 55 s. Seit 2010 ist das für die Thoron-Aktivitätskonzentration entwickelte Primärnormal der PTB im Einsatz und nahezu kontinuierlich ausgebaut. Eine Vergleichsmessung an vier Geräten zeigt, dass die Kalibrierfaktoren Abweichungen vom Sollwert bis zu einem Faktor 4 aufweisen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs verdeutlichen den Bedarf an zuverlässigen Kalibrierungen, zumal die mit solchen Geräten ermittelten Daten ungeprüft Eingang in große europäische Studien (Radon-Mapping, epidemiologische Studien) finden.

Muss die Strahlendosis der Augen überwacht werden?

Das menschliche Auge reagiert empfindlich auf ionisierende Strahlung. Allerdings ist es der Dosismessung nicht zugänglich. Deshalb wurden umfangreiche Berechnungen durchgeführt, um die Dosis der Augenlinse in unterschiedlichen Strahlungsfeldern bestimmen zu können. Die Berechnungen sollen dazu beitragen, konkrete Anforderungen an Augendosimeter zu definieren, die dann in entsprechende Normen einfließen müssen. Damit wäre erstmalig die qualitätsgesicherte Überwachung der Dosis der Augenlinse, z.B. bei medizinischem Personal, möglich.



Die Internationale Strahlenschutzkommission (ICRP) hatte jüngst ihre Empfehlung für den Grenzwert der jährlichen Strahlendosis für Augenlinsen drastisch gesenkt: von 150 mSv auf 20 mSv pro Jahr. Dieser Schritt war nötig, weil sich Hinweise verstärkt haben, dass der bisherige Grenzwert nicht ausreicht, um einer Linsentrübung (Katarakt, d.h. grauer Star) aufgrund ionisierender Strahlung vorzubeugen. Bei dem alten Grenzwert von 150 mSv pro Jahr konnte davon ausgegangen werden, dass er nicht überschritten wird, wenn die Grenzwerte für die Gesamtperson und die Haut nicht überschritten sind – diese werden bei Personal, welches beruflich bedingt Strahlung ausgesetzt ist, seit Jahrzehnten routinemäßig mittels Messungen (mit sogenannten Ganzkörper- und Hautdosimetern) überwacht. Mit dem neuen Grenzwert von 20 mSv pro Jahr für die

Augenlinse gilt dies nicht mehr. Daher ist die deutsche Strahlenschutzkommission nun gefragt, Empfehlungen dazu auszusprechen, ob der bisher betriebene Strahlenschutz bei z. B. medizinischem Personal ausreicht, oder ob genauere Dosismessungen und zusätzliche Schutzmaßnahmen nötig sind. Eignungsuntersuchungen für unterschiedliche Dosimeterarten der PTB sollen bei diesen Entscheidungen helfen.

Dosimeter sind je nach Messzweck, für den sie konstruiert wurden, in drei Kategorien unterteilbar. Die unterschiedlichen Dosimeterarten eignen sich unterschiedlich gut zur Bestimmung der Strahlendosis im Auge:

Hautdosimeter liefern verlässliche Werte für die Augenlinsendosis nur dann, wenn sie bei reiner Röntgenstrahlung (z. B. in der Radiologie) und direkt in Augennähe eingesetzt werden und darüber hinaus ihre Rückseite durchlässig für Röntgenstrahlung ist. In der Nuklearmedizin kommt zum Teil Beta-Strahlung zum Einsatz. Hier könnten Hautdosimeter die tatsächliche Dosis um das Hundertfache und mehr überschätzen und sind dort folglich ungeeignet. Ein Beispiel eines Hautdosimeters ist in Bild 5.1 gezeigt.

Augendosimeter schätzen die Dosis in dem besonders strahlungsempfindlichen Teil der Augenlinse ab. Von dieser Dosimeterart existieren bisher jedoch nur sehr wenige Typen, da die Messgröße bisher nicht verwendet wurde. Von den existierenden Typen muss noch gezeigt werden, dass sie auch bei Betastrahlung geeignet sind. Ein Beispiel eines Augendosimeters ist in Bild 5.2 gezeigt.

Ganzkörperdosimeter schätzen gemäß ihrer Konstruktion die Gesamtkörperdosis der inneren Organe ab. Sie sind ungeeignet zur Bestimmung der Augenlinsendosis, da sie die Strahlendosis der Augenlinsen insbesondere bei niederenergetischer Röntgenstrahlung und bei Betastrahlung unterschätzen. Ein Beispiel eines Ganzkörperdosimeters ist in Bild 5.3 gezeigt.

Die weitere Arbeit der PTB zur Einbringung der Ergebnisse in die nationale und internationale Normung wird von dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie durch das Projekt „Innovation mit Normen und Standards – INS“ „Verbesserung der Überwachung der Dosis der Augenlinse“ gefördert.



Bild 5.1: Hautdosimeter



Bild 5.2: Augendosimeter



Bild 5.3: Ganzkörperdosimeter

Sollte die deutsche Gesetzgebung der Empfehlung der ICRP folgen und den Grenzwert für die Augenlinse entsprechend verringern, könnte dies bedeuten, dass zusätzlich zu den bisher getragenen Ganzkörper- und Hautdosimetern geeignete Dosimeter in unmittelbarer Nähe des Auges hinter einem entsprechenden Augenschutz getragen werden müssen. Um die Augen zu schützen, dürften dann Mitarbeiter, die ihre maximale Jahresdosis erreicht haben, für den Rest des Jahres nicht mehr in diesem Arbeitsbereich eingesetzt werden.

Messkampagne der Spurenmessstelle der PTB nach dem Kernkraftwerksunfall in Fukushima

Nach der großen Naturkatastrophe in Japan im März 2011 hat die Spurenmessstelle der PTB eine Messkampagne mit verkürzter Probenentnahme zur Bestimmung der Aktivitätskonzentrationen der in Fukushima freigesetzten Radionuklide in der Luft in Braunschweig durchgeführt. Die in Deutschland gemessenen Aktivitätskonzentrationen waren radiologisch unbedeutend. Die in Braunschweig und an den Spurenmessstellen des Deutschen Wetterdienstes (Potsdam und Offenbach) und des Bundesamtes für Strahlenschutz (Freiburg) ermittelten Messergebnisse waren jedoch für die Beurteilung von Messwerten in der Überwachung der menschlichen Nahrungskette oder zur korrekten Ermittlung der Ableitungen von Iod-131 aus Kernkraftwerken hilfreich.

In Bild 6 ist die Langzeitmessreihe der mittleren monatlichen Aktivitätskonzentration von Cs-137 im Vergleich mit der von Be-7 dargestellt. Diese seit Oktober 1963 bestehende

Messreihe erlaubt den unmittelbaren Vergleich der Einflüsse aus den atmosphärischen Kernwaffenversuchen des letzten Jahrhunderts mit denen der Unfälle von Tschernobyl 1986 und von Fukushima 2011. Die kurzzeitig beobachteten maximalen Messwerte nach Fukushima lagen um etwa einen Faktor 1000 unter den maximalen Messwerten nach Tschernobyl.

Umgebungsdosimetrie am Transportbehälterlager Gorleben

Das Transportbehälterlager (TBL) Gorleben ist ein Zwischenlager für abgebrannte Brennelementen und verglaste hochradioaktive Abfälle. Diese oberirdische Betonhalle ist das Ziel der Atommülltransporte aus La Hague, wo diese Abfälle deutscher Kernkraftwerke aufgearbeitet wurden. In der Betriebsgenehmigung des TBL ist für die zusätzliche Umgebungs-Äquivalentdosis am Zaun des Betriebsgeländes ein Grenzwert von 0,300 mSv pro Jahr vorgeschrieben. Im August 2011 wurde bekannt, dass aufgrund der Messwerte der amtlichen Dosismessstelle für das erste Halbjahr 2011 nicht ausgeschlossen werden konnte, dass zum Jahresende die in der Genehmigung ebenfalls festgeschriebene „Maßnahmschwelle“ von 0,270 mSv erreicht wird. Ab diesem Wert ist eine weitere Einlagerung von Behältern so lange zu unterbinden, bis nachgewiesen werden kann, dass der Grenzwert von 0,300 mSv auch durch weitere Einlagerung nicht überschritten wird.

Die PTB wurde daraufhin vom Niedersächsischen Ministerium für Umwelt und Klimaschutz (NMU) mit Dosismessungen am TBL beauftragt. Es sollten sehr kurzfristig belast-

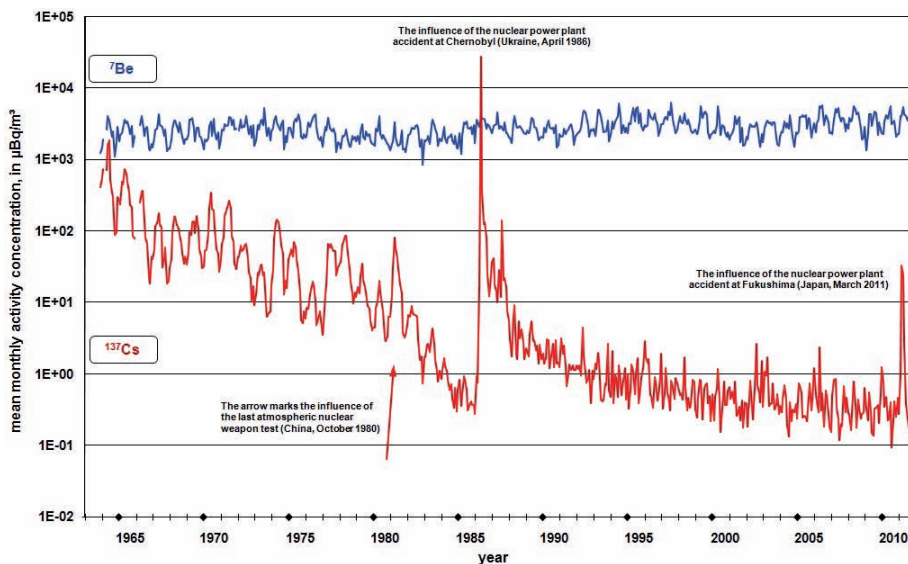


Bild 6: Die Radionuklide Be-7 und Cs-137 in der bodennahen Luft in Braunschweig seit 1963



Bild 7: Messaufbau am Betriebsgeländezaun des TBL. Auf der linken Seite sieht man die amtliche Neutronendosis-Messstelle (weiße Kugel), unter dem Zelt die in Aluminiumkisten befindlichen Detektoren des NEMUS Spektrometers. Hinter dem Erdwall ist das Dach der TBL Halle zu erkennen.

bare Messwerte ermittelt werden, damit das NMU im Oktober über die Zulässigkeit der Anlieferung weiterer Transportbehälter entscheiden konnte. Der Auftrag bestand darin, für Neutronenstrahlung und Gammastrahlung getrennt den Wert der maximalen Umgebungs-Äquivalentdosis für die Strahlung zu ermitteln, die vom TBL ausgeht. Eine besondere Schwierigkeit bestand dabei in der Berücksichtigung des Beitrags durch natürliche Strahlung, der deutlich größer ist als der oben genannte Grenzwert und der zudem starken örtlichen und zeitlichen Schwankungen unterliegt.

Für die Messung der Neutronenstrahlung wurde das NEMUS-Spektrometer der PTB und ein kommerzielles Dosisleistungsmessgerät eingesetzt. Bild 7 zeigt den Messaufbau am Zaun des TBL. Das gemessene Neutronenspektrum zeigt einen sehr hohen Anteil an thermischen und epithermischen Neutronen. Diese Beobachtung stimmt mit der Annahme überein, dass das Strahlungsfeld am Zaun durch Neutronen verursacht wird, die in der Luft oberhalb der TBL-Halle mehrfach gestreut werden („Skyshine“). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Direktstrahlung von der TBL-Halle wegen der Abschirmwirkung des Erdwalls vernachlässigt werden kann.

Für Gammastrahlung kam ein sehr empfindliches, bauartzugelassenes Dosisleistungsmessgerät zum Einsatz. Ausführliche Untersuchungen der natürlichen Strahlungs-

komponente zeigten, dass wegen der Abschirmwirkung des Erdwalls für die Gammastrahlung am Zaun des TBL kein Beitrag vom TBL nachweisbar ist.

Diese Ergebnisse wurden vom NMU verwendet, um die Jahresdosis für 2011 zu ermitteln. Im Gesamtergebnis wurde gezeigt, dass auch durch Einlagerung weiterer Behälter der Grenzwert nicht überschritten wird.

Analyse des Plasmas des JET-Fusionsreaktors

Eine wichtige Voraussetzung für ein stabiles Plasma in einem Fusionsreaktor ist ein möglichst geringer Verlust geladener Teilchen, die aus dem Plasma entweichen. Lange Zeit war es jedoch nicht möglich, diese Verluste messtechnisch zu bestimmen, da aktive Messgeräte die großen Teilchenflüsse im Fusionsreaktor nicht überstehen würden. Ein weiteres Problem für die Messtechnik sind die hohen elektromagnetischen Felder. Eine neue Methode zur Bestimmung von Teilchenverlusten aus Fusionsplasmen kombiniert die Aktivierung von Proben durch Neutronen und geladene Teilchen mit der Analyse dieser Proben durch ultra-empfindliche Gamma-Spektrometrie. Die Proben fungieren dabei als passive Detektoren und sind daher von den genannten Problemen nicht betroffen. Solche Proben wurden im JET-Tokamak (Calham, Großbritannien) aktiviert. Die Aktivierungsprodukte geben Auskunft über den Fluss und die räumliche Verteilung

von Neutronen und geladenen Teilchen, insbesondere von Protonen.

In einem ersten Experiment wurden 36 Proben, die die Materialien Ti, LiF, B₄C und W enthielten, in einem Probenhalter aus Bornitrid an der Decke im Inneren des Plasmatanks angebracht. Die Aktivierung der Proben geschah durch 63 Pulse eines D-³He Plasmas. Die Aktivitätsmessungen wurden dann in verschiedenen Untergrund-Laboratorien des CELLAR-Netzwerkes (Collaboration of European Low-level underground LABORATORIES) durchgeführt. Untergrundlaboratorien sind erforderlich, um Aktivierungsprodukte in geringsten Spuren nachweisen zu können; denn die zu messenden Aktivitäten lagen teilweise im mBq-Bereich und darunter. Wegen kurzer Halbwertszeiten mussten möglichst viele Proben gleichzeitig analysiert werden. Daher waren drei Laboratorien an der Analyse der Proben beteiligt: das Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM), die PTB und die Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS). Insgesamt standen in diesen Einrichtungen 12 hochempfindliche Gammaskpektrometer zur Verfügung. In unterschiedlichen Proben wurden die Radionuklide ⁷Be, ⁴⁶Sc, ⁵⁴Mn, ⁵⁶Co, ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ¹²⁴Sb, ¹⁸¹Hf, ¹⁸²Ta, ¹⁸¹W und ¹⁸⁵W sowie geringe Spuren von ⁴⁷Sc und ⁴⁸V gefunden. Die verschiedenen Reaktionskanäle wurden analysiert.

Inzwischen konnte die Methode verbessert werden. Eine größere Anzahl von Proben wurde aktiviert (insgesamt 45), neue Probenmaterialien wurden verwendet (V, Co, Rh and Y), die Plasmabedingungen im Reaktor wurden optimiert, um den Teilchenfluss in der Nähe der Proben zu erhöhen, und einige Proben wurden als gestapelte Festkörper realisiert, wobei zur Analyse des Protonenspektrums die Energieabhängigkeit der Eindringtiefe von Protonen ausgenutzt wurde.

Diese Messungen lieferten wichtige Beiträge zum Verständnis des Plasmas des zurzeit größten Plasma-Forschungsreaktors der Welt. Zum ersten Mal konnten quantitative Daten über Verluste geladener Teilchen und insbesondere der Teilchenfluenz auf die Reaktorwand gewonnen werden. Die Ergebnisse lieferten wichtige Eckdaten für Monte-Carlo-Simulationen zur Beschreibung des Fusionsplasmas. Aus den Simulationen konnten weitere wichtige Informationen über das Plasma abgeleitet werden. Die neue Methode wird in Zukunft

auch in anderen Fusionsreaktoren eingesetzt werden.

Quellennachweis:

Bild 5.1: https://www.mirion.com/gfx/landings/dsd_rings_lg.png

Bild 5.2: http://www.radcard.pl/obrazki/eye_d_brochure.jpg

Bild 5.3: <http://www.ptb.de>



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

Aufbau einer Low-Level-Radon-Referenzkammer

Um Messgeräte zur Bestimmung der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Luft im Bereich unterhalb von 1000 Bq/m³ rückführbar zu kalibrieren, wird zur Zeit eine Low-Level-Radon-Referenzkammer aufgebaut: Dies beinhaltet ein rückgeführtes Volumen zur Erzeugung der Referenzatmosphäre, eine Einrichtung zur Erzeugung und Überführung definierter Aktivität und ein hochsensitives Transfornormal. (D. Linzmaier, FB 6.1, diana.linzmaier@ptb.de; J. Leppelt, FB 6.1, joerg.leppelt@ptb.de)

EURAMET.RI(I)-S7-Ringvergleich – Messung der Wasser-Energiedosis mittels Alanin/ESR im Therapiedosisbereich für Gammastrahlung

EURAMET.RI(I)-S7 Ringvergleich zur Messung der Wasser-Energiedosis im Therapiedosisbereich für Gammastrahlung mittels Alanin/ESR zwischen LNE-LNHB, NPL und PTB erfolgreich durchgeführt. (M. Anton, FB 6.2, mathias.anton@ptb.de)

Referenzfeld für gepulste Strahlung und mögliche Prüfanforderungen für Dosimeter

Die PTB kann ab sofort Strahlenschutzdosimeter auch in gepulsten Strahlungsfeldern prüfen. (J. Klammer, FB 6.3, jana.klammer@ptb.de)

Bilateraler Messvergleich in der Beta-Dosimetrie

Bilateraler Messvergleich in der Beta-Dosimetrie zwischen Deutschland (PTB) und Russland (VNIIM) erfolgreich abgeschlossen. (R. Behrens, FB 6.3, rolf.behrens@ptb.de)

Analyse des Plasmas des JET-Fusionsreaktors

Eine neue Methode zur Bestimmung von Teilchenverlusten aus Fusionsplasmen wurde entwickelt und erstmals am JET-Fusionsreaktor in Calham, Großbritannien, angewendet. (H. Dombrowski, FB 6.3, harald.dombrowski@ptb.de)

Kompaktes Neutronenspektrometer für die Fusionsforschung charakterisiert.

Im Rahmen eines von der European Fusion Development Agreement (EFDA) geförderten Projekts wurde ein kompaktes Neutronenspektrometer charakterisiert. Dazu wurde ein neues Analyseprogramm entwickelt, das auf der Plattform ROOT des CERN basiert. Der Detektor wird am Joint European Torus (JET, Culham, UK) zur Messung der bei Fusionsplasmaentladungen entstehenden Neutronenspektren eingesetzt. (A. Zimbal, FB 6.5, andreas.zimbal@ptb.de)

Eigenuntergrund der Neutronendetektoren des NEMUS-Spektrometers

Für den Einsatz in unbekanntem Neutronenfeldern niedriger Intensität ist die Kenntnis des Eigenuntergrundes von Detektoren eine unabdingbare Voraussetzung. In einer zweimonatigen Messkampagne wurde alle ³He Detektoren des NEMUS Neutronenspektrometers im Untergrundlabor der PTB (UDO) untersucht und die untere Nachweisgrenze bestimmt. (B. Wiegel, FB 6.5, burkhard.wiegel@ptb.de)

Elektronikmodul für die 4p(LS)b-g-Koinzidenzmethode

Das für Radioaktivitätsmessungen entwickelte Modul ist durch die Verwendung eines FPGA sehr flexibel, da die Funktionalität weitgehend durch Software (VHDL) bestimmt wird. Dadurch konnten die ansonsten externen Koinzidenzzähler mit integriert werden. Und auch für zukünftige Erweiterungen der Aufgabenstellung stehen ausreichend Ressourcen zur Verfügung. (M. Weierganz, FB 6.5, mathias.weierganz@ptb.de)

Comparison of different approaches to investigate radiation damage at nanometer level

Zur Abschätzung strahlungsinduzierter DNA-Schäden werden üblicherweise physikalische Parameter der Spurstruktur (Ionisationsclustergroße, Teilchenfluss, Energiedeposition) herangezogen, die mittels detaillierter Monte Carlo Simulationen berechnet werden. In Zusammenarbeit mit dem Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS) wird untersucht, wie gut sich diese Spurstrukturparameter durch

ein analytisches Modell beschreiben lassen. (M. Bug, FB 6.6, marion.bug@ptb.de)

Benchmarking track structure Monte Carlo simulations

Experimentell bestimmte Energiespektren emittierter Sekundärelektronen nach Einfall von 6-MeV-Protonen auf eine 40 nm dicke Schicht aus amorphem Eis wurden verwendet, um Spurstruktur-Monte-Carlo-Simulationen zu verifizieren. Insbesondere nach Berücksichtigung der Austrittsarbeit an der Eisoberfläche (grenzend an Vakuum) in den Simulationen konnte eine gute Übereinstimmung der experimentellen Daten mit den Ergebnissen der Rechnungen mit dem in der PTB entwickelten Spurstrukturcode PTra sowie mit Geant4-DNA festgestellt werden. (M. Bug, FB 6.6, marion.bug@ptb.de)

Low-energy ion accelerator to study the collisions of light ions with biomolecules

Für ein neues Experiment zur Bestimmung der Wirkungsquerschnitte für Ionisation und Fragmentation von Biomolekülen durch Ionen mit Energien unterhalb und in der Nähe des Maximums des Stoßbremsvermögens wurde ein Beschleuniger konzipiert, der einen Strahl leichter Ionen mit einer kinetischen Energie von bis zu 150 keV/ q erzeugt (wobei q die elektrische Ladung des Ions ist). Die Wirkungsquerschnitte sollen mittels winkelaufgelöster Elektronenspektrometrie und Flugzeitspektrometrie der ionisierten Bruchstücke bestimmt werden. (T. Buhr, FB 6.6, ticia.buhr@ptb.de)

Influence of a magnetic field on the biological effectiveness of ionising radiation

Mittels Bestrahlungsexperimenten an menschlichen Blutzellen wurde ein möglicher Einfluss von Magnetfeldern auf die biologische Wirksamkeit ionisierender Strahlung untersucht. Für Röntgenstrahlung, wie sie für die Mammografie eingesetzt wird, ergab sich bei der Ausbeute an Chromosomenaberrationen kein eindeutiger Effekt, wenn die Zellen im Erdmagnetfeld bzw. in einem Magnetfeld von 1 Tesla bestrahlt wurden. (H. Nettelbeck, FB 6.6, heidi.nettelbeck@ptb.de)

Differenzielle elastische Elektronenstreuquerschnitte von Pyrimidin

Die differentiellen elastischen Streuquerschnitte von Pyrimidin, des Grundgerüsts der Nukleinbasen Cytosin und Thymin, wurden für Elektronenenergien zwischen 20 eV und 1 keV

und für Streuwinkel zwischen 5° und 135° absolut gemessen. (W Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

Differenzielle elastische Elektronenstreuquerschnitte von Cytosin und Thymin

Die differentiellen elastischen Elektronenstreuquerschnitte der Pyrimidinbasen Cytosin und Thymin wurden für Elektronenenergien von 60 eV bis 1 keV theoretisch berechnet. (W Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

Integrale Elektronenstreuquerschnitte von Cytosin und Thymin

Totale, integrale elastische Elektronenstreu- und Ionisierungsquerschnitte von Cytosin und Thymin wurden für Elektronenenergien zwischen 20 eV und 1 keV semiempirisch und theoretisch bestimmt. (W Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Entwicklung der TDCR-Methode für Aktivitätsbestimmungen mit Plastiksintillatoren

Die Anwendung von Freien-Parameter-Modellen zur Bestimmung von Aktivitäten ist nun auch für Messungen mit Plastiksintillatoren möglich. Nach den Messungen ist eine Trennung von radioaktivem Material und organischem Szintillator möglich, wodurch gemischte radioaktive Abfälle vermieden werden. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

Untersuchung von Ionisationskammer-Messsystemen für Aktivitätsbestimmungen in der Nuklearmedizin und der Metrologie

Die PTB hat ein von der Firma MED Nuklear-Medizintechnik Dresden GmbH gefördertes Forschungsvorhaben zur Untersuchung von Ionisationskammer-Messsystemen erfolgreich abgeschlossen und die Ergebnisse nun in einem PTB-Bericht veröffentlicht. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

Erneuerung der Messmittel der Radon-Messtechnik: Erste Kalibrierungen wieder seit April 2011

Die Radon-Messtechnik ist umgezogen: Nach 20 Jahren erfolgreicher Arbeit beim Aufbau, Forschen und Entwickeln neuer Verfahren wurde der Laborbereich zu klein, denn die Erweiterung der Radon-Messtechnik von Radon-222 auf Radon-220 (Thoron) haben einen Zuwachs an Messmitteln nach sich gezogen.

Im neuen Gebäude, dem renovierten Elster-Geitel-Bau, sind im Kellergeschoß eine neue Radonnormal-Kammer RNK-II (V: 21 m³) und eine teilerneuerte Thoron-Folgeprodukt-Kammer TFK-II (V: 6 m³) errichtet worden. (A. Honig, FB 6.1, anja.honig@ptb.de; A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de, T. Reich, FB 6.1, thomas.reich@ptb.de; M. Fritsche, FB 6.1, matthias.fritsche@ptb.de; D. Linzmaier, FB 6.1, diana.linzmaier@ptb.de; J. Leppelt, FB 6.1, joerg.leppelt@ptb.de)

Thoron-Aktivitätskonzentration

Die Darstellung der Einheit der Aktivitätskonzentration ist bzgl. Radon-220 eine besondere Herausforderung, denn dieses radioaktive Edelgas hat eine Halbwertszeit von nur 55 s. Seit 2010 ist das Primärnormal für die Thoron-Aktivitätskonzentration, der Thoron-Emissionsmessplatz (TEM), für Kunden verfügbar und nahezu kontinuierlich ausgebucht. Ein Vergleich von 4 Geräten zeigt, welche metrologischen Lücken es noch zu schließen gilt: Die Abweichungen der Kalibrierfaktoren reicht bis zu einem Faktor 4. Geprüft wurden Standardgeräte, die typischerweise bei Messungen eingesetzt werden und deren Daten i. allg. ohne Kalibrierung in Forschungsarbeiten eingehen! (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de; A. Honig, FB 6.1, anja.honig@ptb.de)

Messkampagne der Spurenmessstelle der PTB nach dem Kernkraftwerksunfall in Fukushima

Nach dem Unfall des Kernkraftwerkes in Fukushima hat die Spurenmessstelle der PTB eine Messkampagne mit verkürzter Probenentnahme zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration der in Fukushima freigesetzten Radionuklide in der Luft in Braunschweig durchgeführt. Die in Deutschland gemessenen Aktivitätskonzentrationen waren radiologisch unbedeutend. Die neben Braunschweig auch an Spurenmessstellen des Deutschen Wetterdienstes (Potsdam und Offenbach) und des Bundesamtes für Strahlenschutz (Freiburg) ermittelten Messergebnisse waren jedoch für die Beurteilung von Messwerten in der Überwachung der menschlichen Nahrungskette oder zur korrekten Ermittlung der genehmigten Ableitungen von Iod-131 aus Kernkraftwerken hilfreich. (H. Wershofen, FB6.1, herbert.wershofen@ptb.de)

Erfolgreicher Einsatz des PTB-Wasserkalorimeters bei Ionenstrahlung

Die Strahlentherapie mit Ionenstrahlung (z. B. Protonen oder ¹²C-Ionen) findet in jüngster Zeit zunehmende Anwendung. Dabei wird der Ionenstrahl mittels der sogenannten Raster-Scan-Methode sehr präzise über das gesamte Tumervolumen gelenkt. Für Kohlenstoff-Ionen wurde diese Methode bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI, Darmstadt) entwickelt und wird jetzt unter anderem am HIT (Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum) in der Therapie eingesetzt. Für die Dosimetrie bei diesen Bestrahlungsbedingungen existiert bislang jedoch kein geeignetes Primärnormal für die Bestimmung der Wasser-Energiedosis. In ersten Experimenten wurde daher das transportable Wasserkalorimeter der PTB in einem 300-MeV/u-Kohlenstoff-Strahl bei der GSI eingesetzt, um die Eignung des kalorimetrischen Messverfahrens aufzuzeigen. Die Ergebnisse belegen, dass die Wasser-Energiedosis mithilfe des Kalorimeters mit einer relativen Standard-Messunsicherheit von weniger als 1 % bestimmt werden kann. (A. Krauss, FB 6.2, achim.krauss@ptb.de)

Qualitätskontrolle von Prüfkörpern zur Sicherung der Bildqualität in der Röntgendiagnostik

Die PTB beteiligt sich maßgeblich an einem vom Bundesumweltministerium geförderten Projekt zur Qualitätskontrolle von Prüfkörpern zur Sicherung der Bildqualität in der Röntgendiagnostik. Dabei geht es zunächst um die Entwicklung von Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung der Spezifikationen von Prüfkörpern. Diese Verfahren sollen dann für eine systematische Untersuchung der auf dem Markt angebotenen Prüfkörper angewendet werden. (L. Büermann, FB 6.2, ludwig.bueermann@ptb.de)

Bestimmung des Ansprechvermögens des Alanindosimeters für hochenergetische Elektronen – Kooperation mit dem Schweizer Bundesamt für Metrologie (METAS)

Das Ansprechvermögen des Alanindosimeters bezüglich der Wasserenergiedosis Dw für hochenergetische Elektronenstrahlung wurde in Zusammenarbeit mit dem Schweizer Bundesamt für Metrologie (METAS) bestimmt. Das Ansprechvermögen ist innerhalb der relativen Standard-Messunsicherheit von 1 % unabhängig von der Energie. Der resultierende Kor-

rekationsfaktor für MeV-Elektronenstrahlung beträgt $k_E = 1,012 \pm 0,010$. (M. Anton, FB 6.2, mathias.anton@ptb.de)

Dosimetrie bei Miniaturröntgenanlagen

Die PTB möchte als weltweit erstes Metrologieinstitut eine Kalibrierkette für Miniaturröntgenröhren in der Einheit Wasserenergiedosis etablieren. (Th. Schneider, FB 6.2, thorsten.schneider@ptb.de)

100. Bauartzulassung von Strahlenschutzdosimetern seit der Einführung der phantombezogenen Messgrößen

Vor 10 Jahren wurden im Strahlenschutz die Messgrößen geändert. Dies erforderte die Entwicklung neuer Dosimeter. Nun wurde die 100. Bauartzulassung erteilt. (J. Brunzendorf, FB 6.3, jens.brunzendorf@ptb.de)

Überwachung der Strahlendosis für die Augen nötig?

Das menschliche Auge reagiert empfindlich auf ionisierende Strahlung. Wissenschaftler der PTB haben umfangreiche Berechnungen durchgeführt, um die Dosis der Augenlinse in unterschiedlichen Strahlungsfeldern bestimmen zu können. Die Berechnungen sollen dazu beitragen, konkrete Anforderungen an Augendosimeter zu definieren, die dann in entsprechende Normen einfließen müssen. Damit wäre erstmalig die qualitätsgesicherte Überwachung der Dosis der Augenlinse, z. B. bei medizinischem Personal, möglich. (R. Behrens, FB 6.3, rolf.behrens@ptb.de)

Dosimetrie bis in 30 km Höhe

Seit Anfang der 90er Jahre führt die PTB dosimetrische Untersuchungen der sekundären kosmischen Strahlung in der Atmosphäre durch. Im Laufe der Zeit wurden dabei die Messgeräte immer kompakter und auch wesentlich kleiner. Die Messungen erfolgten allerdings immer in Reiseflughöhen zwischen 8 km und 12 km. In Kooperation mit dem Meteorologischen Observatorium Lindenberg des Deutschen Wetterdienstes (DWD) konnte ein Messgerät im Juli 2011 in zwei Ballonsondierungen die Höhenabhängigkeit der Ortsdosisleistung bis zu einer Höhe von 30 km vermessen, also bis in die Stratosphäre hinein. (F. Wissmann, FB 6.4, frank.wissmann@ptb.de)

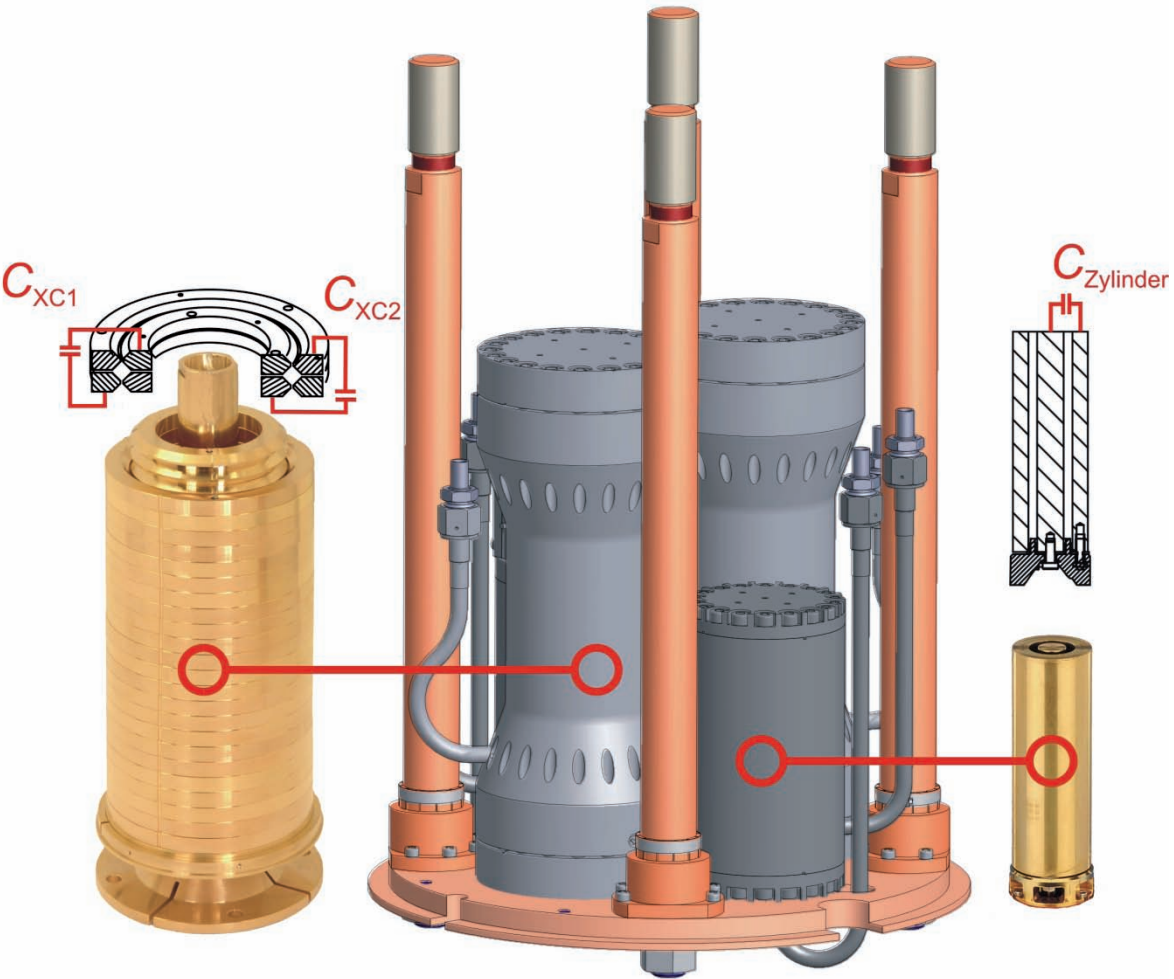
Aktivierung von Luftfracht bei der Inspektion mit Neutronen- und Gammastrahlung.

Die im Frachtgut induzierte Aktivierung und daraus resultierende mögliche Strahlenexposition von Operateuren, Passagieren und Kunden beim Einsatz eines Durchleuchtungssystems mit hochenergetischen Neutronen und Gammastrahlung wurde für verschiedene Szenarien berechnet. Die Rechnungen wurden mithilfe eines Benchmark-Experimentes an der PIAF-Beschleunigeranlage der PTB validiert. (V. Dangendorf, FB 6.5, volker.dangendorf@ptb.de)

Neutronendosimetrie mittels optisch stimulierter Lumineszenz

Im Rahmen eines Technologietransfer-Projektes (BMBF Projekt IND 08/10, Januar 2010 bis Dezember 2011) wurden in einer Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern des Bhabha Atomic Research Centre (BARC, Mumbai/Indien) Techniken der Neutronendosimetrie mittels optisch stimulierter Lumineszenz (OSL) verbessert. Es wurde gezeigt, dass der Neutronennachweis sowohl über die Albedo-Technik durch Mischen von OSL-Material mit ^6LiF und ^7LiF als auch über den Nachweis von Rückstoßprotonen durch Mischen mit Polyäthylen möglich ist. (M. Luszik-Bhadra, FB 6.5, marlies.luszik-bhadra@ptb.de)

Temperatur und Synchrotronstrahlung



Berichte der Abteilungen

Die Abteilung 7 *Temperatur und Synchrotronstrahlung* hat ihren Aufgabenschwerpunkt in den Bereichen Thermometrie und Radiometrie. Die Messung thermischer Energie, Nanometrologie, Kryosensorik, Spektrometrie und Vakuummetrologie sind weitere Aufgabengebiete. Genutzt werden dabei in vielen Fällen große Mess- und Prüfanlagen, die teilweise europä-, in einigen Fällen sogar weltweit einmalig verfügbar sind und somit ein Alleinstellungsmerkmal darstellen. Beispiele hierfür sind der Elektronenspeicherring Metrology Light Source (MLS) und das PTB-Laboratorium bei BESSY II. Organisatorisch ist die Abteilung seit Oktober 2011 in fünf Fachbereiche untergliedert, vorher waren es sechs.

Das starke Engagement der Abteilung 7 an dem europäischen Metrologie-Forschungsprogramm EMRP setzte sich im Jahr 2011 fort. Nachdem im Rahmen des 2010-Calls zu den Themen Environment und Industry die Beteiligung an insgesamt 11 neuen Forschungsprojekten eingeworben werden konnte, wurden im EMRP-Call 2011 zu den Themen Health, SI Broader Scope und New Technologies zusammen mit Partnern Anträge für insgesamt fünfzehn neue Projekte gestellt, von denen zehn bewilligt wurden.

Metrologie mit Synchrotronstrahlung

Die langjährigen Planungs- und Aufbauarbeiten an der MLS wurden im Jahr 2011 abgeschlossen. Es stehen nun Messplätze an sechs Strahlrohren bereit zur Nutzung von Synchrotronstrahlung vom THz- bis in den Extrem-UV (EUV)-Bereich.

Radiometrie im EUV-Bereich, insbesondere Reflexometrie, wurde von der PTB bereits Mitte der 80er-Jahre am Speicherring BESSY I begonnen. Diese Arbeiten, mit dem Schwerpunkt Charakterisierung von Multilayer-Optiken im Wellenlängenbereich um 13,5 nm für die Entwicklung der EUV-Lithografie, wurden bei BESSY II unter verbesserten Randbedingungen fortgesetzt und ausgebaut. Dabei spielte die enge Zusammenarbeit mit der Industrie, ins-

Titelbild:

Messsystem des Dielektrizitätskonstanten-Gas-thermometers zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante. Die gezeigten Druckgefäße enthalten Kreuzkondensatoren (links) sowie Zylinderkondensatoren (rechts).

besondere ohne Unterbrechung seit 1998 mit der Carl Zeiss SMT AG, eine wesentliche Rolle.

An der MLS eröffnen sich neue Möglichkeiten für die Weiterentwicklung dieses Arbeitsgebietes. Aufgrund des kleinen Krümmungsradius der Elektronenbahn war es möglich, mit dem ersten Spiegel des neuen EUV-Strahlrohrs (Bild 1) wesentlich dichter an den Quellpunkt zu gehen und so einen deutlich größeren Akzeptanzwinkel und damit für Wellenlängen größer als 5 nm bis zu 100-fach höhere Strahlungsleistung zu erreichen als bei BESSY II. Durch Refokussierung der monochromatisierten Strahlung und den Einbau eines zusätzlichen variablen Spaltes quer zur Dispersionsrichtung kann die Größe des Photonenstrahls auf den zu untersuchenden Proben eingestellt werden bis herunter zu Durchmessern von 0,2 mm bei gleichzeitig hoher Strahlungsleistung.

Aus Anlass der erfolgreichen Inbetriebnahme des EUV-Strahlrohres an der MLS wurde in Adlershof das 262. PTB-Seminar „EUV Metrology“ durchgeführt. Das Seminar fand am 27. und 28. Oktober 2011 statt mit insgesamt 28 eingeladenen Vorträgen aus dem Kreis der Kooperationspartner der PTB. Es nahmen insgesamt 102 Personen aus Europa, den USA, Russland und Brasilien teil (Bild 2).

Für die Messung von optischen Eigenschaften (Reflexion, Transmission) speziell im vakuum-ultravioletten Spektralbereich wurde an der MLS ein neues Reflektometer in Betrieb genommen, das es ermöglicht, die zu untersuchenden Proben über eine Schleuse ins Ultrahochvakuum zu transferieren und sehr gut polarisationsabhängige Messungen durchzuführen. Zur Realisierung unterschiedlicher Reflexionsgeometrien ist die gesamte Apparatur in einem schwenkbaren Rahmen gelagert (Bild 3). Darüber hinaus ist das System mit einem beheizbaren Probenhalter ausgestattet, der temperaturabhängige Untersuchungen erlaubt.

Detektorradiometrie

Ein auf dem elektrischen Substitutionsprinzip beruhendes Primärnormal für optische Strahlungsleistung, ein sogenanntes Kryoradiometer, wurde im Fachbereich *Detektorradiometrie und Strahlungsthermometrie* erfolgreich in Betrieb genommen. Es wird an einem Kalibrier-





Bild 1: EUV-Strahlrohr an der MLS: Direkt an der Strahlenschutzmauer (links) befindet sich der Plangittermonochromator, im Abstand von 6 m folgt der Austrittsspalt, der von einem weiteren Spiegel auf den Messpunkt am zukünftigen Standort des EUV-Reflektometers (rechts vom Bildrand) abgebildet wird.



Bild 2: Die Teilnehmer des 262. PTB-Seminars „EUV Metrology“ vor dem BESSY II-Gebäude in Berlin-Adlershof.

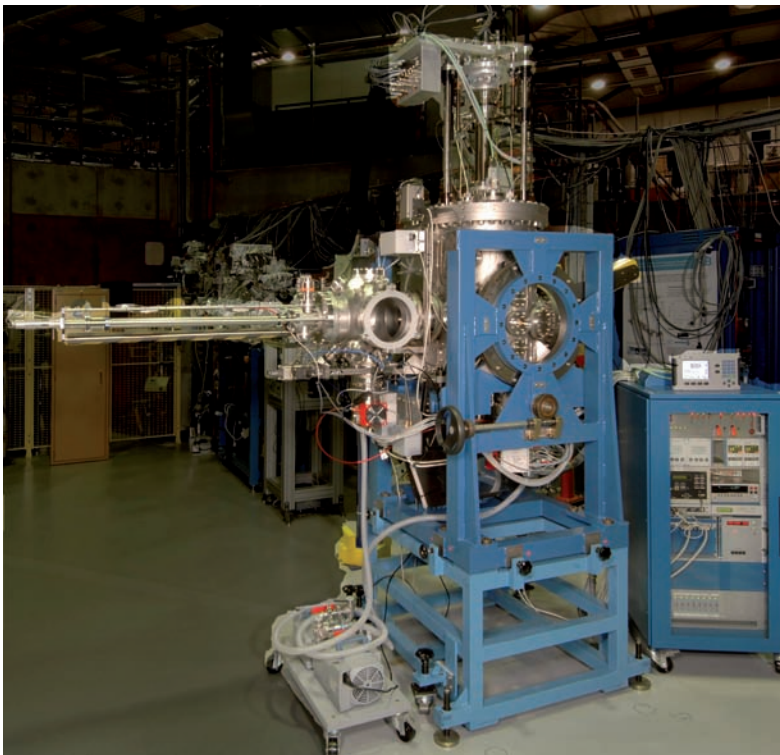


Bild 3: Reflektometer zur Messung polarisationsabhängiger Reflexion und Transmission im Vakuum-UV-Spektralbereich an der MLS.



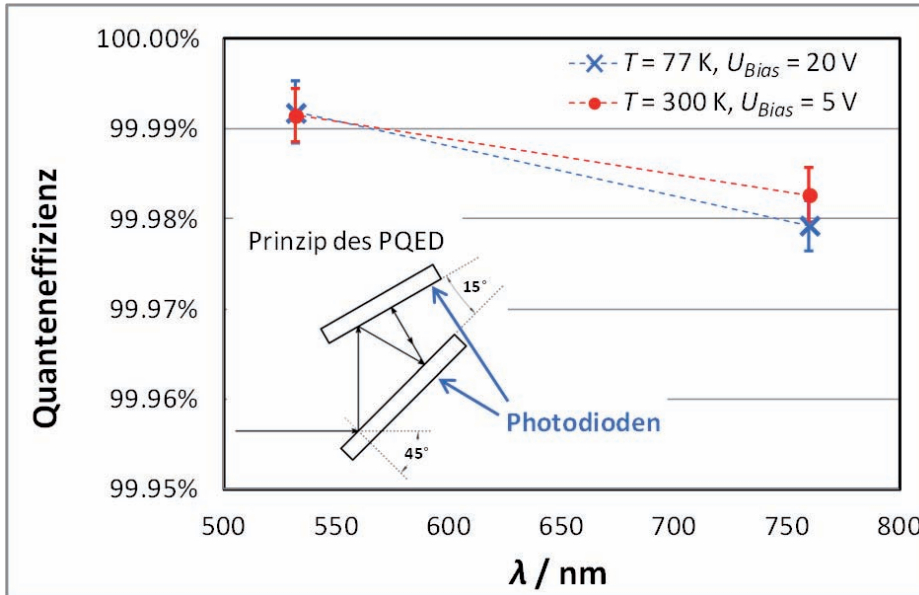


Bild 4: Quanteneffizienz des PQED bei zwei Wellenlängen bei Raumtemperatur und bei der Temperatur des flüssigen Stickstoffs.

messplatz zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von Strahlungsdetektoren unter Nutzung von Laserstrahlung im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1000 nm eingesetzt. Ein optimiertes Messprinzip zusammen mit den verbesserten Eigenschaften des neuen Kryoradiometers ermöglicht dabei gegenüber der bisherigen Messeinrichtung eine Verringerung der relativen Messunsicherheit um den Faktor 3 auf 30 ppm.

Im Fokus des europäischen iMERA-plus-Forschungsprojektes „Candela: Towards quantum-based photon standards“ (<http://www.quantumcandela.org>) stand in den vergangenen drei Jahren die Weiterentwicklung sowohl der klassischen Radiometrie als auch der Radiometrie weniger Photonen sowie deren Verknüpfung. Hierzu wurde ein berechenbarer, hocheffizienter Strahlungsdetektor auf der Basis spezieller Silizium-Photodioden (Predictable Quantum Efficient Detector – PQED) entwickelt. Die PTB-Arbeitsgruppe *Detektorradiometrie* hatte dabei die umfassende elektro-optische Charakterisierung und die hochgenaue Bestimmung der Quanteneffizienz dieses Detektors übernommen, um das im Forschungsprojekt entwickelte physikalische Modell zur Vorhersage der Quanteneffizienz des PQED zu überprüfen. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für dessen Einsatz als ein kompaktes Primärnormal für optische Strahlungsleistung.

Die Quanteneffizienz des PQED wurde bei zwei Wellenlängen, bei Raumtemperatur und der Temperatur des flüssigen Stickstoffs (-196 °C) und in Abhängigkeit der angelegten

Bias-Spannung mit einer Unsicherheit von nur 30 ppm bestimmt (Bild 4). Bei einer Wellenlänge von 532 nm betrug sie mehr als 99,99 %. Die Vorhersage des physikalischen Modells zur Quanteneffizienz bei Raumtemperatur konnte damit bestätigt werden.

Thermometrie

Im Oktober 2011, auf der Generalkonferenz für Maß und Gewicht der Meterkonvention, haben sich die metrologischen Staatsinstitute darauf geeinigt, die Basiseinheiten Kilogramm, Ampere, Kelvin und Mol durch Festlegung von Naturkonstanten neu zu definieren. Dies wird in den nächsten drei Jahren geschehen, sobald die betreffenden Konstanten genügend genau bestimmt sind. Für die Neudefinition des Kelvin muss der Wert der Boltzmann-Konstante mit Unsicherheiten von wenigen ppm ermittelt werden. Nach umfangreichen, in den letzten Jahresberichten beschriebenen Vorarbeiten haben im Fachbereich *Temperatur* die Messungen mit dem kürzlich aufgebauten Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer der dritten Generation Früchte getragen. Die PTB ist ihrem Ziel, zur Neudefinition der Basiseinheit Kelvin durch ein vollkommen unabhängiges Verfahren maßgeblich beizutragen, ein beträchtliches Stück näher gekommen.

Der ermittelte Wert für die Boltzmann-Konstante liegt 4 ppm oberhalb des neuesten CODATA-Wertes und ist mit einer relativen Unsicherheit von knapp 8 ppm der erste Beweis, dass das Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer zu einer Bestimmung der Boltzmann-Konstante auf höchstem Niveau in der Lage ist. Bis zur angestrebten Unsicherheit

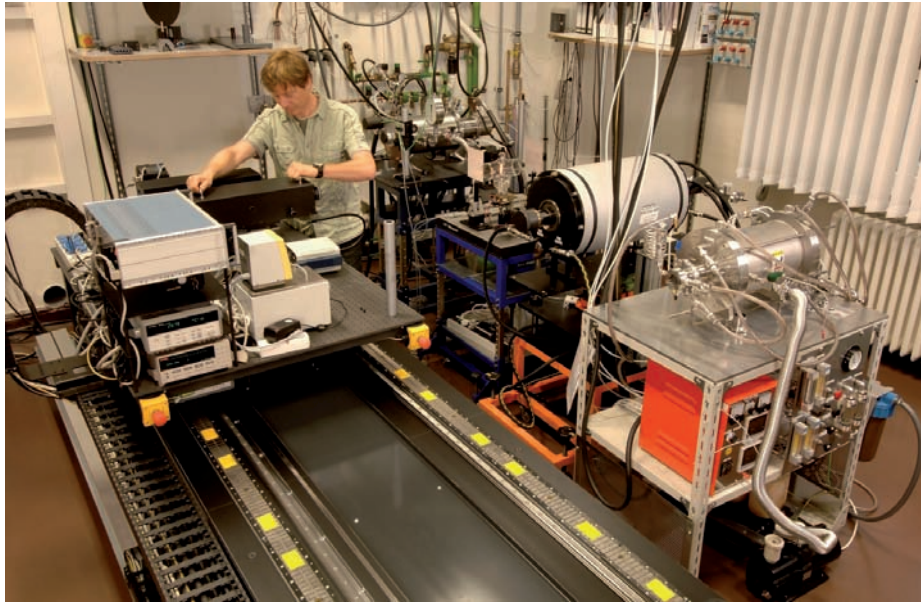


Bild 5: Der neue Hochtemperaturmessplatz für die Strahlungsthermometrie.

von 2 ppm sind noch einige Hürden zu nehmen: Die Druckmessung wird verbessert und der dominierende Unsicherheitsbeitrag, verursacht durch die Deformation der Kondensatorelektroden unter dem Gasdruck, wird durch Kreuzkondensatoren aus Wolframkarbid verringert. Weitere Informationen und Bild hierzu unter „Nachrichten des Jahres“ (siehe auch das Titelbild des Berichts der Abteilung 7).

In der Arbeitsgruppe *Hochtemperaturskala* wurde der Messplatz für die Darstellung und Weitergabe der Temperaturskala im Bereich von 962 °C bis über 3000 °C grundlegend modernisiert und ausgebaut. Damit können die zunehmenden Kalibrier- und Messanfragen aus Industrie und Forschung im Bereich der Strahlungsthermometrie effizienter und mit kleinerer Messunsicherheit als bisher bearbeiten werden. Am neuen Hochtemperaturmessplatz ist es möglich, bis zu drei Hochtemperaturstrahler variabler Temperatur und Hochtemperaturfixpunkte gleichzeitig vor einem automatisierten Detektor-Positioniersystem einzusetzen (Bild 5). Der Messplatz wird einen wichtigen Beitrag zur Durchführung des High-Temperature Research Plan des Consultative Committee for Thermometry (CCT) an Metall-Kohlenstoff-Hochtemperaturfixpunkten leisten.

Im Rahmen des EMRP-Programms können in der Thermometrie ne-

ben den Basisaufgaben zunehmend anwendungsorientierte Probleme bearbeitet werden. Ein aktuelles Beispiel ist die Untersuchung der Effizienz thermoelektrischer Konverter, die zukünftig Abwärme z. B. in Kraftfahrzeugen zur Erzeugung elektrischer Energie nutzen sollen. Entscheidend für die Effizienz thermoelektrischer Materialien sind deren physikalische Transporteigenschaften. Diese lassen sich zu der thermoelektrischen Gütezahl ZT zusammenfassen, in die der Seebeck-Koeffizient, die elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie die Temperatur eingehen. Die genaue Bestimmung von ZT stellt die dringend benötigte Basis für eine Bewertung thermoelektrischer Materialien in Forschung und Entwicklung dar. Die gegenwärtig erreichbaren Mess-

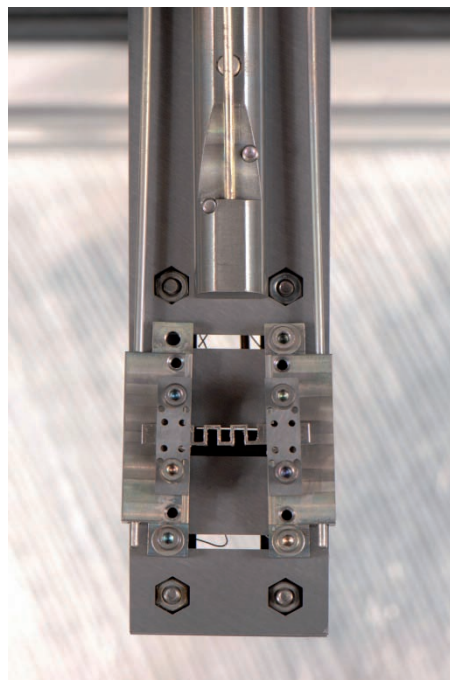


Bild 6: Mäanderförmige Probe aus NiCu45, eingespannt zwischen den beiden Heizelementen zur Messung des Seebeck-Koeffizienten.

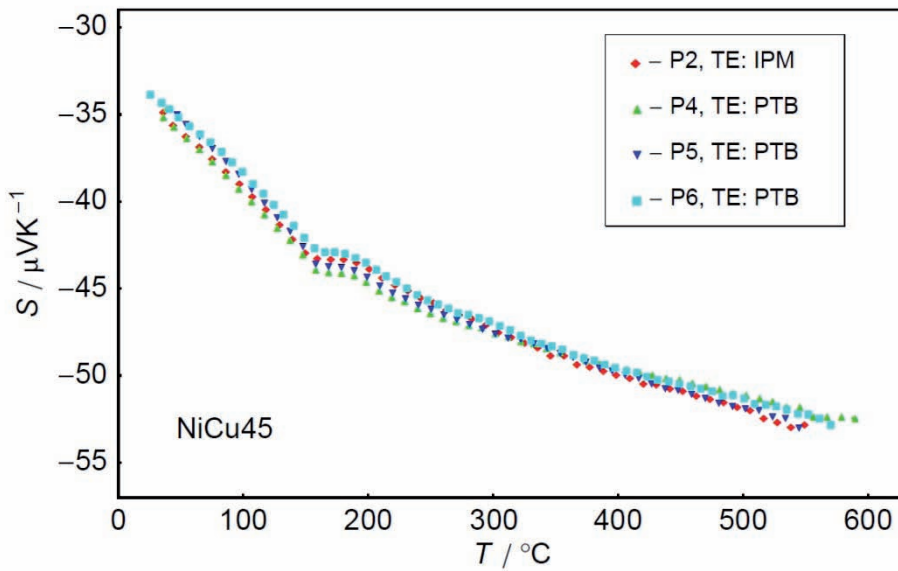


Bild 7: Seebeck-Koeffizienten verschiedener NiCu45-Proben im Temperaturbereich zwischen 30 °C und 600 °C.

unsicherheiten von ZT von etwa 10 % bis 20 % sind jedoch für den Leistungsvergleich unzureichend. Das zentrale Ziel der Verringerung dieser Messunsicherheiten soll durch die Einführung rückführbarer Messverfahren, hochpräziser thermoelektrischer Messtechnik sowie die Entwicklung und Bereitstellung thermoelektrischer Referenzmaterialien insbesondere für Seebeck-Koeffizienten erreicht werden. Der Fachbereich *Temperatur* arbeitet daran, zusammen mit weiteren Partnern im Rahmen des EMRP-Projekts „Metrology for Energy Harvesting“ sowie des vom BMBF geförderten Projekts „ThermoElektrik-Standardisierung“. Dazu werden thermoelektrische Bulk- und Dünnschichtmaterialien (Bild 6) untersucht. Erste Messungen des Seebeck-Koeffizienten von NiCu45-Proben unterschiedlicher Geometrie zeichnen sich bereits durch eine hohe Reproduzierbarkeit aus (Bild 7).

Zur Entwicklung von schnellen Quantencomputern, supraleitenden Magneten für die Medizin und neuen Verschlüsselungsverfahren für sicheren Datenaustausch sind tiefe Temperaturen unerlässlich. Mit der Verbreitung von kryogenfreien Kryostaten vollzieht sich 100 Jahre nach der Entdeckung der Supraleitung eine kleine Revolution: tiefste Temperaturen können nun routinemäßig, mit vertretbarem experimentellen Aufwand und ohne den Verbrauch der knappen Ressource Helium erzeugt werden. Damit sie ebenso problemlos gemessen werden können, forscht die PTB an neuen Temperaturmessverfahren und Sensoren und hat dazu mehrere kryogenfreie Kryostaten in Betrieb genommen.

In einer Kooperation zwischen der Arbeitsgruppe (AG) *Kryosensoren*, der AG *Quantum Information* am NIST Boulder und dem Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften Wien wurde ein Detektorsystem mit supraleitenden Photonenzählern auf der Basis von supraleitenden TES-Kalorimetern aufgebaut, die mit SQUIDs ausgelesen werden. Das System wird am IQOQI für Untersuchungen von dort entwickelten optischen Einzelphotonenquellen eingesetzt (Bild 8).

Im Bereich Kryophysik wurden erhebliche Anstrengungen bei der Fertigung und Einführung

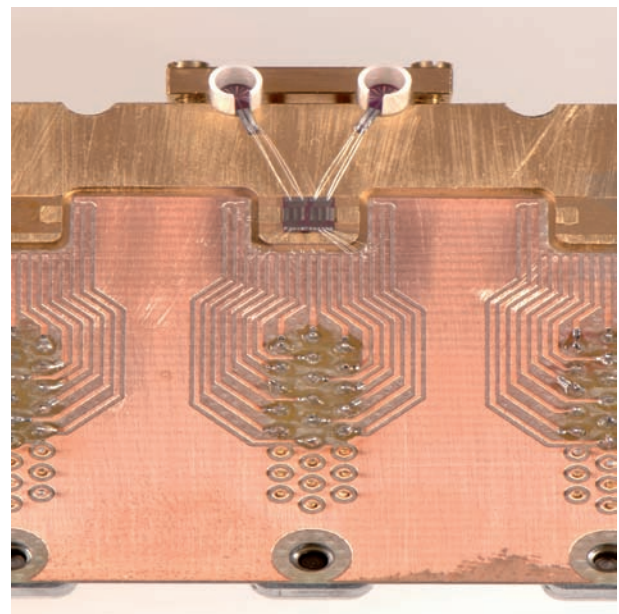


Bild 8: TES-Photonenzähler in Keramikhüllen für Lichtwellenleiter-Einkopplung. In der unteren Hälfte des Bildes befindet sich in der Mitte der Chip mit 2 SQUID-Stromsensoren.

einer neuen Generation von SQUID-Stromsensoren unternommen. Erste neue Sensorschaltungen konnten an verschiedene Kooperationspartner übergeben werden, überwiegend im Rahmen des EU-Vorhabens „Microkelvin Collaboration“.

Im Rahmen des Technologietransfers wurde ein ZIM-Vorhaben zur Charakterisierung von Solarzellen mit magnetischer Messtechnik zusammen mit der Berliner Firma Sentech Instruments GmbH und der TH Wildau begonnen.

Die Arbeiten in den iMERA-plus-JRPs „NanoSpin“, „QuantumCandela“ und „REUNIAM“ wurden erfolgreich abgeschlossen. Zu den iMERA-plus-Vorhaben „REUNIAM“, „UL-QHE“, „Josy“ und „NanoSpin“ fand in Berlin ein abschließendes Joint Dissemination Meeting zusammen mit einem EURAMET DC-QM Meeting statt, das zusammen mit dem FB 2.6 *Elektrische Quantenmetrologie* organisiert wurde.

Thermische Energie

Im Fachbereich *Wärme* wurde das Forschungsprojekt „Laseroptische Vorort-Kalibrierung von Durchflussmessgeräten im laufenden Betrieb“ erfolgreich abgeschlossen. Das Projekt wurde vom Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) als Kooperation zwischen

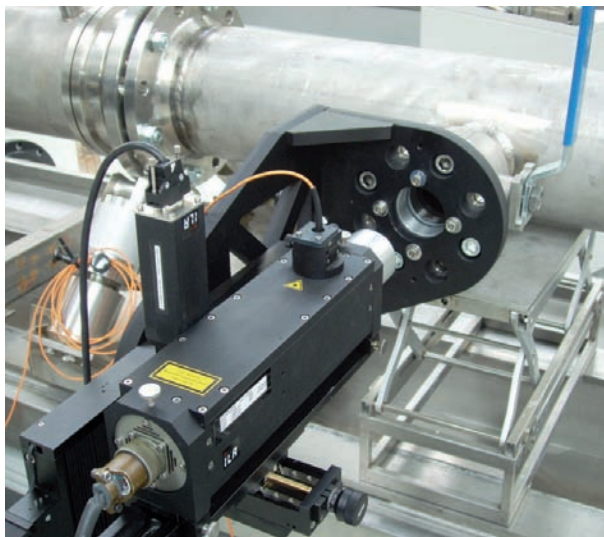


Bild 9: Messaufbau für die laseroptische Vor-Ort-Untersuchung: In einen Kugelhahn, der auf eine bestehende Rohrleitung aufgeschweißt wird, wird – ohne Unterbrechung des laufenden Betriebs – eine spezielle Optik eingeschoben, durch die der Lasersensor nach dem Prinzip der Laser-Doppler-Velozimetrie das Geschwindigkeitsprofil des strömenden Fluids vermessen kann.

dem kleinen Hightechunternehmen Intelligent Laser Application GmbH (ILA, Jülich) und der PTB gefördert. Die erfolgreichen Felduntersuchungen wurden im Wesentlichen im Wärmeverteilstütz der Firma Vattenfall Energy Services (Berlin) durchgeführt.

Im Rahmen des Projekts wurde ein laseroptisches Verfahren entwickelt, das es erlaubt, Volumenstromsensoren in Fernwärmenetzen vor Ort ohne Betriebsunterbrechung auf deren Messabweichung hin zu untersuchen. Dazu wird bei laufendem Betrieb mithilfe eines speziellen Anbohrverfahrens („hot-tapping“) ein optischer Zugang in die Fernwärmeleitung gelegt (Bild 9). Mithilfe des laseroptischen Verfahrens (basierend auf der Laser-Doppler-Velozimetrie, LDV) wird dann die Geschwindigkeitsverteilung im Rohr gemessen und der Volumenstrom als Integral der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung über dem Rohrquerschnitt ermittelt. Die erweiterte relative Messunsicherheit des Verfahrens beträgt bei radialsymmetrischen Strömungsprofilen weniger als 0,6 %.

In Fernwärmenetzen verbleiben die Prozessmessgeräte oft jahrzehntelang ohne Nachkalibrierung im Einsatz. Messabweichungen dieser Prozessmessgeräte können unter anderem zu sub-optimalem Netzbetrieb, aber auch zu erheblichen Fehlrechnungen führen. Die Felduntersuchungen haben ergeben, dass etwa 10 % der untersuchten Sensoren Messabweichungen von bis zu 50 % aufweisen, so dass sich für das Verfahren eine erhebliche Marktrelevanz ableiten lässt.

Vakuummetrologie

Um die erhebliche Anzahl von Kalibrierungen in der AG *Vakuummetrologie* bewältigen zu können, wurden die umfangreichen Modernisierungen der Primärnormale der Arbeitsgruppe weitergeführt.

Die PTB richtete die „5. CCM International Conference on Pressure and Metrology“ vom 1. bis zum 5. Mai 2011 in Berlin aus. Es ist die weltweit maßgebende Konferenz auf dem Gebiet der Druck- und Vakuummetrologie und wird alle 6 Jahre von den Arbeitsgruppen für Druck und Vakuum im CCM (Consultative Committee for Mass and Related Quantities) organisiert. Forschung, Neu- und Weiterentwicklung der besten Primär- und Sekundär-



normale im Bereich von 10^{-9} Pa bis 10^9 Pa und deren Vergleiche sind die Schwerpunkte. Da dieses Jahr die Konferenz mit der des Technischen Komitees 16 „Druck und Vakuum“ der IMEKO verbunden wurde, bildete jedoch auch die in der Industrie eingesetzte Messtechnik ein wichtiges Thema. 120 Teilnehmer aus 32 Ländern aus allen Kontinenten und 11 Aussteller nahmen an der Konferenz teil (Bild 10).

Bild 10: Teilnehmer an der „5th CCM International Conference on Pressure and Metrology“ in Berlin.



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

Charakterisierung von nanostrukturierten Oberflächen mit GISAXS

Im PTB-Laboratorium am Elektronenspeicherring BESSY II wurden erste Ergebnisse zur dimensionellen Charakterisierung von nanostrukturierten Oberflächen und Nanopartikeln auf Oberflächen mit der Methode der Röntgenkleinwinkelstreuung in Reflexion unter streifendem Strahlungseinfall (Grazing Incidence Small Angle X-ray Scattering, GISAXS) erzielt. Ein Vergleich mit der zuvor etablierten SAXS-Methode zur Größenbestimmung von Nanopartikeln in Transmission war sehr erfolgreich. Für die umfassende Parametrisierung von Oberflächenstrukturen werden die Auswertemethoden noch weiter verfeinert. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

EUV-Scatterometrie an strukturierten Oberflächen

Im Rahmen des kürzlich gestarteten EMRP-Projektes IND17 werden die Arbeiten zur Scatterometrie im Spektralbereich des Extrem-UV (EUV) an rauen Oberflächenstrukturen aus dem im Sommer abgeschlossenen CDuR32-Projekt fortgesetzt. Erste Vergleichsmessungen mit der kürzlich bei BESSY II im Röntgenbereich von der PTB etablierten GISAXS-Methode zeigen Konsistenz der beiden Streuverfahren. Die für den EUV-Bereich entwickelten mathematischen Auswerteverfahren sollen nun auf die Röntgenstreuung übertragen werden. (A. Kato, FB 7.1, akiko.kato@ptb.de)

Inbetriebnahme des EUV-Strahlrohrs an der MLS

Für die Weiterentwicklung der EUV-Radiometrie wurde an der Metrology Light Source (MLS) ein neues Strahlrohr aufgebaut, das für den Spektralbereich von 5 nm bis 50 nm optimiert ist und im Vergleich zu BESSY II verbesserte Messmöglichkeiten für die Untersuchung von Detektoren und optischen Komponenten schafft. Bei der Inbetriebnahme wurde die Erfüllung aller wesentlichen Spezifikationen nachgewiesen, die zum Teil deutlich über denen des vorhandenen EUV-Strahlrohrs der PTB bei BESSY II liegen. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

262. PTB-Seminar „EUV-Metrologie“

Aus Anlass der Inbetriebnahme des neuen EUV-Strahlrohrs an der MLS wurde von der PTB-Arbeitsgruppe *EUV-Radiometrie* am 27. und 28. Oktober 2011 ein PTB-Seminar organisiert. Die Anzahl von über hundert angemeldeten Teilnehmern belegte das große Interesse der deutschen und europäischen Industrie und Forschung. In 28 eingeladenen Vorträgen wurde das gesamte inhaltliche Spektrum dargestellt, von der Kalibrierung und Charakterisierung von Detektoren und Optiken bis hin zu Anwendungen der EUV- und Röntgen-Scatterometrie in Zusammenarbeit auch mit anderen PTB-Arbeitsgruppen. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

Fertigstellung des Strahlrohrs für Undulatorstrahlung an der MLS

In einer geraden Sektion des Elektronenspeicheringes MLS steht ein Undulator zur Erzeugung hochintensiver, linear polarisierter Strahlung zur Verfügung. Um diese für Messungen nutzen zu können, wurde ein Strahlrohr mit einem Plangittermonochromator aufgebaut und in Betrieb genommen. Der Monochromator hat ein spezielles optisches Design, wodurch die Nutzung eines sehr breiten Spektralbereiches vom Nah- bis ins Extrem-UV möglich ist. (A. Gottwald, FB 7.1, alexander.gottwald@ptb.de)

Neues Reflektometer für den Vakuum-UV-Bereich

Zur Messung der gerichteten Reflexion optischer Oberflächen speziell im Spektralbereich des Vakuum-UV wurde ein neues Ultrahochvakuum-Reflektometer aufgebaut. Das Instrument ersetzt einen über 20 Jahre alten Vorgänger und wird mit monochromatisierter Synchrotronstrahlung an der MLS eingesetzt. Es ist speziell für die Messung polarisationsabhängiger Reflexionsgrade optimiert und ausgestattet mit einer Probenschleuse sowie der Möglichkeit zur In-Vakuum-Beheizung von Proben, um Oberflächenkontaminationen zu reduzieren. (A. Gottwald, FB 7.1, alexander.gottwald@ptb.de)

Stabilitätsuntersuchungen an fasergekoppelten Detektoren an der MLS

Im Rahmen des EMRP-JRP „Metrology for Industrial Quantum Communication“ sollen fasergekoppelte Detektoren an der MLS unter Ausnutzung der einstellbaren hohen Dynamik im Elektronenstrom rückführbar kalibriert werden. Dazu wurden erste Messungen zur Stabilität des ringstromnormierten Signals eines fasergekoppelten Detektors durchgeführt. Die erreichte Stabilität liegt im Bereich einiger Promille und ist damit weit besser, als erforderlich. (I. Müller, FB 7.3, ingmar.mueller@ptb.de)

Neuer Messplatz für nanoanalytische Anwendungen der Röntgenspektrometrie

Im PTB-Laboratorium am Elektronenspeicherring BESSY II wurde ein neuer Messplatz für nanoanalytische Anwendungen der Röntgenspektrometrie fertiggestellt, in Betrieb genommen und umfangreich getestet. Der Messplatz soll ein hohes Maß an Flexibilität bei der Anwendung verschiedener röntgenspektrometrischer Messverfahren sichern. (B. Beckhoff, FB 7.2, burkhard.beckhoff@ptb.de)

Methodenerweiterung bei der Röntgenfluoreszenzanalyse

Im Rahmen des DFG-Projektes „Grenzschichtspeziation“ wurde die Methodik der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) mit Synchrotronstrahlung erweitert durch die Kombination von RFA unter streifendem Einfall und in konventioneller 45°-Geometrie, was sowohl die Quantifizierung von vergrabenen Nanoschichten leichter Elemente ermöglicht als auch eine Bestimmung der Reihenfolge der Schichten erlaubt. (B. Beckhoff, FB 7.2, burkhard.beckhoff@ptb.de)

Werkstoffe mit neuem Design

Im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms SPP1473 „Werkstoffe mit neuem Design für verbesserte Lithium-Ionen-Batterien“ wurden mittels referenzprobenfreier Röntgenspektrometrie neue Kathodenmaterialien für Lithium-Schwefel-Akkumulatoren untersucht. Das Ziel dieser Untersuchungen besteht darin, die Schwefeldepositionen in den hierfür entwickelten porösen Kohlenstoffschichten zu quantifizieren und deren chemischen Bindungszustand zu bestimmen. (B. Beckhoff, FB 7.2, burkhard.beckhoff@ptb.de)

Aufbau des Größtgerätes IR- und THz-Messplatz an der MLS

Der Aufbau des Größtgerätes IR- und THz-Messplatz an der MLS wurde in diesem Jahr abgeschlossen. Der Messplatz, bestehend aus einem FTIR-Spektrometer und einem IR-Mikroskop, kann jetzt für mikrospektroskopische Anwendungen auf verschiedenen Gebieten wie z. B. der Materialcharakterisierung, Untersuchung biologischer Proben und THz-Spektroskopie benutzt werden. (R. Müller, FB 7.2, ralph.mueller@ptb.de)

Weiterentwicklung des THz-Betriebs an der MLS

In Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin wurde die sogenannte „Low-alpha-Optik“ zur Erzeugung von kohärenter Synchrotronstrahlung im THz-Bereich weiterentwickelt. Dabei wurden die variablen Betriebsmöglichkeiten der MLS genutzt, um die emittierte Strahlungsleistung und die Spektren bei verschiedenen Energien der umlaufenden Elektronen zu untersuchen und zu vergleichen. (R. Müller, FB 7.2, ralph.mueller@ptb.de)

Nationaler Vergleich zur Messung des Emissionsgrads

Im Rahmen des Arbeitskreises Thermophysik (AKT) wurde ein von der PTB geleiteter Vergleich der Messeinrichtungen für den spektralen Emissionsgrad abgeschlossen. Damit konnten nahezu alle Emissionsgradmessplätze an deutschen Universitäten und Forschungseinrichtungen auf den Messplatz für Emissionsgrad an der PTB rückgeführt werden. (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)

Neues Primärnormal für die optische Strahlungsleistung mit deutlich verringerter Messunsicherheit

Ein auf dem elektrischen Substitutionsprinzip beruhendes Primärnormal für die optische Strahlungsleistung, ein sogenanntes Kryoradiometer, wurde erfolgreich in Betrieb genommen. Das optimierte Messprinzip der Kalibriereinrichtung und die verbesserten Eigenschaften des Kryoradiometers erlauben gegenüber dem bisherigen Primärnormal deutlich verringerte relative Messunsicherheiten von $< 10^{-4}$ bei der Kalibrierung von Detektoren. (L. Werner, FB 7.3, lutz.werner@ptb.de)



Erste Präzisionsbestimmung der Boltzmann-Konstante in der PTB

Messungen mit dem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer am Wassertripelpunkt haben einen Wert für die Boltzmann-Konstante von $1,380655 \cdot 10^{-23}$ J/K mit einer relativen Unsicherheit von knapp 8 ppm ergeben und damit die Leistungsfähigkeit des Messsystems nachgewiesen. Innerhalb eines Jahres soll der endgültige Schritt hin zu einer Unsicherheit von 2 ppm vollzogen werden, um damit die Neudefinition der Einheit Kelvin zu ermöglichen. (Ch. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

Erfolgreicher Einsatz von FEM-Berechnungen bei der Bestimmung der Boltzmann-Konstante

Mithilfe der Finite-Elemente-Methode konnte die Verformung der für die Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie verwendeten Zylinderkondensator-Elektroden durch den Gasdruck berechnet werden. Die Ergebnisse führten zu einer relativen Korrektur der effektiven Kompressibilität gegenüber dem Wert, der aus der Volumenkompressibilität abgeleitet wurde, von 1,69 % mit einer Unsicherheit von 0,12 %. Dies trägt mit ca. 4 ppm zur relativen Unsicherheit der Boltzmann-Konstante bei und lässt weitere Fortschritte durch eine Verbesserung des Modells erwarten. (T. Zandt, FB 7.4, thorsten.zandt@ptb.de)

Internationales Spitzenniveau der Darstellung von Tieftemperaturfixpunkten

Die abschließende Bewertung des von der PTB durchgeführten internationalen Vergleiches sehr unterschiedlicher abgeschlossener Zellen für die Darstellung von Tripelpunkten (Teilnahme von 12 metrologischen Instituten mit 68 Zellen) hat Standardabweichungen der Tripelpunkttemperaturen von 30 μ K (H_2), 89 μ K (Ne), 57 μ K (O_2) bzw. 58 μ K (Ar) ergeben. Hierdurch wird der Stand der Darstellung von Tieftemperaturfixpunkten auf bisher nicht erreichtem Niveau nachgewiesen, was für die Anwendungen auf lange Zeit ausreichend ist. (B. Fellmuth, FB 7.4, bernd.fellmuth@ptb.de)

Verbesserte SQUID-Prozesstechnologie

Die Herstellung von Niob-basierten SQUID-Sensoren in der AG *Kryosensoren* konnte in diesem Jahr erheblich verbessert werden. Wesentlich dafür war die Integration einer neu beschafften Plasmaätzanlage in die SQUID-Mikrofabrikation. Wurden bisher ausschließlich nasschemische Methoden mit vergleichsweise

schlechter Strukturtreue und Reproduzierbarkeit für die Dünnschichtstrukturierung verwendet, können mit der neuen Anlage Strukturierungen durch „trockenes“ Plasmaätzen ausgeführt werden. Ein kritischer Prozessschritt, die Definition der Josephson-Kontakte, wird nun durch Plasmaätzen vorgenommen. Durch diese Prozessumstellung sind die Reproduzierbarkeit und die Homogenität der kritischen Ströme der Josephson-Kontakte erheblich verbessert worden. Neue Schaltungskonzepte, z.B. mehrstufige SQUID-Kaskaden, in denen SQUID-Arrays mit bis zu mehreren hundert Josephson-Kontakten verwendet werden, können durch die neue Prozesstechnologie mit erhöhter Ausbeute an vollständig funktionalen Sensoren realisiert werden. (J. Beyer, FB 7.2, Joern.Beyer@ptb.de)

Elektrodynamische Dualität in Spin-Eis

An zwei grundlegenden Experimenten zur Messung der Impedanz von $Dy_2Ti_2O_7$ -Einkristallen bei tiefen Temperaturen konnte erstmals gezeigt werden, dass sich Spin-Eis wie ein magnetisch leitendes Material verhält und durch symmetrische Maxwell-Gleichungen in Materie beschrieben werden kann. Damit wurde ein weiteres wesentliches Indiz für die Existenz magnetischer Monopole in diesen Materialien gefunden. (P. Strehlow, FB 7.2, peter.strehlow@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Charakterisierung von Hybrid-Pixel-Röntgendetektoren

Im Rahmen eines neuen Forschungsvorhabens mit dem Hersteller von großflächigen Hybrid-Pixel-Röntgendetektoren wurden erste Untersuchungen zu deren Eignung für quantitative Messungen mit monochromatisierter Synchrotronstrahlung durchgeführt. Von besonderem Interesse bei den Messungen im PTB-Laboratorium am Elektronenspeicherring BESSY II ist der Photonenenergiebereich unterhalb von 5 keV, der nur durch einen Betrieb des Detektors in Vakuum zugänglich ist, aber die Untersuchung von Nanostrukturen an den Absorptionskanten von biologisch relevanten Elementen wie Schwefel oder Phosphor ermöglicht. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Metrologie für die EUV-Lithografie

Die umfangreiche Unterstützung der europäischen Halbleiterindustrie bei der Entwicklung der Halbleiter-Lithografie mit Strahlung einer Wellenlänge von 13,5 nm im extremen UV (EUV) wurde fortgesetzt. Da die derzeitigen Strahlungsquellen ein CO₂-Laser gepumptes Plasma nutzen, ist die Charakterisierung der EUV-optischen Komponenten über einen sehr breiten Spektralbereich von 13 nm bis 10 µm notwendig. Hierfür ist die PTB mit ihren Messmöglichkeiten vom EUV- bis in den IR-Bereich an der Metrology Light Source hervorragend ausgestattet. Es wurden dedizierte optische Elemente zur Unterdrückung der gestreuten IR-Strahlung der Plasmaquelle bei gleichzeitig hohem EUV-Reflexionsgrad untersucht. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

Kalibrierproben für die Röntgenfluoreszenzanalyse

In Kooperation mit der Firma AXO in Dresden wurden im Rahmen eines MNPQ-Projektes neuartige Kalibrierproben mit Schichtabscheidungen im Submonolagenbereich für die quantitative Röntgenfluoreszenzanalyse bei verschiedenen Strahlgeometrien entwickelt. Die Charakterisierung und Validierung der Kalibrierproben erfolgte mit Hilfe der in der PTB entwickelten Techniken der referenzprobenfreien Röntgenspektrometrie. (B. Beckhoff, FB 7.2, burkhard.beckhoff@ptb.de)

Modernisierung des Normalmessplatzes „Hochtemperaturskala“

Der Normalmessplatzes für die Hochtemperaturskala im Bereich von 962 °C bis über 3000 °C wurde grundlegend modernisiert und ausgebaut. Damit können die zunehmenden Kalibrier- und Messaufgaben aus Industrie und Forschung sowie Forschungsprojekte im Hochtemperaturbereich effizienter und mit kleinerer Messunsicherheit als bisher bearbeitet werden. (S. Schiller, FB 7.3, stephan.schiller@ptb.de)

Emissionsgradmessplatz unter Vakuum in Betrieb genommen

Erste Messungen mit dem Emissionsgradmessplatz unter Vakuum liefern konsistente Ergebnisse im Rahmen der kombinierten Unsicherheit zu dem in internationalen Vergleichen abgesicherten Messplatz an Luft. Der mit dem neuen Messplatz erweiterte Temperaturbereich (-40 °C bis 550 °C) und die geringere Messunsicherheit im Bereich von 0,5 % sind wichtig

für Messungen zur Infrarot-Fernerkundung und Verbesserung des Wirkungsgrads solarthermischer Absorber. (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)

Verbesserte THz-Empfänger durch PTB-Patent

Mit einem PTB-patentierten Design erreicht ein deutscher Hersteller von Energie- und Leistungssensoren für Laserstrahlung einen Technologiesprung in der Terahertz-Detektorentwicklung. Die entscheidenden Messungen zur Charakterisierung der neuartigen Sensorelemente und die Kalibrierung des Detektorprototyps waren am FIT-Messplatz (Fern-Infrarot und THz) der PTB möglich. (A. Steiger, FB 7.3, andreas.steiger@ptb.de)

Neuer „trockener“ Mischkryostat für Tieftemperaturthermometrie

Die kryotechnische Basis für die Realisierung, Darstellung und Weitergabe der internationalen Temperaturskala PLTS-2000 konnte mit der Installation und Inbetriebnahme eines kryogenfreien ³He-⁴He-Mischungskryostatensystems mit einer supraleitenden 8,5-T-Magnetspule wesentlich verbessert werden. Durch den automatischen Kühlbetrieb, der z.B. keine permanente Nachfüllung mit flüssigem Helium mehr erfordert, werden Tieftemperaturkalibrierungen deutlich effizienter durchgeführt werden können. Eine Kernentmagnetisierungsstufe wird es gestatten, Temperaturen bis unterhalb von 1 Millikelvin zu erreichen. (J. Engert, FB 7.4, jost.engert@ptb.de)

Widerstandsthermometer für die Temperaturmessung und Prozesssteuerung in Dampfkraftwerken

Die Genauigkeit von Temperaturmessungen und die hieraus resultierenden Vorgaben bezüglich zulässiger Grenzen bei der Temperaturführung in Dampfkraftwerken sind von erheblicher Bedeutung für den Wirkungsgrad und den Verschleiß der Anlagen und damit für die Stromkosten. Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes mit einem namhaften Energieversorger wurden verbesserte Widerstandsthermometer für Anwendungen im Kraftwerksbereich bis 600 °C untersucht. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)



Bilaterale Vergleichsmessungen von eutektischen Pd-C-Fixpunktzellen bei 1492 °C

Die Schmelztemperaturen von Palladium-Kohlenstoff-Fixpunktzellen unterschiedlicher Geometrie der PTB und des chinesischen „National Institute of Metrology“ (NIM) wurden mit Pt/Pd-Thermoelementen verglichen. Neuartige, in der PTB entwickelte Miniaturfixpunktzellen mit deutlich geringerem Materialeinsatz sollten auf ihre Eignung für die Kalibrierung von Thermoelementen untersucht werden. Eine bemerkenswerte Übereinstimmung der Schmelztemperatur der PTB-Miniaturzellen mit der konventioneller Fixpunktzellen des NIM innerhalb von 0,2 K wurde nachgewiesen. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

Fortschritte bei der Normung von Kalibrierungen von Vakuummessgeräten

Das ISO TC 112 „Vacuum Technology“ hat in den letzten Jahren unter wesentlicher Mitarbeit der PTB die Basis für die Weitergabe der Druckscale im Vakuumbereich gelegt. Ein Vakuumsystem zur Kalibrierung von Vakuummessgeräten nach dem Vergleichsverfahren wurde in der ISO TS 3567 festgelegt, das Prozedere zur Ermittlung der Messunsicherheit beim Vergleichsverfahren in der ISO 27293 (August 2011). Die Definitionen und für eine Kalibrierung nötigen Angaben für Ionisationsvakuummeter wurden in der ISO 27894 festgelegt, eine ähnliche Norm für Quadrupolmassenspektrometer ist in der Genehmigungsphase. Weitere spezielle Normen zu bestimmten Arten von Vakuummessgeräten werden in den nächsten Jahren folgen, so dass bis zum Ende des Jahrzehnts ein vollständiges international geltendes Normengerüst zur Weitergabe der Druckscale im Vakuumbereich vorhanden sein wird. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)

Forschungskooperation mit der AGFW

Der FB 7.6 *Wärme* hat mit der AGFW, dem Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., ein Forschungsvorhaben begonnen, in dessen Rahmen der Einfluss von typischen Einbausituationen auf die Messabweichung von Wärmemengemessgeräten untersucht werden soll. Hierbei werden u.a. der Einfluss von Nennweitensprüngen, aber auch die Auswirkung von raschen Temperaturänderungen des Wärmeträgermediums auf die Anzeigerichtigkeit von derzeit verbreitet eingesetzten Wärmemengenzählern untersucht. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, durch die Schaf-

fung experimentell abgesicherter Daten die Grundlage für eine Weiterentwicklung der mandatierten Fachgrundnorm EN 1434 zu schaffen. (J. Rose, FB 7.5, juergen.rose@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Messungen an Filtern für japanischen Röntgensatelliten

In Zusammenarbeit mit der holländischen Raumfahrtorganisation SRON wurde mit monochromatisierter Synchrotronstrahlung die Transmission von Röntgenfiltern untersucht, die auf dem japanischen Forschungssatelliten ASTRO-H zum Einsatz kommen sollen. An Bord der ab 2014 geplanten Mission befinden sich vier Instrumente, darunter das „Soft X-ray Spectrometer“ für den Nachweis kosmischer Röntgenstrahlung, an dessen Strahlungseintritt die Filter auf einem Filterrad montiert werden. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Charakterisierung der „AsteroidFinder“-Kamera

In einer Forschungskooperation mit dem Institut für Planetenforschung des DLR in Berlin-Adlershof wurde die Charakterisierung einer CCD-Kamera vereinbart, die ab voraussichtlich 2013 auf dem Kompaktsatelliten „AsteroidFinder“ zur Auffindung sehr lichtschwacher Objekte verwendet werden soll. Hierzu wurde in zwei Messblöcken an der MLS das Alterungsverhalten des bildgebenden CCD-Chips mit Synchrotronstrahlung im Vakuum-UV-Spektralbereich untersucht. (A. Gottwald, FB 7.1, alexander.gottwald@ptb.de)

Innovationspreis Synchrotronstrahlung 2011

Ein Team von sechs Kollegen des Ioffe-Instituts in St. Petersburg, des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (DESY) in Hamburg und der PTB in Berlin-Adlershof hat für die gemeinsamen Entwicklungsarbeiten zur Photonendiagnostik von Röntgenlasern über die Photoionisation von Gasen den Innovationspreis Synchrotronstrahlung 2011 des Freundeskreis Helmholtz-Zentrum Berlin e. V. gewonnen. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

Tagung des Arbeitskreises Thermophysik in der PTB

Vom 24. bis 25.3.2011 wurde die Jahrestagung des Arbeitskreises Thermophysik in der GEF-TA an der PTB in Berlin durchgeführt. Mit einem breiten Spektrum von 20 Fachvorträgen

haben sich 50 Teilnehmer aus Industrie und Forschung über aktuelle Entwicklungen im Bereich der thermophysikalischen Forschung und Messtechnik sowie über den Stand von nationalen Vergleichsmessungen informiert. (J. Hollandt, FB 7.3, joerg.hollandt@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Internationaler Vergleich zur radiometrischen Temperaturbestimmung

Ein Vergleich der radiometrischen Temperaturmessung von 1330 °C bis 2475 °C zwischen LNE, NPL, NRC, NIST, NMIA, PTB und VNIIOFI wurde durch die PTB koordiniert und abgeschlossen. Dieser Vergleich fand im Rahmen des Entwicklungsplans für Hochtemperatur-Fixpunkte der CCT-WG5 statt und ist eine wichtige Voraussetzung für die abschließende präzise Bestimmung der Phasenübergangstemperatur der Hochtemperatur-Fixpunkte vor ihrer Einführung in die Internationale Temperaturskala. (K. Anhalt, FB 7.3, klaus.anhalt@ptb.de)

Europäischer Vergleich von „Ohrstrahlern“ (EURAMET 927)

Die Kalibrierung von Infrarot-Ohrthermometern muss gemäß der europäischen Norm EN 12470-5 an Hohlraumstrahlern mit einer erweiterten Messunsicherheit von maximal 70 mK erfolgen. Die PTB hat mit Erfolg an einem Vergleich der nationalen Hohlraumstrahler für die Ohrthermometerkalibrierung von 10 europäischen Staatsinstituten teilgenommen. (B. Gutschwager, FB 7.3, berndt.gutschwager@ptb.de)

Zusammenarbeit mit dem chinesischen Staatsinstitut bei der radiometrischen Temperaturmessung

Im Rahmen einer Kooperation unterstützte die PTB die Entwicklungsarbeit zur Darstellung der spektralen Bestrahlungsstärke für die Kalibrierung von Filtradiometern am chinesischen Staatsinstitut NIM. Dafür wurde abschließend ein Filtradiometer des NIM von beiden Staatsinstituten kalibriert und über die radiometrische Messung der thermodynamischen Temperatur im Bereich von 1000 °C bis 2500 °C ein Vergleich durchgeführt. Die beobachtete Abweichung der Temperaturmessung ist bei 2500 °C besser als 0,5 K. (K. Anhalt, FB 7.3, klaus.anhalt@ptb.de)

Europäisches iMERA-plus-Forschungsprojekt „Candela: Towards quantum-based photon standards“ erfolgreich durchgeführt

In der Arbeitsgruppe *Detektorradiometrie* wurde die Quanteneffizienz eines neuartigen, auf Silizium-Photodioden basierenden Detektors, dem sogenannten „Predictable Quantum Efficient Detector“ (PQED), mit einer extrem kleinen Unsicherheit vom 30 ppm bestimmt. Die Vorhersage der Quanteneffizienz des physikalischen Modells konnte damit im Rahmen der Messunsicherheit bestätigt werden, was einen entscheidenden Schritt zur Etablierung des PQED als Primärnormal für optische Strahlungsleistung darstellt. (L. Werner, FB 7.3, lutz.werner@ptb.de)

Abschluss des iMERA-plus-Projekts zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante

Im Rahmen des Projekts zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante trafen sich im März 2011 die beteiligten Partner in der PTB, um über den erfolgreichen Abschluss des Projektes sowie über Folgeprojekte zu diskutieren. Während der dreijährigen Laufzeit des Projektes wurden große Fortschritte erzielt, die in den nächsten Jahren zu einer Neudefinition der Temperatureinheit führen werden und darüber hinaus zur Weiterentwicklung der thermodynamischen Temperaturmessung und der Internationalen Temperaturskala beitragen. In zahlreichen eingeladenen Vorträgen wurden die Neuerungen einem breiten Fachpublikum aus dem In- und Ausland bekannt gemacht. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

Peer Review des japanischen Staatsinstituts

Die weltweite Anerkennung von Mess- und Prüzfertifikaten im Rahmen des CIPM-MRA erfordert neben der erfolgreichen Teilnahme an Vergleichsmessungen auch die Bereitschaft, die Messprozeduren und verwendeten Apparaturen durch internationale Fachexperten begutachten und bewerten zu lassen. Auf Einladung der nationalen Akkreditierungsstelle von Japan und in Abstimmung mit der regionalen Metrologieorganisation APMP hat ein PTB-Fachexperte eine solche Begutachtung (on-site visit by peers) im Bereich der Berührungsthermometrie des Staatsinstituts von Japan durchgeführt und dessen Reakkreditierung fachlich begleitet. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

Internationaler Workshop zur Temperaturmessung

Unter der Schirmherrschaft des technischen Komitees für Thermometrie der regionalen Metrologieorganisation EURAMET fand im Oktober 2011 ein mehrtägiger Workshop und Trainingskurs zur Bestimmung der Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Fixpunktzellen und Normalthermometern statt, an dem 52 Teilnehmer aus 23 Staaten teilnahmen. Zwei Referenten aus der PTB waren maßgeblich beteiligt. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

EMRP-Projekt IND12 gestartet

Am 1. September 2011 hat das von der EU geförderte, dreijährige EMRP JRP IND12 „Vacuum metrology for production environments“ begonnen. 7 NMIs und 5 Industriepartner bilden das Konsortium, Dr. Jousten von der AG 7.54 *Vakuummetrologie* koordiniert das JRP. Acht Kooperationspartner sind mit dem Projekt verbunden. Die PTB erhält 44 % des 2,8-Mio-€-Budgets. Der Projektumfang beinhaltet 3 wissenschaftliche Arbeitspakete, welche sich mit den Themen dynamisches Kalibrierverfahren von Vakuummessgeräten (Work Package 1, WP1), der Leckratenmessung (WP2) und der Rückführung von Partialdruck- und Ausgasratenmessungen (WP3) befassen. Die PTB wird hauptsächlich Arbeitsaufgaben in WP1 und WP3 bearbeiten. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)

EMRP-Projekt „Powerplants“

Im Rahmen des European Metrology Research Programme (EMRP) leitet die PTB das Forschungsprojekt „Metrology for improved power plant efficiency“. Wesentliches Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Messunsicherheit der Instrumentierung in Kraftwerken zu verringern. Insgesamt wird dadurch eine Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades von Kraftwerken um rund 2 % erwartet. (T. Lederer, FB 7.5, thomas.lederer@ptb.de)

Neufassung harmonisierte Fachgrundnorm EN 1434

In Convenerschaft der Europäischen Normungsarbeit des CEN TC 176 wurden zur Neufassung der Fachgrundnorm EN 1434 für Konformitätsuntersuchungen an Messgeräten ausgetauschter thermischer Energie 29 Workitems behandelt und die europäische Abstimmung eingeleitet. Gemeinsam mit Industrie- und Anwenderverbänden entwickelte

PTB-Beiträge bestehen z. B. in der Entwicklung alternativer beschleunigter Vorhersagemodelle zur Absicherung prognostizierter Messbeständigkeitszeiträume, kombinierter Messgeräte für Wärme- und Kältenetze, energiesparender Prozessfunktionalitäten beim Smart Metering sowie der Netzgestaltung zur Verminderung energetischer Fehlmessungen.

Mit dem DIN wurde eine Initiative gestartet, die die europäische Fachgrundnorm zusätzlich als ISO-Ausgabe erscheinen lassen soll, damit der bewährte Europastandard weltweit zur Abschaffung von Handelshemmnissen anwendbar wird. (J. Rose, FB 7.5, juergen.rose@ptb.de)



Medizinphysik und metrologische Informationstechnik



Berichte der Abteilungen

Vorwort

Das Titelbild des letztjährigen Berichts der Abteilung zeigte die Architektenzeichnung des Observatoriums, des ältesten Gebäudes der PTB, in dem Hermann von Helmholtz als erster Präsident der PTR wirkte. Das diesjährige Titelbild zeigt den Fortschritt der Renovierungsarbeiten im Dezember 2011: Ein architektonisches Schmuckstück ist wiedererstanden, auf das wir stolz sein können.

Durch die exponierte Lage des Gebäudes an der Marchstraße gegenüber dem Nordgelände der Technischen Universität Berlin erhöht sich damit die „Sichtbarkeit“ der PTB für die Öffentlichkeit ganz beträchtlich.

Anlässlich der Berliner Langen Nacht der Wissenschaften im Juni 2011 war der Bau bereits der Mittelpunkt des PTB-Beitrages zur Veranstaltung und zog ein breites Publikum an. Die historischen Tore zur Marchstraße wurden geöffnet und neben vielen Interessenten besuchte uns auch der Präsident der benachbarten Technischen Universität mit den illustren Gästen seiner VIP-Gruppe.

Anlässlich der Feierlichkeiten zum 125-jährigen Jubiläum der PTR/ PTB wird das Gebäude im Oktober 2012 festlich eingeweiht.

Die Öffnung zur TU Berlin findet seit einigen Jahren auch verstärkt auf personeller und fachlicher Ebene statt. Neben Vorlesungsangeboten von Dozenten der PTB an der TU Berlin sind besonders die gemeinsam betreuten Diplomanden und Doktoranden ein belebendes Element der Zusammenarbeit. Um geeignete Stellen für Doktoranden zu schaffen, sind Drittmittelprojekte das ideale Instrument. Daher wird besonderer Wert auf deren Einwerbung gelegt. Der diesjährige Bericht der Abteilung stellt exemplarisch für jeden Fachbereich ein Drittmittelvorhaben mit Beteiligung externer Kooperationspartner vor.

Titelbild:
Fortschritt der Renovierung des Observatoriums im Dezember 2011

Patientensicherheit bei Magnetresonanztomografie

Medizinische Bildgebung mittels Magnetresonanztomografie verwendet starke Hochfrequenzpulse, die im Körpergewebe absorbiert werden und zu lokaler Erwärmung führen können. Um unzulässige Temperaturerhöhungen zu verhindern, verlangen Sicherheitsnormen, dass bestimmte Grenzwerte der spezifischen Absorptionsrate (SAR, gemessen in W/kg) nicht überschritten werden. Das Problem, wie denn die lokale SAR im Inneren eines menschlichen Körpers zu messen sei, um Normenkonformität nachzuweisen, ist metrologisch ungelöst. In der Praxis werden hierzu numerische Simulationsrechnungen eingesetzt. Im Fachbereich 8.1 *Medizinische Messtechnik* wurden innerhalb eines BMWi-geförderten Kooperationsprojekts mit der Firma Rapid, einem mittelständischen Hersteller von HF-Spulen für die MRT, eine systematische Serie solcher Rechnungen mit einem kommerziellen Programmpaket an einem virtuellen menschlichen Kopf durchgeführt. Dabei wurden erratische Schwankungen des ausgegebenen SAR-Maximums beobachtet, wenn die Gitterauflösung der Rechnung nur minimal verändert wurde (Bild 2, schwarze und blaue Punkte). Mit einem selbstentwickelten Algorithmus, der eine selbstkonsistente Mittelung der berechneten Felddaten über ein Normvolumen von 10 g durchführt, traten diese Artefakte nicht auf (Bild 2, rote Punkte). Maximalintensitäts-Projektionen der lokalen SAR sind in Bild 3 gezeigt. Ergebnisse des kommerziellen Programms für eine grobe Gitterauflösung (a) zeigen u. a. einen dominanten SAR-»Hot Spot« im Hinterkopfbereich, der bei einer Rechnung mit höherer Auflösung (b) völlig verschwindet. Unser eigener Mittelungsalgorithmus (c) zeigt diesen „heißen“ Fleck weder bei hohen noch bei geringen Auflösungen und liefert insgesamt leicht geringere SAR-Werte. Eine tiefergehende Analyse ergab, dass der Fehler nicht ursächlich im kommerziellen Programmpaket, sondern vielmehr in einer dort angewandten neuen Norm für numerische SAR-Berechnungen liegt. Diese Norm schreibt ein Mittelungsverfahren vor, das an bestimmten Grenzflächen zu einer massiven (energiesatzverletzenden!) Überschätzung der lokalen SAR führt: ein systematischer Fehlalarm, der nicht zur Patientensicherheit, sondern nur zur Verunsicherung der Anwender führt. Solange die Norm nicht überarbeitet ist, kann der interessierte Nutzer unser selbstentwickeltes Mit-



Bild 1: Impressionen von der Langen Nacht der Wissenschaften im Juni 2011



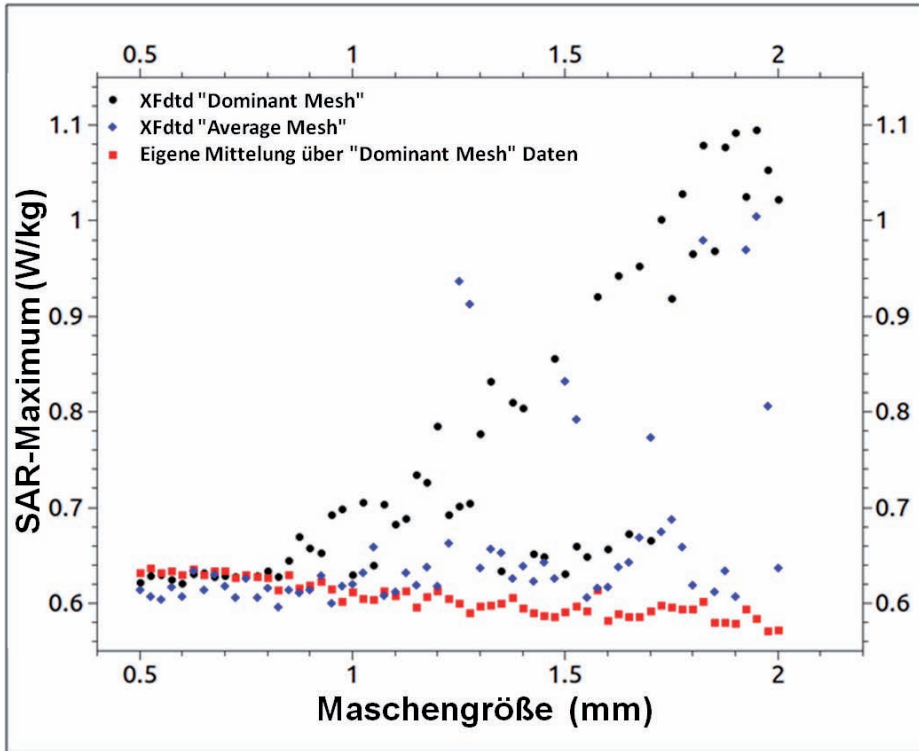
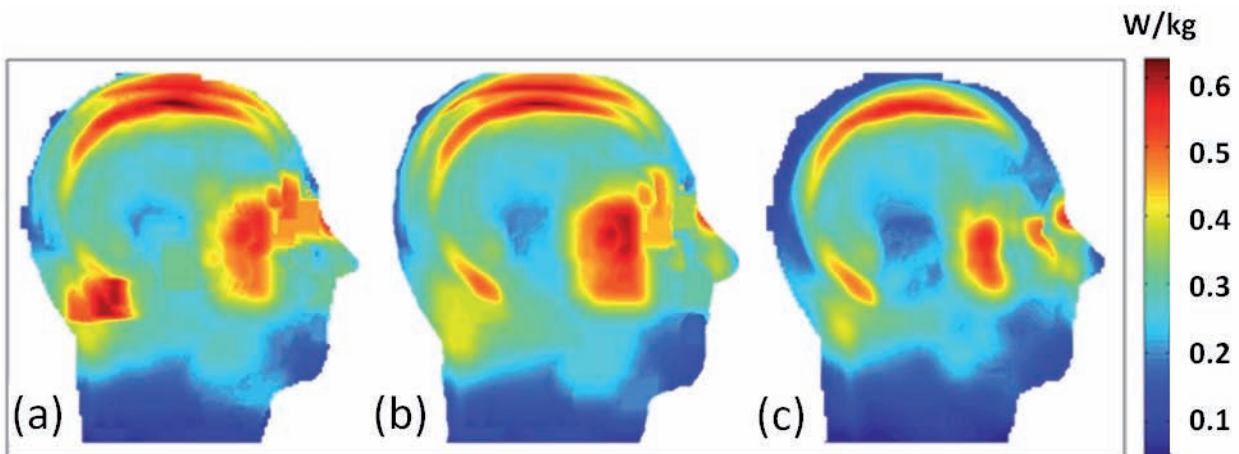


Bild 2: Lokales SAR-Maximum im Kopf des Computermodells „Duke“ (über 10 g Gewebe gemittelt, bezogen auf eine Eingangsleistung $P_{\text{inp}} = 1 \text{ W}$) als Funktion der Maschengröße bei der numerischen Berechnung für drei verschiedene Mittelungsmethoden.

telungsverfahren als Referenz benutzen, um diejenige Gitterauflösung für seine Rechnung zu finden, bei der auch die normenkonforme SAR-Mittelung ein annähernd korrektes Ergebnis liefert (Minima der blauen und schwarzen Kurven in Bild 2).

Bild 3: Maximalintensitäts-Projektionen der SAR-Verteilungen (über 10 g Gewebe gemittelt, bezogen auf eine Eingangsleistung $P_{\text{inp}} = 1 \text{ W}$) im Kopf des Computermodells „Duke“. (a) Auflösung: 2 mm, Mittelung: „XfDTD average mesh“, (b) Auflösung: 0,5 mm, Mittelung: „XfDTD average mesh“, (c) Auflösung 2 mm, Mittelung mit eigenem Algorithmus



Magnetische Messverfahren zur Charakterisierung kleiner magnetischer Nanopartikel

Im Sommer 2008 wurde durch die DFG eine klinische Forschergruppe an der Charité in Berlin eingerichtet, die die Nutzung von magnetischen Nanopartikeln für diagnostische und therapeutische Anwendungen zum Gegenstand hat. Als externer Partner wurde der Fachbereich 8.2 *Biosignale* der PTB in die Forschergruppe aufgenommen. Ihm kam die Aufgabe zu, Messverfahren zum quantitativen Nachweis der magnetischen Nanopartikel zu entwickeln. Der PTB-Fachbereich hatte in der Vergangenheit hierzu schon die Methode der SQUID-Magnetrelaxometrie (MRX) entwickelt, bei der mittels hochempfindlicher Magnetfeldsensoren, sogenannter SQUIDs, das Abklingen der Magnetisierung dieser Partikel

vermessen wurde. Die in der klinischen Forschergruppe eingesetzten magnetischen Nanopartikel haben eine Größe von nur 4 nm–8 nm. Bei Partikeln dieser Größe zerfällt die Magnetisierung jedoch sehr schnell. Die Herausforderung bestand darin, die vorhandene Messtechnik so zu erweitern, dass auch die in der Forschergruppe eingesetzten Partikel nachweisbar wurden.

Zur Lösung des Problems wurden zwei Wege beschritten, die Messung der temperaturabhängigen Relaxation der Magnetisierung und die Entwicklung einer optimierten Aufmagnetisierungseinrichtung.

Bei der temperaturabhängigen Messung wird ausgenutzt, dass sich die Magnetisierungsrelaxation der Partikel bei niedrigen Temperaturen dramatisch verlangsamt. Durch den Einsatz einer Temperiereinrichtung zur Einstellung von Temperaturen im Bereich von 5 K bis Raumtemperatur wurde die Magnetisierung der Partikel als Funktion der Zeit nach Abschalten eines 2-mT-Magnetfeldes über 35 min gemessen. Relaxationskurven bei unterschiedlichen Temperaturen sind in Bild 4 zusammen mit einer mit Nanopartikeln unbeladenen Gewebeprobe als Kontrolle (Bild 4a) dargestellt. Die Spezifität der Signale für magnetische Nanopartikel ist offensichtlich (man beachte die unterschiedlichen Skalierungen). Die stärkste Relaxationsamplitude tritt bei einer Temperatur von etwa 30 K auf. Ursache dafür ist der Übergang vom superparamagnetischen in den ferrimagnetischen (blockierten) Bereich, wie aus der Kurve im Inset der Bild 4b ersichtlich wird. Diese Methode birgt somit ein enormes Potenzial als Verfahren für eine spezifische

Detektion und Charakterisierung der magnetischen Nanopartikel mit sehr kleinen Durchmessern, insbesondere sind Steigerungen der Nachweisempfindlichkeit um mehrere Größenordnungen möglich.

Weiterhin konnte ein neuartiger Aufmagnetisierungsmodus mit einem in der PTB entwickelten 6-Kanal-SQUID-System realisiert werden. Er besteht aus einem Helium-Dewar mit horizontaler Warmbohrung (27 mm Durchmesser), in dem 6 SQUID-Sensoren im Zentralbereich kreisförmig um die Warmbohrung herum zur Detektion der radialen magnetischen Feldkomponente angeordnet sind. Zur Abschirmung äußerer Störungen befindet sich ein supraleitender Niob-Schirm im Dewar.

Für die Anregung der Magnetisierung wurde eine lange einlagige Zylinderspule zur Erzeugung eines homogenen Anregungsfeldes im Probenbereich gefertigt. Die Spule wurde in der Warmbohrung so zu den Sensoren ausgerichtet, dass Magnetfeldlinien parallel zur Aufnahmefläche der SQUIDs verlaufen und so möglichst wenig Anregungsfeld detektieren. In einem ersten Aufbau konnte bereits eine hundertfache Unterdrückung des Anregungsfeldes erreicht werden, sodass die SQUID-Sensoren mit am Probenort herrschenden Feldern von einigen 100 nT noch stabil betrieben werden konnten. Aufgrund der geringen Feldstärke des Magnetisierungsfeldes am Ort der Sensoren war es damit zum ersten Mal möglich, auch während der Magnetisierungsphase messen zu können. Im Gegensatz zur konventionellen MRX-Messanordnung tritt somit keine Totzeit auf, sodass die Anfangsamplitude der

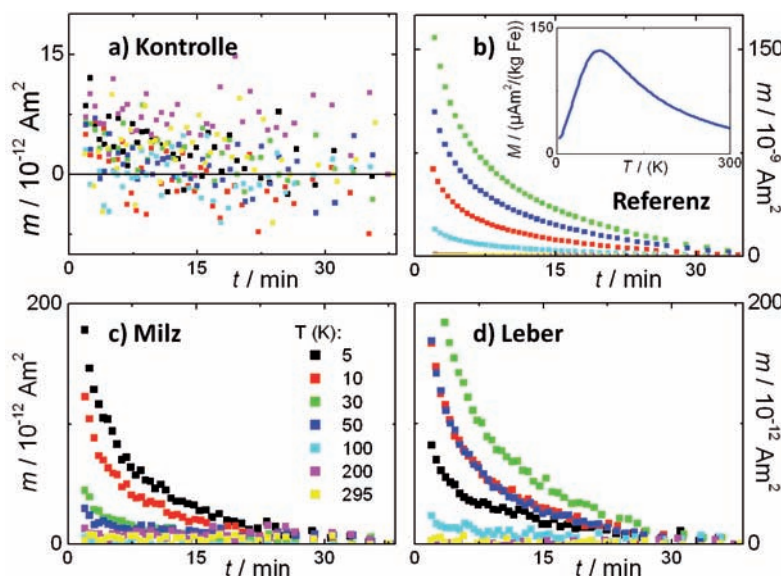


Bild 4: Relaxation der Magnetisierung bei unterschiedlichen Temperaturen nach Abschalten eines Magnetisierungsfeldes von 2 mT. a) Kontrollmessung einer unbeladenen Leber-Gewebeprobe. b) Referenzprobe: Der Inset zeigt den aus der Messung in 1 mT folgenden Übergang vom superparamagnetischen in den blockierten Zustand. c) temperaturabhängige Relaxation in einer Milzprobe und d) in einer Leberprobe. Das Auftreten der maximalen Relaxationsamplitude bei $T = 5 \text{ K}$ in der Milz ($T = 30 \text{ K}$ in der Leber) deutet auf magnetische Nanopartikel mit deutlich kleineren Durchmessern in der Milz.

Relaxation zum Zeitpunkt des Abschaltens erfasst werden kann.

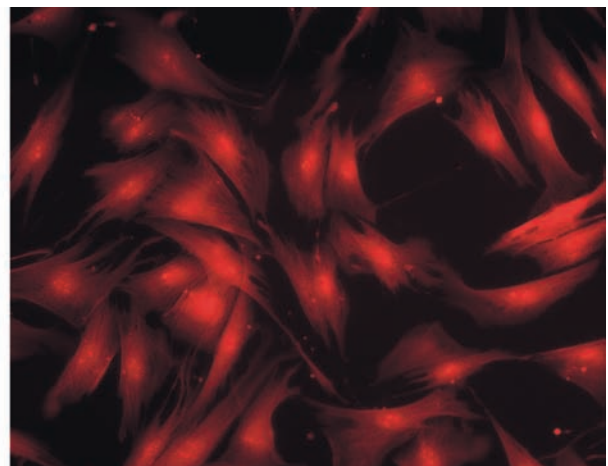
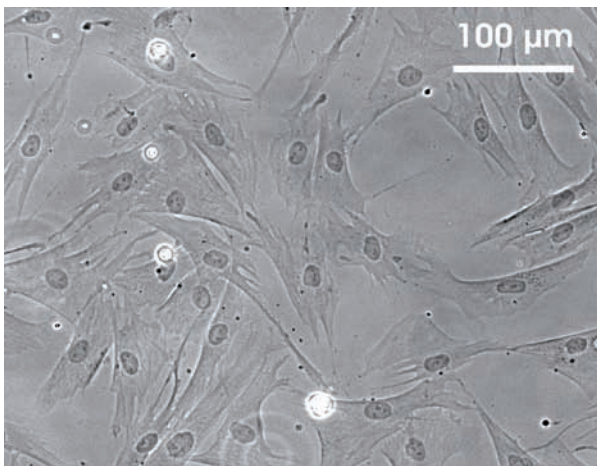
Ein wesentlicher Vorteil dieser beiden Methoden besteht in der Spezifität der magnetischen Signale, da der Gewebehintergrund keine messbare magnetische Relaxation aufweist, wie Kontrollmessungen zeigten. Diese Ergebnisse aus der ersten Projektphase 2008–2011 führten zur Bewilligung einer zweiten Förderphase der klinischen Forschergruppe für den Zeitraum 2012–2015.

Messverfahren auf zellulärer Ebene für die Regenerative Medizin

Im Fachbereich 8.3 *Biomedizinische Optik* werden seit vielen Jahren Arbeiten zur Entwicklung von Referenzmessverfahren für die Zellzählung durchgeführt. Hierzu zählen insbesondere durchflusszytometrische Methoden zur Konzentrationsbestimmung von Blutzellen im Blut, aber auch die Ermittlung des Volumenanteils der roten Blutzellen im Blut sowie die Messung der Hämoglobinkonzentration. Sie werden darüber hinaus ergänzt durch F&E-Arbeiten auf den Gebieten der quantitativen Fluoreszenz-Mikroskopie sowie der quantitativen DNA-Analyse. Die Zielstellung dieser Forschungsaktivitäten lag lange Zeit ganz wesentlich in der Entwicklung und Bereitstellung von Referenzmessverfahren für messtechnische Kontrollen im Rahmen der Qualitätssicherung quantitativer laboratoriumsmedizinischer Untersuchungen, mit deutlichem Schwerpunkt in der Hämatologie.

Bild 5: Quantitative Mikroskopie zur Messung des Zellbedeckungsgrades in Zellkulturen in der regenerativen Medizin. Hellfeld- (links) und Epi-Fluoreszenz-Aufnahme (rechts) von Fibroblast-Zellen.

Die entwickelten Messverfahren lassen sich darüber hinaus aber auch für andere aktuelle Fragestellungen einsetzen und weiterentwickeln, z. B. zur Beurteilung der Qualität von Zell- und Gewebeprodukten in der regenerativen Medizin. Die exploratorische Untersuchung, Erprobung und Weiterentwicklung der vorhandenen Messverfahren für neue Anwendungsfelder ist jedoch oftmals nur mit zusätzlichem Personal sowie neuen Partnern möglich. Hier bieten Drittmittel-geförderte Projekte eine ideale Unterstützung, um einerseits das Risiko eines eventuell nicht tragfähigen neuen Arbeitsgebietes abzumildern, andererseits aber auch, um die erforderlichen Kontakte zu neuen Kooperationspartnern unter vergleichbaren Rahmenbedingungen aufbauen zu können. So wurden z. B. in den vergangenen drei Jahren Arbeiten zur Metrologie auf zellulärer Ebene für die regenerative Medizin im Rahmen des EMRP als iMERA-plus-Projekt „REGENMED“ in Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppen des National Physical Laboratory (NPL, Großbritannien), des Laboratory for Government Chemists (LGC, Großbritannien), des Istituto di Ricerca Metrologia (INRIM, Italien), der Universität Turin (Italien) und der Helsinki University of Technology (TKK, Finnland) durchgeführt. In der PTB wurden insbesondere die Messverfahren zur durchflusszytometrischen und mikroskopischen Zellzählung weiterentwickelt und eingesetzt zur metrologischen Unterstützung bei der Entwicklung von künstlichen Geweben, Untersuchungen zur Anreicherung von seltenen Stammzellen aus dem peripheren Blut, zur Vitalität angereicherter Zellen und zur Messung der relativen Bedeckung von Oberflächen mit Zellen. Der relative Bedeckungsgrad ist z. B. eine wichtige Messgröße, um Zellen in Zellkulturen effizient abzurufen. Die Ergebnisse des Projektes wurden



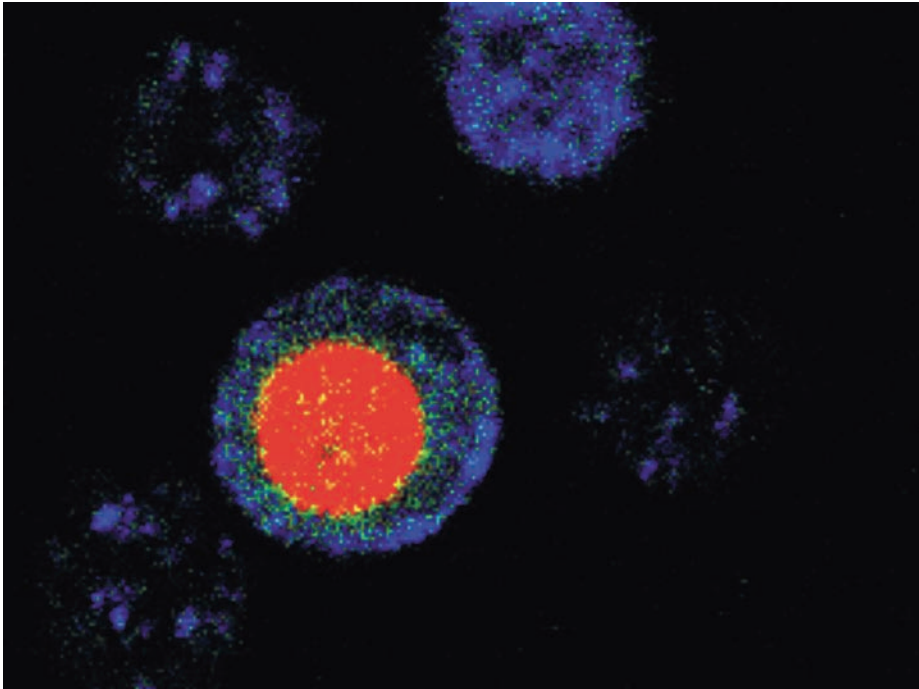


Bild 6: Fluoreszenz-Lebensdauer-Bildgebung zur Messung der Vitalität von Zellen. Rot ($t = 4$ ns) Ethidium-Färbung des Kernes. Blau ($t = 1,5$ ns) Allophycocyanin (APC)-Färbung eines zellspezifischen Oberflächenproteins (CD 14). Die Ethidium-Färbung des Kernes zeigt, dass es sich um eine tote Zelle handelt.

von den beteiligten Partnern im Rahmen einer von der PTB organisierten Sitzung bei dem «World Congress on Regenerative Medicine» im November 2011 in Leipzig vorgestellt und von den Tagungsteilnehmern mit großem Interesse aufgenommen. Die Bilder 5 und 6 zeigen Beispiele aus den Untersuchungen zum Zellbedeckungsgrad und zur Vitalität von Zellen.

Mathematikgestützte Messunsicherheitsbestimmung für industrielle Anwendungen

Der Fachbereich 8.4 *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* arbeitet zurzeit an einer ganzen Reihe von Drittmittelprojekten, die sich mit der Entwicklung mathematischer Verfahren zur Bestimmung von Messunsicherheiten für neue Präzisionsmessverfahren beschäftigen. Dies geschieht in der Regel in enger Zusammenarbeit mit experimentellen Fachbereichen der PTB. Schwerpunkte der Förderung sind derzeit das EMRP, in dem der Fachbereich in vier Projekten beteiligt ist (u. a. zu dynamischen Messungen mechanischer Größen, zur optischen Formmetrologie sowie zur Vermessung von Nanostrukturen durch Scatterometrie), sowie verschiedene Förderprogramme von BMWi und BMBF. Im Folgenden soll ein Projekt zur Verbesserung von Leuchtdichtevermessungen näher beschrieben werden, das zum Zwecke des Technologietransfers gemeinsam mit der TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH durchgeführt und im Rahmen des MN-

PQ-Programms vom Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) finanziell gefördert wird.

Die kamerabestückte Nahfeld-Goniophotometrie (Bild 7) ermöglicht eine hochgenaue Vermessung von Leuchtdichteverteilungen von Lampen und Reflektoren (Bild 8). Wichtig sind diese Messungen z. B. in der Automobilindustrie, um vorgegebene Spezifikationen für Scheinwerfer oder Armaturen zu erreichen oder um energieeffizienten LED-Leuchten genau zu charakterisieren. Aus der Leuchtdichteverteilung können darüber hinaus alle relevanten photometrischen und radiometrischen (Fernfeld-) Größen (z. B. Lichtstärkeverteilungskörper) der Strahlungsquelle abgeleitet werden. Für Konformitätsbewertungen der kamerabestückten Nahfeld-Goniophotometrie ist die zuverlässige Bestimmung von Messunsicherheiten notwendig. Aufgrund der hochkomplexen, mehrdimensionalen und vor allem anwendungsspezifischen Messtechnik war dies bisher nur in Ansätzen möglich.

Im Rahmen des Projekts soll jetzt eine deutlich zuverlässigere Bestimmung von Messunsicherheiten für diese Anwendung ermöglicht werden. Gemeinsam mit den Arbeitsgruppen *Photometrie* und *Hochtemperaturskala* sowie der TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH Ilmenau entwickelt die Arbeitsgruppe *Datenanalyse und Messunsicherheit* ein mathematikgestütztes Verfahren für diesen Zweck.

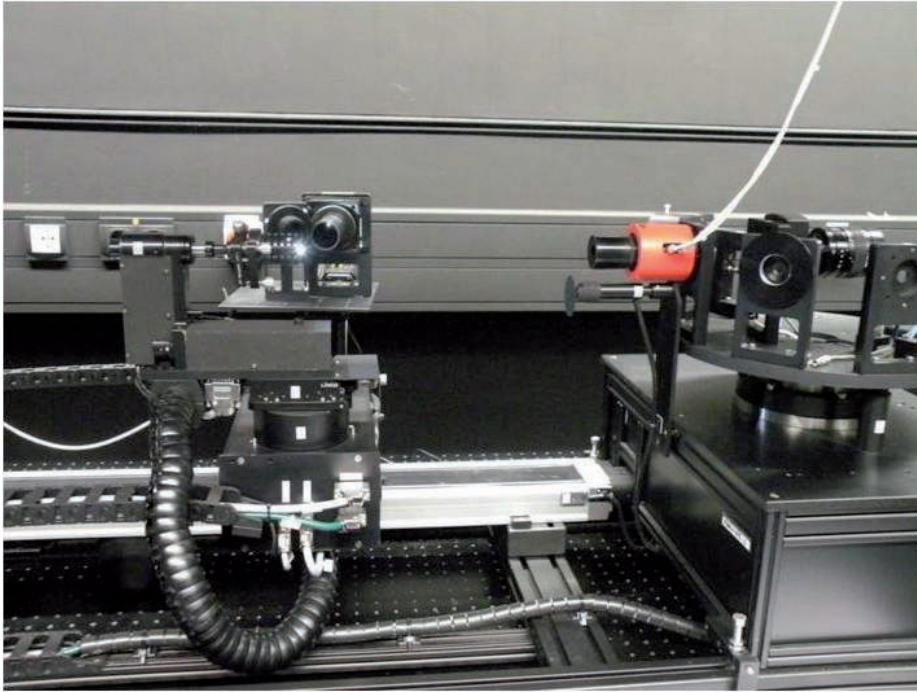
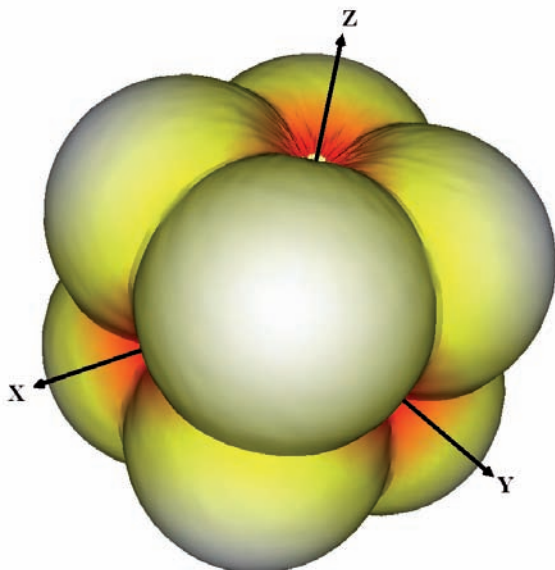


Bild 7: Aufbau eines kamerabestückten Nahfeldgoniophotometers

Dazu wurde ein Computermodell aufgestellt und implementiert, das den Messprozess einschließlich aller wesentlichen Unsicherheitsquellen realistisch modelliert. So werden in dem Modell sowohl mögliche Fehler in der Positionierung und Ausrichtung des Goniometeraufbaus als auch Einflüsse der Kameraoptik berücksichtigt. Das Computermodell erlaubt es, Sensitivitätsanalysen durchzuführen und somit den Einfluss verschiedener Unsicherheitsquellen zu quantifizieren.

Bild 8: Lichtstärkeverteilungskörper einer homogen leuchtenden Würfeloberfläche



Sichere Kommunikation von Messdaten

Der Fachbereich 8.5 *Metrologische Informationstechnik* befasst sich seit ca. einer Dekade mit F&E-Projekten, die auf die Wirtschaft und auch auf die Infrastruktur des gesetzlich geregelten Messwesens ausgerichtet sind. Kerngegenstand dieser Vorhaben ist die Sicherung von Messdaten bei sich ständig wandelnden Informations- und Kommunikationstechnologien.

Ein aktuelles Vorhaben ist das im Jahre 2010 begonnene und im Rahmen des EMRP geförderte Vorhaben „Metrology for Smart Electrical Grid“ mit den Projektpartnern Energieforschungszentrum Niedersachsen, METAS, NPL, University of Strathclyde und Technische Universität Braunschweig. Darin werden messtechnische Konzepte zur Beobachtung und Steuerung von dezentralen Energienetzen mit dem Ziel erarbeitet, deren Betriebssicherheit zu erhöhen. Im Fokus stehen dabei Mittel- und Niederspannungsnetzwerke, die gegenwärtig über keine ausreichende Messinfrastruktur verfügen. Durch die kontinuierlich steigende Anzahl an Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen als dezentrale Energieerzeuger werden bisher so nicht bekannte Stabilitätsprobleme aufgeworfen. Durch Modellierung, Simulation und Netzwerkanalyse sollen optimierte Entwurfs- und Steuerungsverfahren für die neuen, messtechnisch gestützten Netzwerktopologien erarbeitet werden. Dazu gehört auch die Untersuchung der Integrationsmöglichkeiten von elektrisch betriebenen Fahrzeugen in ein de-



zentrales Energienetz. Im Arbeitspaket „Smart grid system state for stabilised power flow“ befasst sich der Fachbereich *Metrologische Informationstechnik* mit der Entwicklung geeigneter Konzepte zur sicheren Kommunikation der Messdaten für den Betrieb von Netzsteuersystemen.

Bei der Bearbeitung dieses Vorhabens kann auf Ergebnisse früherer Vorhaben aufgebaut werden. Zu nennen ist zunächst das in den Jahren 2002 bis 2005 durchgeführte und vom BMWi geförderte Projekt SELMA (Sicherer Elektronischer Messdatenaustausch). In diesem Projekt ist in Zusammenarbeit der PTB mit Wissenschaft, Zählerherstellern und Energieversorgern der Grundstein für ein sicheres Datenübertragungskonzept bei verteilten Energienetzen gelegt worden. Aufbauend darauf ist der Grundansatz in den Jahren 2008 bis 2011 in Zusammenarbeit von PTB und Wirtschaft im Rahmen des INSIKA-Projektes (Integrierte Sicherheitslösung für messwertverarbeitende Kassensysteme) weiterentwickelt worden. Dieses Projekt wurde im Rahmen des MNPQ-Programms durch das BMWi gefördert. In INSIKA sind das entwickelte Prinzip der strukturellen und inhaltlichen Datenanalyse in den Sicherheitsmodulen, die entwickelten Verifikationshilfsmittel und die Methode zur Gültigkeits- und Vollständigkeitsprüfung von aufgezeichneten Daten von besonderer Bedeutung. Dadurch werden unerkannte Veränderungen, Streichungen oder Hinzufügungen zu den Daten ausgeschlossen.

Ein weiteres aktuelles Vorhaben, ebenfalls in Zusammenarbeit mit der Industrie und gefördert durch das BMWi im Rahmen des 5. Energieforschungsprogramms, ist das im Jahre 2010 begonnene On-Board-Metering-Projekt (OBM). Dabei handelt es sich um eine komplexe messtechnische Systemlösung für Elektrofahrzeuge, die in die aktuelle E-Mobility-Landschaft Deutschlands integriert werden soll. Im Unterschied zu klassischen Vorgehensweisen, bei denen die geladene Elektroenergie in der Ladesäule gemessen wird, wird die Messtechnik in das Fahrzeug integriert. Bei der Umsetzung dieses Ansatzes sind besondere eichrechtliche Anforderungen sowie Anforderungen an Datenschutz und Datensicherheit zu erfüllen. Hier kann ebenfalls auf die Ergebnisse der Vorgängerprojekte SELMA und INSIKA zurückgegriffen werden, und es besteht eine Querverbindung zu dem oben erwähnten EMRP-Vorhaben, bei dem grundsätzlich auch die Anforderungen der Elektromobilität beachtet werden sollen. Eine besondere Herausforderung im OBM-Vorhaben stellt die Integration der Messtechnik in das Fahrzeug dar. Damit verbunden sind Fragen der korrekten Energieabrechnung und der Überwachung der mobilen Zähler durch die Eichbehörden. Bisher konnten erste Labormuster und Testanlagen erfolgreich in Betrieb genommen werden. Danach sind umfangreiche Feldtests geplant.

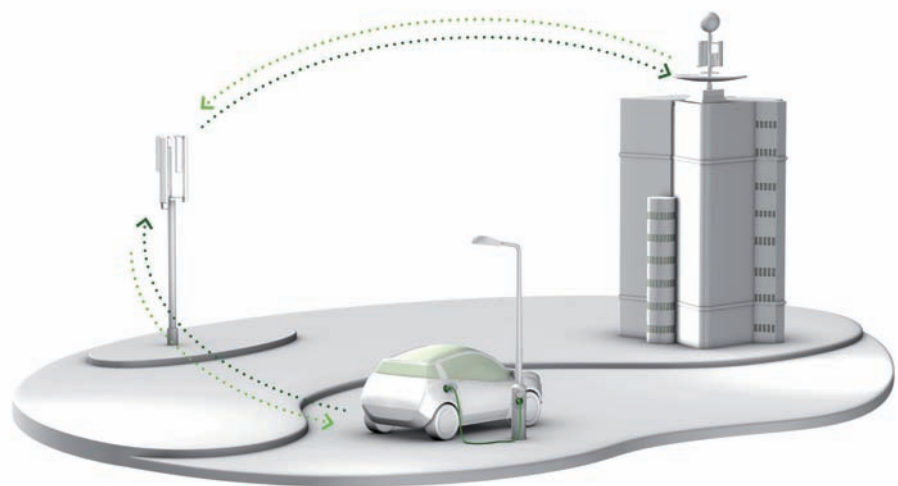


Bild 9: Mobiles Messen für die E-Mobility

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

Neues Projekt zur Standardisierung von Verfahren zur (Relativ-) Bestimmung von Zellkonzentrationen in Körperflüssigkeiten

Die Arbeiten zur Fördermaßnahme des BMWi im Rahmen des Programms „Transfer von FuE-Ergebnissen durch Normung und Standardisierung“ dienen der Erarbeitung internationaler Normvorlagen für die Standardisierung primärer und sekundärer Referenzmessverfahren für die Zellzählung. Ziel ist die Erstellung konsolidierter Normen, die im Gegensatz zu den bisherigen (nationalen) Normen der Reihe DIN 58932 für verschiedene Targetzellen gelten. (M. Kammel, FB 8.3, martin.kammel@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

Analyse von „key comparisons“

In der PTB wurde ein neues Verfahren auf Basis der Bayes'schen Statistik zur Auswertung von Ringvergleichen entwickelt, das eine Analyse auch im Falle von inkonsistenten Daten und einer zeitlichen Änderung des Transferstandards erlaubt. Die Methode wurde erfolgreich bei mehreren „key comparisons“ eingesetzt, bei denen die PTB als „Pilot“ fungierte. (A. Link, FB 8.4, alfred.link@ptb.de; O. Bodnar, FB 8.4, olha.bodnar@ptb.de; K. Klauenberg, FB 8.4, katy.klauenberg@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

EMRP-Projekt „Metrology for Smart Electrical Grid“ gestartet

Mit über 20 Partnern aus 18 europäischen Ländern ist das Vorhaben „Metrology for Smart Electrical Grid“ im Rahmen des EMRP gestartet. Die PTB ist in diesem Vorhaben am Arbeitspaket „Smart grid system state for stabilised power flow“ beteiligt. Dabei sollen grundlegende Fragen der Modellierung und Steuerung von Mittelspannungs- und Niederspannungsnetzen unter Berücksichtigung von Sicherheitsanforderungen beantwortet werden. Ziel ist die Verbesserung der Betriebssicherheit von Energienetzen unter den veränderten Bedingungen der dezentralen Energieerzeugung und veränderten Prozessen der Energieverteilung. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de; G. Gewiss, FB 8.5, gunner.gewiss@ptb.de)

Statistisches Verfahren zur Auswertung scatterometrischer Messungen

Die Maximum-Likelihood-Methode zur Bestimmung der Messunsicherheiten in der Scatterometrie wurde so erweitert, dass auch systematische Beiträge zur Messunsicherheit, wie sie z. B. Linienrauigkeiten verursachen, berücksichtigt werden. Die verbesserte Methode wurde auf Messdaten des DUV-Scatterometers der PTB angewandt, um die auftretenden systematischen Einflüsse und die zugehörigen Messunsicherheiten zu quantifizieren. (M.-A. Henn, FB 8.4, mark-alexander.henn@ptb.de; H. Groß, FB 8.4, hermann.gross@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de; M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

Statistische Bewertung von Auswerteverfahren zur Bestimmung der Linienstärke von CO₂

Die genaue Kenntnis von Linienstärken ist wesentlich für die quantitative CO₂-Spektroskopie. In einer Studie wurden ein parametrisches und ein nicht-parametrisches Verfahren zur Bestimmung von Linienstärken mit statistischen Methoden untersucht. Als Ergebnis konnten das bisher in der PTB eingesetzte nicht-parametrische Verfahren bestätigt sowie mögliche Probleme des parametrischen Verfahrens aufgezeigt werden. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

Wiederholgenauigkeit von Vakuummessgeräten

Im Rahmen der Kalibrierung von Vakuummessgeräten der Industrie bestimmt die PTB auch die Variabilität der Gerätemessungen. Jedoch variieren die wiederholt zu messenden Drücke und überdecken somit die Gerätevariabilität. Zur Schätzung von Wiederholgenauigkeiten wurde nun ein Bayes'sches Verfahren entwickelt, das die Varianzen statistisch trennt – auch wenn diese sich bis zu zwei Größenordnungen unterscheiden. (K. Klauenberg, FB 8.4, katy.klauenberg@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)



Effiziente Implementierung von Monte-Carlo-Methoden für die Dynamik

Es wurde eine sequentielle Implementierung von Monte-Carlo-Methoden für die Analyse dynamischer Messungen entwickelt, welche die zuverlässige Bestimmung von Messunsicherheiten bei der Anwendung digitaler Filter, deren Koeffizienten nur begrenzt bekannt sind, auch auf Desktop-Computern ermöglicht. (S. Eichstädt, FB 8.4, sascha.eichstaedt@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

Grundlagen Messunsicherheit

Zu den Grundlagen der Bestimmung von Messunsicherheiten wurden weitere wichtige Beiträge geleistet. So konnte die Anwendbarkeit von „Supplement 1 to the GUM“ für nichtlineare Funktionen bei normalverteilten Messdaten in einer Veröffentlichung demonstriert werden. Zum anderen wurden Limitierungen der aktuellen Leitlinien für die nichtlineare Regression aufgedeckt und ein verbessertes Verfahren vorgeschlagen. (O. Bodnar, FB 8.4, olha.bodnar@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

Analyse des GUM aus der Sicht des Software-Engineering

Im Zusammenhang mit dem Nachweis der GUM-Konformität von Softwarepaketen zur Berechnung von Messunsicherheiten ist erstmals eine Analyse des internationalen Standards aus Sicht des Software-Engineering vorgenommen worden. Die Analyse zeigt auf, welche Festlegungen bei der Implementierung von GUM-unterstützender Software notwendig sind, um rückführbare und vergleichbare Messunsicherheitsbewertungen auch bei Verwendung unterschiedlicher Softwarepakete zu erreichen. Sie liefert Anstöße für ergänzende, implementationsbezogene Empfehlungen zum GUM. (H. Schrepf, FB 8.5, heike.schrepf@ptb.de; N. Greif, FB 8.5, norbert.greif@ptb.de)

Fortbildung Messunsicherheit

Der Fachbereich „Mathematische Modellierung und Datenanalyse“ hat die Aus- und Fortbildung im Bereich Messunsicherheit für die PTB übernommen. In diesem Jahr wurden fünf eintägige Veranstaltungen in Braunschweig und Berlin mit insgesamt ca. 90 Teilnehmern durchgeführt. Die Fortbildung behandelt statistische Grundlagen, praktische Beispiele sowie moderne Berechnungsverfahren (Monte-Carlo-Methoden). (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.

wuebbeler@ptb.de; S. Mieke, FB 8.4, stephan.mieke@ptb.de)

Magnetresonanzbildgebung erstmalig in Feldern deutlich unterhalb des Erdmagnetfelds gelungen

Magnetresonanzbildgebung, wie sie in der klinischen Diagnostik Anwendung findet, wird üblicherweise in Magnetfeldern betrieben, die um fünf Größenordnungen stärker sind als das Erdmagnetfeld von ca. 40 μT . In einem neu fertiggestellten Abschirmraum wurde an einem einfachen Phantom in einem Feld von 17 μT und einer kernmagnetischen Resonanzfrequenz von 730 Hz eine 2D-Bildgebung mit einer räumlichen Auflösung von 1,5 mm realisiert. (R. Körber, FB 8.2, rainer.koerber@ptb.de; I. Hilschenz, FB 8.2, ingo.hilschenz@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Tracerverhalten von Resovist geklärt

Magnetic Particle Imaging (MPI) ist ein neuartiges Bildgebungsverfahren, das mit hoher zeitlicher Auflösung die Verteilung magnetischer Nanopartikel im lebenden Organismus darstellen kann. Untersuchungen der magnetischen Eigenschaften des zugelassenen Kontrastmittels Resovist durch die PTB ergaben, dass im Resovist ca. 30 % der Partikel in sogenannten Mehrkernteilchen oder Clustern organisiert sind, die eine mittlere Größe von ca. 22 nm aufweisen. Damit konnte aufgeklärt werden, warum sich dieses Kontrastmittel so gut als MPI-Tracer eignet, obwohl es wesentlich kleinere Partikel enthält, die für das MPI-Verfahren praktisch unsichtbar sein müssten. (D. Eberbeck, FB 8.2, dietmar.eberbeck@ptb.de)

Bewertung der Fluoreszenz zum Nachweis rheumatischer Erkrankungen der Fingergele

In einem durch die Investitionsbank Berlin (IBB) mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) geförderten Projekt mit mehreren Kooperationspartnern wurden im Rahmen einer klinischen Studie dynamische Daten (Fluoreszenzbildserien) zur Rheumadiagnose erhoben. Zur objektiven Bewertung dieser Daten wurde von der PTB ein quantitatives Auswerteverfahren für die Analyse der Bildserien entwickelt. (B. Ebert, FB 8.3, bernd.ebert@ptb.de; J. Voigt, FB 8.3, jan.voigt@ptb.de; R. Macdonald, FB 8.3, rainer.macdonald@ptb.de)

Neue polymerische Nah-Infrarot Proben zur gezielten Darstellung von Entzündungen

Dendritisches Polyglyceroel wurde zur Synthese eines polyanionischen makromolekularen Konjugates mit einem Nah-Infrarot-fluoreszierenden Farbstoff eingesetzt. Die Akkumulation des Konjugates in vivo wurde mittels Fluoreszenzbildgebung an einem Tiermodell nachgewiesen. Auf diese Weise konnten gesunde Gelenke von erkrankten bereits nach wenigen Minuten differenziert werden. (B. Ebert, FB 8.3, bernd.ebert@ptb.de; R. Macdonald, FB 8.3, rainer.macdonald@ptb.de)

Validierung eines neuen Verfahrens zur DNA-Isolation für die PCR

Genomische DNA muss vor der Amplifikation mittels PCR (Polymerasekettenreaktion) isoliert und aufgereinigt werden. Üblicherweise wird hierfür die Festphasenextraktion mittels Silikagelmembranen (Adsorptionschromatografie) eingesetzt. In der Dr. Lerche KG wurde kürzlich ein Alternativverfahren entwickelt, welches einen umgekehrten Verfahrensablauf („reverse purification“) durch Anwendung eines neu entwickelten porösen Trägermaterials für die Größenausschlusschromatografie realisiert. Im Rahmen eines gemeinsamen MNPQ-Projektes wird derzeit die Eignung dieser innovativen Technik hinsichtlich Reinheit und Qualität der gewonnenen hochmolekularen DNA im Vergleich zu kommerziellen Kits untersucht und quantitativ validiert. (S. Schädel-Ebner, FB 8.3, sandra.schaedel-ebner@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

Validierung der AHD-Methode als Referenzmessverfahren zur Bestimmung der Hämoglobinkonzentration in Blut

In Zusammenarbeit mit der Medisynthana Diagnostics GmbH & Co. KG im Rahmen eines MNPQ - Projektes werden an Frisch- und Kontrollblutproben Vergleichsmessungen zur Bestimmung der Hämoglobinkonzentration unter Anwendung der AHD (Alkalisches Hämatin und Detergenz)-Methode und der etablierten HiCN (Cyanhämglobin)-Methode durchgeführt. Im Rahmen der Messunsicherheit wird eine gute Übereinstimmung beider Methoden beobachtet. (S. Schädel-Ebner, FB 8.3, sandra.schaedel-ebner@ptb.de; K. Witt, FB 8.3, klaus.witt@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

Abschirmraum für Kernresonanz im niedrigen Feld erreicht rekordverdächtige Werte

Für kernmagnetische Resonanzmessungen im niedrigen Feld wurde 2010 ein neuer magnetischer Abschirmraum aufgebaut. Für die hier vorgesehene Anwendung wurde besonderer Wert auf ein niedriges statisches Restfeld gelegt. Von den PTB-Mitarbeitern wurden hierzu neue Verfahren zur Entmagnetisierung der Kammerwände entwickelt. Mit diesen Verfahren konnte das Restfeld und die Restfeldhomogenität im Abschirmraum auf weniger als 2 nT bzw. 2nT/m verbessert werden. (A. Schnabel, FB 8.2, allard.schnabel@ptb.de; J. Voigt, FB 8.2, jens.voigt@ptb.de)

Mess- und Sicherheitskonzept für On-Board-Metering

Die PTB ist an der Entwicklung eines alternativen Infrastrukturkonzeptes der Elektromobilität beteiligt, bei der die Messtechnik nicht in der Ladesäule, sondern im Fahrzeug integriert ist. Dafür wurden die Anforderungen an die mobile Messtechnik sowie an die erforderlichen Sicherheitskomponenten mit dem Ziel erarbeitet, die Vertrauenswürdigkeit abgerechneter Energiemengen zu gewährleisten. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de; J. Neumann, FB 8.5, joerg.neumann@ptb.de; J. Weil, FB 8.5, jan.weil@ptb.de)

Mathematik und Statistik für neues EMRP-Projekt „Dynamic“

Die PTB wird einen wesentlichen Beitrag für das Forschungsprojekt „Dynamic“ im Bereich der Datenanalyse leisten. Dieses Projekt wurde im Rahmen des Calls „Industry“ im European Metrology Research Programme (EMRP) zur Förderung ausgewählt. Ziel ist die rückführbare Kalibrierung und Messung der dynamischen Größen Kraft, Drehmoment und Druck. Eine wesentliche Aufgabe ist die Entwicklung von Verfahren der Datenanalyse für die Auswertung von dynamischen (Kalibrier-) Messungen, wobei die Bestimmung von Messunsicherheiten eine besondere Herausforderung darstellt. (S. Eichstädt, FB 8.4, sascha.eichstaedt@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

Mathematik für neues EMRP-Projekt „Form Metrology“

Die PTB wird einen wesentlichen Beitrag für das Forschungsprojekt „Form Metrology“ im Bereich der Datenanalyse leisten. Dieses Projekt wurde im Rahmen des Calls „Indu-

stry“ im European Metrology Research Programme (EMRP) zur Förderung ausgewählt, und es wird wichtige technische Herausforderungen bei der Messung der Form optischer Oberflächen bearbeiten. (C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

Modellierung des Einflusses der Rauigkeit von Linienstrukturen in der Scatterometrie

Die scatterometrischen Messverfahren der PTB ermöglichen eine indirekte Messung kritischer Strukturgrößen von lithografischen Masken mit einer Genauigkeit im Nanometerbereich. Zur Verbesserung der Auswerteverfahren, die die Bestimmung der Messunsicherheit einschließen, wurde der Einfluss von Linienrauheit mittels 2D-FEM Simulationsrechnungen für typische EUV-Maskenstrukturen untersucht. (H. Groß, FB 8.4, hermann.gross@ptb.de; S. Heidenreich, FB 8.4, sebastian.heidenreich@ptb.de; M.-A. Henn FB 8.4, mark-alexander.henn@ptb.de; M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

Erstellung eines Computermodells für die kamerabestückte Nahfeld-Goniophotometrie

Im Rahmen eines mit der Firma TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH Ilmenau durchgeführten MNPQ-Projektes wurde ein realistisches Computermodell des Messaufbaus entwickelt und implementiert. Das Computermodell ermöglicht die Durchführung virtueller Experimente zur Ermittlung relevanter Störeinflüsse sowie zur Charakterisierung der Genauigkeit der kamerabasierten Nahfeldgoniophotometrie und wurde im Rahmen des Projektes bereits an den Industriepartner transferiert. (F. Schmähling, FB 8.4, franko.schmaehling@ptb.de; G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de)

Mathematik für neues EMRP-Projekt „Scatterometry“

Die PTB wird einen wesentlichen Beitrag für das Forschungsprojekt „Scatterometry“ im Bereich der Datenanalyse leisten. Dieses Projekt wurde im Rahmen des Calls „Industry“ im European Metrology Research Programme (EMRP) zur Förderung ausgewählt, und es wird wichtige messtechnische Herausforderungen bei der Charakterisierung von Nanostrukturen für die Herstellung von elektronischen und optischen Bauelementen bearbeiten. (M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de, H. Groß, FB 8.4, hermann.gross@ptb.de)

Virtuelle Experimente für das neue Ebenheitsreferenzsystem

Die in der PTB entwickelte Simulationsumgebung zur Durchführung virtueller Messungen für die optische Formmetrologie wurde weiterentwickelt und zur Bestimmung der Genauigkeit eines neuen (deflektometrischen) Ebenheitsstandards angewendet. Als Ergebnis konnte gezeigt werden, dass der neue Standard Messunsicherheiten von unter 1 Nanometer selbst für große Prüflinge ermöglicht. (M. Stavridis, FB 8.4, manuel.stavridis@ptb.de; G. Ehret, FB 4.2, gerd.ehret@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Multimodale Messungen bei Multipler Sklerose

In einem Kooperationsprojekt der PTB mit der Charité – Universitätsmedizin Berlin – wurde bei Patienten mit schubförmig-remittierender Multipler Sklerose (MS) mittels Hochfeld-Magnetresonanztomografie die Konzentration des Neuronenmarkers N-Acetylaspartat (NAA) in drei Gehirnregionen bestimmt und mit einem in der PTB entwickelten Auswerteverfahren quantifiziert. Zudem wurde an der Charité mit der optischen Kohärenztomografie die Schichtdicke der retinalen Nervenfasern als Maß für die Schädigung des vordersten Teils der Sehbahn gemessen. Die Ergebnisse wurden mit Magnetresonanztomografie-Aufnahmen verglichen. Die mit diesem neuen multimodalen Ansatz ermittelten Ergebnisse könnten die Verlaufskontrolle der Krankheit verbessern. (F. Schubert, FB 8.1, florian.schubert@ptb.de)

Ortsaufgelöste Metabolitbestimmung im Gehirn mit „SPECIAL“

Körpereigene Stoffe im Gehirn, sogenannte Metaboliten, spielen etwa bei neurologischen Erkrankungen eine Rolle. Ihre Konzentration und ihr Ort im Gehirn lassen sich jetzt genauer bestimmen, indem die sogenannte SPECIAL-Magnetresonanz-Spektroskopie (MRS)-Methode mit der spektroskopischen Bildgebung bei 3 Tesla kombiniert wird. Bei Untersuchungen am klinischen MR-Tomographen der PTB an Probanden konnte simultan die Konzentration von bis zu 14 verschiedenen Metaboliten ortsgenau bestimmt werden. Es war der erste Einsatz der SPECIAL-Methode für die spektroskopische Bildgebung auf einem klinischen MRT-Scanner. (R. Mекle, FB 8.1, ralf.mekle@ptb.de)

Erstmalige Messung von GABA in der Amygdala

Durch Kombination von präziser Justage der Hochfrequenzsendeleistung, des Einsatzes speziell entwickelter Sequenzen („FAST(EST) MAP“) für eine verbesserte Homogenisierung des lokalen Magnetfeldes im Zielvolumen und der Verwendung optimierter Sequenzen („SPECIAL“) für die MR-Spektroskopie mit kurzer Echozeit ist es gelungen, den inhibitorischen Neurotransmitter GABA in der menschlichen Amygdala zu messen und zu quantifizieren. Die Amygdala gilt als „Angstzentrum“ im Gehirn. Die klinischen Kooperationspartner hoffen, durch diese Ergebnisse bessere Einblicke in die Funktion der Amygdala zu gewinnen. (R. Mekle, FB 8.1, ralf.mekle@ptb.de)

Zweidimensional anregen – drei Dimensionen messen

Räumlich selektive Anregung (SSE) ist ein vielversprechendes neues Verfahren in der Magnetresonanztomografie (MRT), mit dem es möglich ist, sich einen interessierenden Ausschnitt z. B. des Gehirns „herauszuzoomen“ und mit höherer Auflösung aber ohne höhere Messzeit zu vermessen. Durch ein verbessertes Pulsberechnungsverfahren, das in der PTB entwickelt und am 7-T-Tomografen der Berliner Ultrahochfeld Facility in Berlin-Buch getestet wurde, ist es jetzt gelungen, 2D-SSE-Pulse mit besonders hoher Bandbreite zu berechnen. Mit diesen Pulsen werden Artefakte dramatisch reduziert, sodass jetzt ohne zeitlichen Mehraufwand Daten in guter Qualität über die gesamte Tiefe des Gehirns gemessen werden können. (T. Lindel, FB 8.1, tomasz.lindel@ptb.de)

Räumlich aufgelöste Quantifizierung magnetischer Nanopartikelanreicherungen mit inhomogener Aufmagnetisierung

Die Anwendung magnetischer Nanopartikel in der medizinischen Diagnose und Therapie ist Gegenstand intensiver Forschung. Es wurde ein Messaufbau realisiert, bei dem inhomogene Anregungsfelder die räumliche Verteilung mehrerer Nanopartikelproben kodieren. Gleichzeitig durchgeführte theoretische Untersuchungen und Simulationen zeigen, dass sich aus dem von den aufmagnetisierten Proben erzeugten Magnetfeld eine quantitative räumliche Bildgebung der Nanopartikel im biologischen Gewebe realisieren lässt. (M. Liebl, FB 8.2, maik.liebl@ptb.de; U. Steinhoff, FB 8.2, uwe.steinhoff@ptb.de)

NMR-Spektrometer für die Charakterisierung magnetischer Nanopartikel

Mit einem zeitauflösenden NMR-Spektrometer (mq60, Bruker Biospin) für die flexible Bestimmung der T1- und T2-Relaxationszeiten steht der PTB ein weiteres wertvolles Werkzeug für die Charakterisierung von magnetischen Nanopartikeln zur Verfügung. Mit diesem Gerät sollen im Feldstärkebereich klinischer MR-Tomographen (1,5 T) Referenzmessungen an Flüssigkeiten und Suspensionen magnetischer Nanopartikel zur Untersuchung ihres Verhaltens als Kontrastmittel, als Sonden und als Arzneimittelträger für die medizinische Anwendung durchgeführt werden. (N. Loewa, FB 8.2, norbert.loewa@ptb.de; F. Wiekhorst, FB 8.2, frank.wiekhorst@ptb.de)

Quantifizierung magnetischer Nanopartikel in Arterien

Für den Einsatz magnetischer Nanopartikel in der Medizin ist die quantitative Kenntnis ihrer Verteilung im Gewebe erforderlich. Mit Hilfe eines Multipolansatzes für linear ausgedehnte Partikelverteilungen in Arterien nach magnetischem Drug-Targeting wurde ein Verfahren zur Quantifizierung und Dichteprofilbestimmung der magnetischen Nanopartikel anhand von Magnetfeldmessungen entwickelt. (W. Haberkorn, FB 8.4, wolfgang.haberkorn@ptb.de; F. Wiekhorst, FB 8.2, frank.wiekhorst@ptb.de)

Kopplungsphänomene zwischen Muskelaktivität, subthalamischen Hirnregionen und dem Kortex sind bei Dystoniepatienten gestört

Bei Krankheiten wie Dystonie (Verkrampfung) und Parkinson ist die Kopplung zwischen Muskeln, den Transferstellen in tiefen Hirnregionen und dem Kortex (der Hirnrinde) gestört. Um diese Störungen besser zu verstehen, haben Mitarbeiter der PTB zusammen mit der Klinik für Neurologie der Charité (Campus Rudolf Virchow) magnetenzephalografische Untersuchungen simultan mit Elektrodenableitungen durchgeführt. (T. Sander-Thömmes, FB 8.2, tilmann.sander-thoemmes@ptb.de)

Objektivierung von Wahrnehmungsphänomenen durch magnetische Messungen

Zusammen mit dem Humanwissenschaftlichen Zentrum der Ludwig-Maximilians-Universität München und der chinesischen Akademie der Wissenschaften wurde mittels der Magnetenzephalografie die visuelle Wahrnehmung von Objekten untersucht. Dabei zeigten sich

langsamere und schwächere Gehirnantworten, wenn die Objekte am Rand des Sehfeldes im Vergleich zu Objekten aus dem zentralen Bereich waren. Die Reaktionszeiten auf periphere Signale sind hingegen nicht länger. Das weist darauf hin, dass diese Reaktionen unter Umgehung höherer visueller Areale ausgeführt werden. (T. Sander-Thömmes, FB 8.2, tilmann.sander-thoemmes@ptb.de)

Zeitaufgelöste Nahinfrarot-Spektroskopie zur Beobachtung der robotergestützten motorischen Aktivierung des Gehirns eingesetzt.

Die robotergestützte motorische Rehabilitationstherapie verfügt über ein hohes Potenzial, den Therapieerfolg bei Schlaganfall-Patienten zu verbessern. Ein in der PTB entwickeltes zeitaufgelöstes Nahinfrarot-Reflektometer wurde erstmals zur Beobachtung hämodynamisch-funktioneller Signale während der Durchführung robotergestützter motorischer Rehabilitationsübungen eingesetzt. In Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) wurden unterschiedliche robotergestützte Aktivitäten der distalen oberen Extremitäten bei mehreren Probanden verfolgt und mit einer bekannten, nicht assistierten Handübung verglichen. (O. Steinkellner, FB 8.3, oliver.steinkellner@ptb.de; H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de, R. Macdonald, FB 8.3, rainer.macdonald@ptb.de)

Beurteilung der grundlegenden Leistungsfähigkeit von Geräten zur zeitaufgelösten optischen Bildgebung des Gehirns

Eine wichtige gemeinsame Aufgabe im EU-Projekt „nEUROpt“ ist die Beurteilung und der Vergleich von verschiedenen Geräten zur zeitaufgelösten optischen Bildgebung des Gehirns, die von den Projektpartnern entwickelt wurden. Ein neuartiger Test für solche Geräte ist die Bestimmung der Empfindlichkeit des Detektionssystems, d. h. der Gesamteffizienz der Erfassung und Detektion von Licht, das von Gewebe ausgeht. Ein weiteres wichtiges Merkmal ist die zeitliche Gerätefunktion. Simulationen auf der Grundlage solcher Messungen zeigten, dass Nachpulse in ihrem Zeitverlauf den erzielbaren Kontrast bei der zeitaufgelösten Hirnbildgebung wesentlich beeinträchtigen können. (H. Wabnitz, FB 8.3 heidrun.wabnitz@ptb.de, D. R. Taubert, FB 7.3, dieter.taubert@ptb.de)

Simultane Erfassung zeitaufgelöster fNIRS und physiologischer Signale bei kognitiver Aktivierung des Gehirns

Funktionale Nahinfrarotspektroskopie am Kopf (fNIRS) ist eine vielversprechende optische Methode zur Messung zerebraler hämodynamischer Aktivierung. Jedoch können evozierte Änderungen in systemisch-physiologischen Parametern die eigentlichen gehirnbezogenen Signale verfälschen. In einer in der PTB (FBe 8. 3 und 8.1) im Rahmen des EU-Projektes „nEUROpt“ in enger Zusammenarbeit mit dem University College London und der Freien Universität Berlin durchgeführten multimodalen Studie wurden solche Artefakte nun genauer untersucht. Es gelang, aufgabenevozierte Änderungen des Hämoglobingehaltes in Venen als Ursache für die systemischen Artefakte zu identifizieren und vom gemessenen fNIRS-Signal zu trennen. (A. Jelzow, FB 8.3, alexander.jelzow@ptb.de; H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de, R. Brühl, FB 8.1, ruediger.bruehl@ptb.de)

Entwicklung eines bildgebenden Systems zur berührungslosen optischen Hirnbildgebung

Als Aktivität im EU-Projekt „nEUROpt“ wurde in Zusammenarbeit mit Politecnico di Milano und Microphoton Devices Srl (Mailand) ein berührungsloses diffuses optisches Bildgebungssystem entworfen und aufgebaut. Die Machbarkeit von berührungslosen Messungen eines schnell gegateten Einzelphotonen-Avalanchedioden-Detektors wurde durch Messungen an gewebeähnlichen Phantomen demonstriert. (M. Mazurenka, FB 8.3, mikhail.mazurenka@ptb.de; H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

Quantitative Bestimmung der Anreicherung des Kontrastmittels Indocyaningrün in Brustkarzinomen

Ein in der PTB entwickeltes fluoreszenzgestütztes Verfahren zur Bestimmung der Farbstoffkonzentration in Läsionen ist erstmalig zur Analyse der Kontrastmittelanreicherung in Brustkarzinomen angewendet worden. In dem zweistufigen Verfahren werden zunächst aus Photonenlaufzeitverteilungen die mittleren optischen Eigenschaften des Gewebes in der Umgebung des Tumors bestimmt. Die Berechnung der Farbstoffanreicherung im Karzinom erfolgt mit Hilfe eines Modells. Auf diese Weise werden die bezüglich der Gewebeeigenabsorption

korrigierten Fluoreszenzdaten analysiert, die praktisch unabhängig von der Grundabsorption des Karzinoms sind. (A. Hagen, FB 8.3, axel.hagen@ptb.de; D. Grosenick, FB 8.3, dirk.grosenick@ptb.de)

Erfolgreicher Abschluss des EMRP-Projektes „Metrology on a Cellular Scale for Regenerative Medicine“

In der PTB wurden zur metrologischen Unterstützung bei der Entwicklung von künstlichen Geweben Untersuchungen zur Anreicherung von seltenen Stammzellen aus dem peripheren Blut, zur Vitalität angereicherter Zellen und zur Messung der relativen Bedeckung von Oberflächen mit Zellen (Confluency) durchgeführt. Der relative Bedeckungsgrad oder Confluency ist z. B. eine wichtige Messgröße, um Zellen in Zellkulturen effizient abzuernten. Die Ergebnisse des Projektes wurden von allen beteiligten Partnern des Verbundprojektes im Rahmen einer von der PTB organisierten Sitzung bei dem „World Congress on Regenerative Medicine“ vorgestellt. (M. Frankowski, FB 8.3, marcin.frankowski@ptb.de; A. Kummrow, FB 8.3, andreas.kummrow@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de, R. Macdonald, FB 8.3, rainer.macdonald@ptb.de)

Nationaler Standard zur Bestimmung von Referenzmesswerten für die Hämoglobinkonzentration in Blut

Im Arbeitsausschuss „Hämatologie“ des Normenausschuss Medizin (NAMed) des DIN wurde unter Federführung der PTB die Norm 58931 fertiggestellt, die Anforderungen bei der Bestimmung von Referenzmesswerten der Hämoglobinkonzentration festlegt. Neben dem Cyanmethämoglobin-Verfahren (HiCN) wurde als gleichwertige Alternative das AHD-Verfahren (Alkalisches Hämatin und Detergenz) beschrieben. (J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

Abschluss der Datenanalyse zur immunologischen Differenzierung weißer Blutzellen in mikrofluidischen Durchflusszytometern

In einem inzwischen abgeschlossenen, von der Investitionsbank Berlin (IBB) geförderten und von der EU kofinanzierten Projekt sind mikrofluidische Durchflusszytometer entwickelt und für die immunologische Differenzierung von Leukozyten eingesetzt worden. Die in diesem Projekt durchgeführten Vergleichsmessungen mit konventionellen Durchflusszytometern sind abschließend analysiert und publiziert

worden. Die Ergebnisse belegen, dass die mikrofluidischen Strukturen die gleichwertige Differenzierung der weißen Blutzellen erlauben und die relativen Konzentrationen gut übereinstimmen. (M. Frankowski, FB 8.3, marcin.frankowski@ptb.de; A. Kummrow, FB 8.3, andreas.kummrow@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

CFD-basierte Optimierung einer Rußmessstrecke

Die in Autoabgasen enthaltenen Rußaerosole tragen als „luftfremde Stoffe“ nicht nur zur Umweltverschmutzung bei, sondern sind auch eine wesentliche Quelle des Treibhauseffektes. Eine Optimierung auf der Grundlage numerischer Strömungssimulationen (CFD – computational fluid dynamics) liefert ideale Bedingungen für vergleichende Messungen der Rußpartikelkonzentrationen. Speziell erwies sich die Geometrie der Rohrverbindung beim Zusammenfluss von aerosolhaltigem und reinem Luftstrom als entscheidend für die für Vergleichszwecke notwendige Homogenität der Partikelverteilung am Ende der Messstrecke. (G. Lindner, FB 8.4, gert.lindner@ptb.de; S. Schmelter, FB 8.4, sonja.schmelter@ptb.de; R. Model, FB 8.4, regine.model@ptb.de)

„Take-Up“ einer statistischen Methode für ELISAs

Ein von der PTB entwickeltes statistisches Verfahren zur Bestimmung von Unsicherheiten in immunologischen Tests ist auf breite Resonanz gestoßen. In verschiedensten Medien wurde eine entsprechende PTB-Pressemitteilung aufgegriffen. Außerdem wird die publizierte Methode in einem neuen internationalen Ringvergleich zur Messung des Herzinfarkt-Markers Troponin I angewendet. (K. Klauenberg, FB 8.4, katy.klauenberg@ptb.de)

Simulation der konvektiven Strömung in Lagertanks

Die Bestimmung der Masse in großen Lagertanks erfolgt durch zwei unabhängige Messungen zu Volumen und Temperatur. Durch Verringerung der Messunsicherheit bei der Ermittlung der mittleren Tanktemperatur kann daher die Messunsicherheit der Masseangabe reduziert werden. 2D-Simulationen der Temperaturverteilung mit typischen wetterabhängigen Außentemperaturen als Randbedingung zeigen qualitativ das konvektive Strömungsverhalten im Tank. (S. Schmelter, FB 8.4, sonja.schmelter@ptb.de; G. Lindner, FB 8.4, gert.lind-



ner@ptb.de; R. Model, FB 8.4, regine.model@ptb.de)

Beteiligung der PTB an der Schutzprofilentwicklung für Smart Meter Gateways

Die PTB hat sich an der Entwicklung von Schutzprofilen beim Bundesamt für Sicherheit und Informationstechnik mit dem Ziel beteiligt, neben dem Schutz der Energieinfrastruktur und dem personenbezogenen Datenschutz auch die eichrechtlichen Anforderungen zu berücksichtigen. Das entstandene Schutzprofil ist kompatibel mit den geltenden eichrechtlichen Vorschriften, sowohl auf europäischer wie auch nationaler Ebene. (U. Grottker, FB 8.5, ulrich.grottker@ptb.de; D. Richter, FB 8.5, dieter.richter@ptb.de)

Erfolgreicher Pilotversuch zur beweissicheren Erfassung von Taxameterdaten

In einem Pilotversuch von über 10 Monaten ist der prinzipielle Funktionsnachweis der auf Grundlage eines in der PTB entwickelten, herstellerneutralen Konzepts zum nachweissicheren Auslesen und Speichern von Taxameterdaten erbracht worden. In den Bundesländern Hamburg und Berlin wurden dazu Fahrzeuge von den am Projekt beteiligten Unternehmen mit konzeptkonformen Komponenten ausgestattet. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de; J. Wolff, FB 8.5, joerg.wolff@ptb.de)

Neue Höchstzahl von Spielgerätezulassungen

Das große Interesse der Automatenwirtschaft, neue Spielgerätebauarten am Markt zu platzieren, hält ungebrochen an. Im Geschäftsjahr 2010/2011 wurde mit 150 neu zugelassenen Bauarten eine neue Höchstzahl erreicht. (R. Kuschfeldt, FB 8.5, reiner.kuschfeldt@ptb.de)

Neue Datenbank für Spielgerätezulassungen

Zu Beginn des Jahres 2011 erfolgte die Freischaltung eines modernen, internetgestützten Systems, das bundesweit in übersichtlicher Form die von Gewerbeämtern und Sachverständigen benötigten Informationen über Spielgerätezulassungen anbietet und ein bequemes Recherchieren erlaubt. (R. Kuschfeldt, FB 8.5, reiner.kuschfeldt@ptb.de; M. Konrad, FB 8.5, mirko.konrad@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Internationale Zusammenarbeit zur Mathematik in der Metrologie

Der Fachbereich *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* hat zur Konferenz „Advanced Mathematical and Computational Tools for Metrology“ (AMCTM 2011) einen wesentlichen Beitrag geleistet. Er prägt zudem neue Entwicklungen wie die Analyse dynamischer Messungen (Organisation des „6th International Workshop on Analysis of Dynamic Measurements“) und koordiniert die Zusammenarbeit der Mathematiker und Statistiker innerhalb der Metrologieinstitute Europas im Rahmen der EURAMET Focus Group „Mathematical Tools and Software for Metrology“. (M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

Internationale Workshops zu aktuellen IT-Fragen im gesetzlichen Messwesen.

Mit großem Interesse sind die im November 2010 und November 2011 von der PTB durchgeführten Workshops zu je einem informationstechnischen Schwerpunktthema des gesetzlichen Messwesens aufgenommen worden. Die Themen betrafen die Behandlung von in Messgeräten integrierten Standardbetriebssystemen und den Schutz von Messdaten. Die Workshops haben ein Forum für den internationalen und interdisziplinären Gedankenaustausch zwischen Vertretern metrologischer Institute, Benannter Stellen, Regulierern, der Wirtschaft und der Wissenschaft geboten. (D. Richter, FB 8.5, dieter.richter@ptb.de; F. Thiel, FB 8.5, florian.thiel@ptb.de)

Anhang



Kuratorium

Mitglieder

Präsident des Kuratoriums

Dr. Sven Halldorn

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin

Stellvertretender Präsident des Kuratoriums

Prof. Dr. h. c. Dr. rer. nat. Klaus von Klitzing

Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

Prof. Dr. rer. nat. Gisela Anton

Physikalisches Institut IV der Universität Erlangen

Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Auweter-Kurtz

German Aerospace Academy, Böblingen

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Winfried Büttner

Leiter Corporate Intellectual Property and Functions in der Zentralabteilung/Corporate Technology Siemens AG, München

Dr. rer. nat. Markus Dilger

CTO der duagon GmbH, Dietikon (Schweiz)

Prof. Dr. rer. nat. 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 (IMETUM), Garching

Prof. Dr. Theodor W. Hänsch

Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, und Ludwig-Maximilians-Universität, München

Prof. Dr. Klaus-Peter Jäckel

Oberkirch

Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Kowalsky

Leiter des Instituts für Hochfrequenztechnik, Technische Universität Braunschweig

Dr. rer. nat. Gerald Linke

Leiter Kompetenz-Center Gastechnik, E.ON Ruhrgas AG, Essen

Dipl. Phys. Veronika Martens

Leiterin des Metrologiezentrums, Sartorius AG, Göttingen

Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Mlynek

Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft, Berlin

Prof. Dr.-Ing. Joachim Scheuren

Geschäftsführer der Müller-BBM GmbH, Planegg

Dr. rer. nat. Wolfgang Schwitz

Ehem. Direktor des Bundesamtes für Metrologie, Ittigen (Schweiz)

Dr. rer. nat. Thomas Sesselmann

Geschäftsführer

Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut

Dr. rer. nat. Augustin Siegel

Oberkochen

Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. Lothar Siekmann

Institut für Klinische Biochemie, Universität Bonn

Ind.-Kfm. Peter von Siemens

München

Prof. Dr. h. c. Dr. rer. nat. Joachim Treusch

Präsident der Jacobs University Bremen gGmbH

Prof. Dr. rer. nat. Eberhard Umbach

Präsident des Karlsruher Instituts für Technologie

Prof. Dr. rer. nat. Martin Winterkorn

Vorstandsvorsitzender der Volkswagen AG, Wolfsburg

Dr.-Ing. Klaus Rudolf Wurster

Geschäftsführer

National Rejectors Inc. GmbH, Buxtehude

Ehrenkurator

Prof. Dr. h. c. mult. Dr. rer. nat. Heinz-Georg Wagner

Institut für Physikalische Chemie, Universität Göttingen



Präsidium		
Präsident	Vizepräsident	Mitglied des Präsidiums
Prof. Dr. E. O. Göbel ☎ 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
Mechanik und Akustik

Dr. R. Schwartz
☎ 1010

Abteilung 2
Elektrizität

Dr. U. Siegner
☎ 2010

Abteilung 3
**Chemische Physik und
Explosionsschutz**

Prof. Dr. K.-D. Sommer
☎ 3010

Abteilung 4
Optik

Prof. Dr. F. Riehle
☎ 4010

Abteilung 5
Fertigungsmesstechnik

Dr. H. Bosse
☎ 5010

Fachbereich 1.1
Masse

Dr. D. Ratschko
☎ 1100

Fachbereich 2.1
Gleichstrom und
Niederfrequenz

Dr. J. Melcher
☎ 2100

Fachbereich 3.1
Metrologie in der
Chemie

Dr. B. Güttler
☎ 3100

Fachbereich 4.1
Photometrie und
angewandte Radiometrie

Dr. K. Stock
☎ 4100

Fachbereich 5.1
Oberflächenmesstechnik

Dr. L. Koenders
☎ 5100

Fachbereich 1.2
Festkörpermechanik

Dr. R. Kumme
☎ 1200

Fachbereich 2.2
Hochfrequenz und
Felder

Dr. T. Schrader
☎ 2200

Fachbereich 3.2
Gasanalytik und
Zustandsverhalten

Prof. Dr. V. Ebert
☎ 3200

Fachbereich 4.2
Bild- und Wellenoptik

Dr. E. Buhr
☎ 4200

Fachbereich 5.2
Dimensionelle
Nanometrologie

Dr. J. Flügge
☎ 5200

Fachbereich 1.3
Geschwindigkeit

Prof. Dr. F. M. Jäger
☎ 1300

Fachbereich 2.3
Elektrische
Energiesmesstechnik

Dr. M. Kahmann
☎ 2300

Fachbereich 3.3
Stoffeigenschaften
und Druck

*Prof. Dr. K.-D. Sommer
☎ 3010

Fachbereich 4.3
Quantenoptik und
Längeneinheit

Dr. H. Schnatz
☎ 4300

Fachbereich 5.3
Koordinatenmesstechnik

Dr. F. Härtig
☎ 5300

Fachbereich 1.4
Gase

Dr. H. Többen
☎ 1400

Fachbereich 2.4
Quantenelektronik

Dr. A. Zorin
☎ 2400

Fachbereich 3.4
Grundlagen des
Explosionsschutzes

Dr. H. Bothe
☎ 3400

Fachbereich 4.4
Zeit und Frequenz

Dr. E. Peik
☎ 4400

Fachbereich 5.4
Interferometrie an
Maßverkörperungen

Dr. R. Schödel
☎ 5400

Fachbereich 1.5
Flüssigkeiten

Dr. G. Wendt
☎ 1500

Fachbereich 2.5
Halbleiterphysik und
Magnetismus

Dr. H. W. Schumacher
☎ 2500

Fachbereich 3.5
Zünddurchschlags-
prozesse

Dr. U. Klausmeyer
☎ 3500

Fachbereich 4.5
Optische Technologien

Prof. Dr. S. Kück
☎ 4500

Fachbereich 5.5
Wissenschaftlicher
Gerätebau

Prof. Dr. F. Löffler
☎ 5500

Fachbereich 1.6
Schall

Dr. C. Koch
☎ 1600

Fachbereich 2.6
Elektrische
Quantenmetrologie

Dr. F. J. Ahlers
☎ 2600

Fachbereich 3.6
System- und
Eigensicherheit

Dr. U. Johannsmeyer
☎ 3600

Fachbereich 1.7
Akustik und Dynamik

Prof. Dr. W. Scholl
☎ 1700

Fachbereich 3.7
Zündquellensicherheit

Dr. M. Beyer
☎ 3700

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

Organigramm

Stand: 1. Dezember 2011

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. R. Weiß
☎ 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) 5084

**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.2
Theoretische
Grundlagen**

*Dr. R. Weiß
☎ 8010

**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.3
Gesetzliches Messwesen
und Technologietransfer**

Dr. P. Ulbig
☎ 8300

**Referat Z.13
Justitiariat**

M. Gahrens
☎ 9130

**Fachbereich 6.4
Ionenbeschleuniger und
Referenzstrahlungsfelder**

Dr. F. Wissmann
☎ 6400

**Fachbereich 7.4
Temperatur**

Dr. J. Fischer
☎ (Ch) 7473

**Fachbereich 8.4
Mathematische
Modellierung und
Datenanalyse**
Dr. M. Bär
☎ (Ch) 7687

**Fachbereich Q.4
Informationstechnologie**

Dr. S. Hackel
☎ 8400

**Referat Z.14
Organisation und
Controlling**

Dr. J. Jaspers
☎ 9140

**Fachbereich 6.5
Neutronenstrahlung**

Dr. H. Schuhmacher
☎ 6500

**Fachbereich 7.5
Wärme und Vakuum**

Dr. T. Lederer
☎ (Ch) 7230

**Fachbereich 8.5
Metrologische
Informationstechnik**

Prof. Dr. D. Richter
☎ (Ch) 7479

**Fachbereich Q.5
Technische
Zusammenarbeit**

D. Schwohnke
☎ 8200

**Referat Z.15
Verwaltung Berlin**

A. Lubinus
☎ (Ch) 7449

**Fachbereich 6.6
Grundlagen der
Dosimetrie**

Dr. H. Rabus
☎ 6600

**Fachbereich 7.6
Strahlungsdosimetrie**

Dr. F. Melchert
☎ (Ch) 7446

**Fachbereich 8.6
Metrologische
Informationstechnik**

Prof. Dr. D. Richter
☎ (Ch) 7479

**Referat Q.61
Technischer Dienst**

M. Frühauf
☎ 9170

**Referat Z.16
Innerer Dienst**

M. List
☎ 9160

**Referat 6.71
Betrieblicher
Strahlenschutz**

Dr. R. Simmer
☎ 6710

**Fachbereich 7.7
Strahlungsdosimetrie**

Dr. F. Melchert
☎ (Ch) 7446

**Fachbereich 8.7
Metrologische
Informationstechnik**

Prof. Dr. D. Richter
☎ (Ch) 7479

**Referat Q.62
Technischer Dienst**

M. Frühauf
☎ 9170

**Referat Z.17
Ausbildung**

P. J. Dickers
☎ 9240

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

Gesamtpersonalrat

U. Meyer ☎ 1090

Örtlicher Personalrat Braunschweig

W. Krien ☎ 1092

Örtlicher Personalrat Berlin

R. Thomas ☎ (Ch) 7337

Gleichstellungsbeauftragte

B. Behrens ☎ 9133

Gesamtvertretung der Schwerbehinderten

R. Lütge ☎ 1097

Vertretung der Schwerbehinderten Braunschweig

R. Lütge ☎ 1097

Vertretung der Schwerbehinderten Berlin

C. Aßmann ☎ (Ch) 7964

Zeichenerklärung

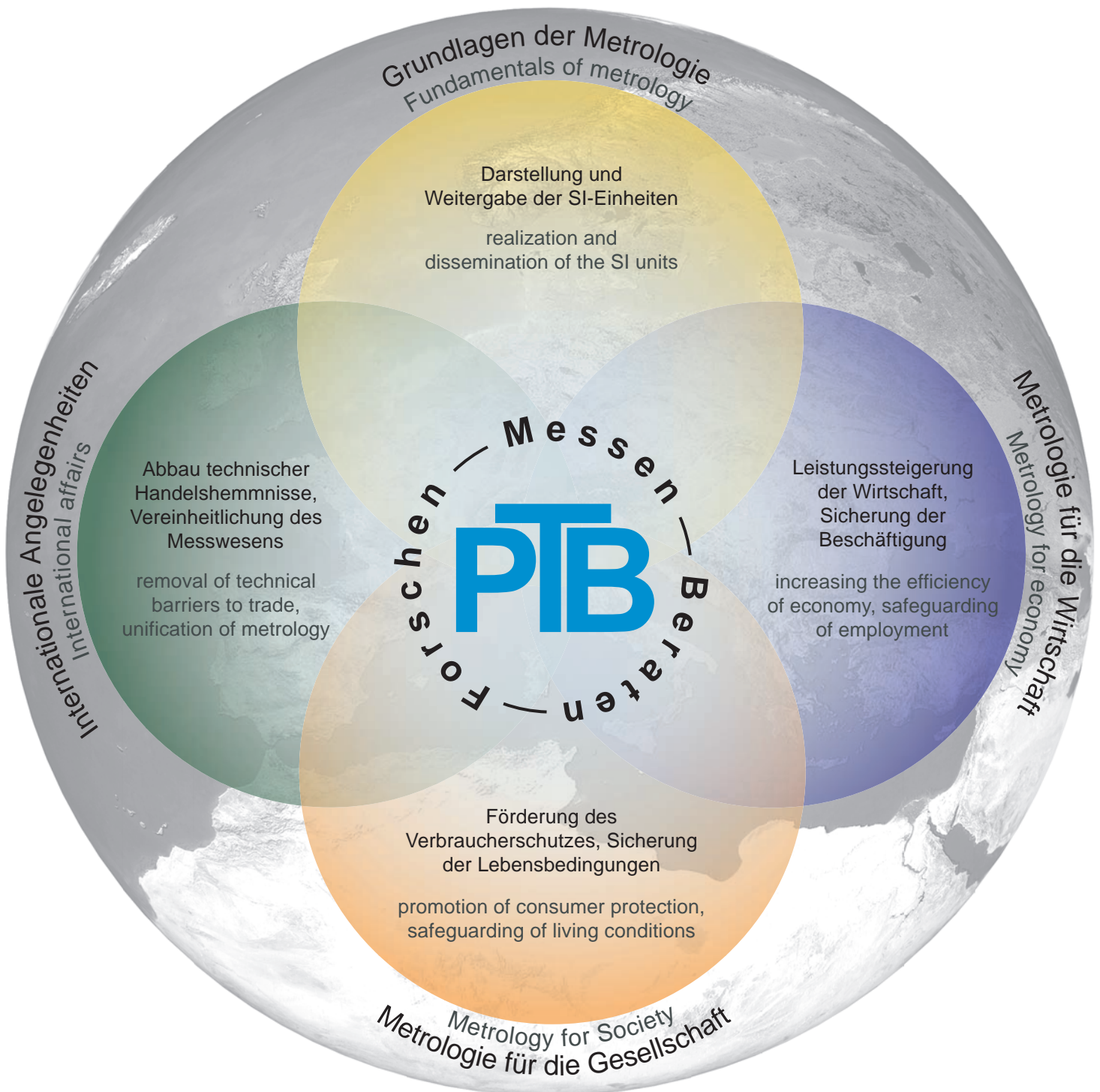
☎ (0531) 592-0 Braunschweig/Durchwahl 592 ...

☎ (030) 3481-0 Berlin Charlottenburg (Ch)/Durchwahl 3481 ...

☎ (030) 3481-0 Berlin Adlershof (Ad)/Durchwahl 6392 ...

*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 Transfernormale. 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. neu entwickelt 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; ab 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 Normalmesseinrichtungen, 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. Auf Grund 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 akkredi-

tierten 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.

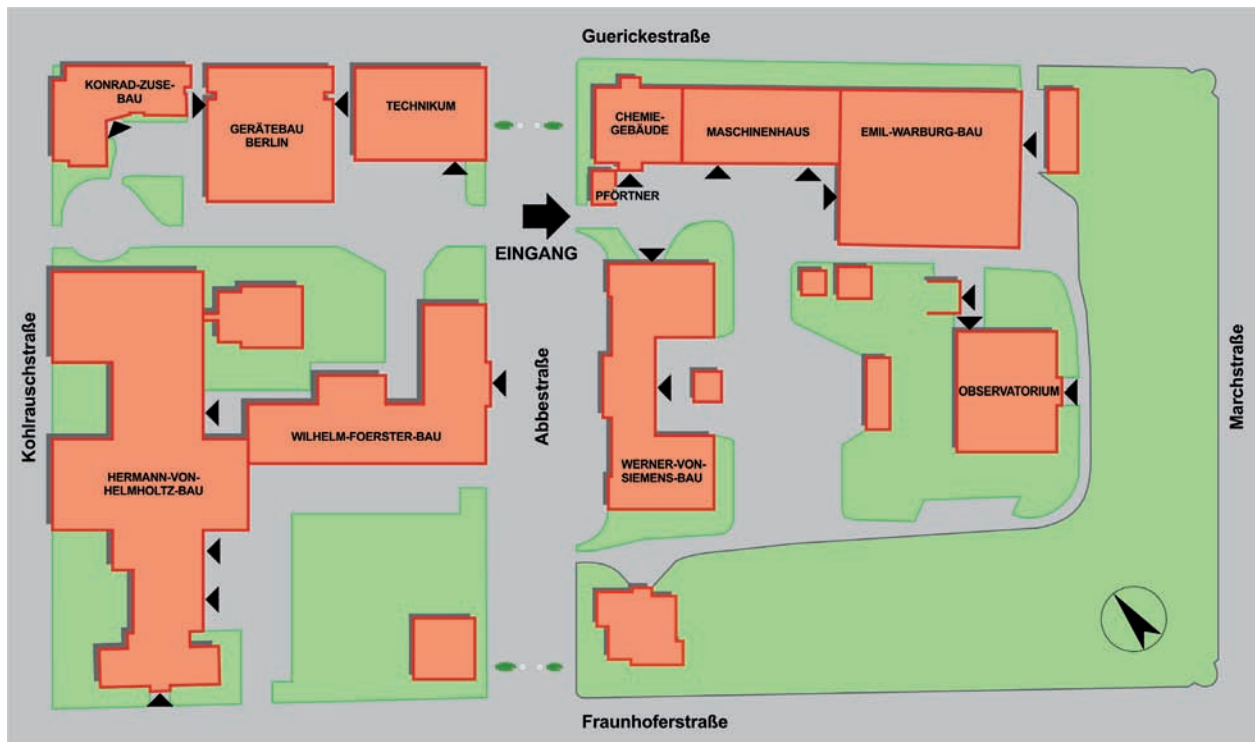
Neben ihrem europäischen Engagement arbeitet die PTB ebenfalls maßgeblich in allen internationalen Metrologieorganisationen mit, zu einem erheblichen Teil in leitender Funktion. Außerdem leistet die PTB einen wesentlichen Beitrag zur internationalen Normung durch Mitarbeit in Gremien von ISO, IEC, CEN, 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 Braunschweig



Geländeplan Berlin-Charlottenburg



Gebäude in Braunschweig

Gebäude (Building):

Abbe-Bau (V)
 Annahme und Versand
 (Delivery and Shipment) (S)
 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)
 Hauptwerkstatt
 (Main Workshop) (S)
 Heisenberg-Bau (C)

Helmholtz-Bau I (K)
 Helmholtz-Bau II (K)
 Hertz-Bau (K)
 Hörsaal (Auditorium) (C)
 Kasino (K)
 Kids & Co-Bau
 (Kita und 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)
 Wirtschaftsgebäude (K)
 Willy-Wien-Turm (R)
 Zentralgebäude
 (Central Building) (K)

Einrichtungen / Institute auf dem Gelände (External Facilities and Institutions):

Deutsche Akkreditierungsstelle
 (DAkkS), Vieweg-Bau (B)
 Etalon AG, Hauptwerkstatt (Main
 Workshop) (S)
 EURAMET e.V., Zentralgebäude
 (Central Building) (K)
 QUEST@PTB, v.-Laue-Bau (V)
 Underwriters Laboratories (UL),
 Raumzellen-Bau 4 (Q)

Anschriften der PTB

Hausadressen

Braunschweig:

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

☎ (05 31) 592-0

Durchwahl 592-...

Telefax: (05 31) 592-92 92

Postfach-Adresse

Postfach 33 45

38023 Braunschweig

Berlin-Charlottenburg:

Abbestraße 2–12

10587 Berlin

☎ (030) 34 81-1

Durchwahl 34 81-... [Ch]

Telefax: (030) 34 81-74 90

Internet

<http://www.ptb.de/>

E-Mail: info@ptb.de

Impressum

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

Braunschweig, Mai 2012

Satz, Gestaltung: PTB, Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Übersetzung: PTB-Sprachendienst

Druck: westermann druck GmbH, Braunschweig

Nachdruck mit Quellenangabe gestattet.

ISSN 0340-4366

