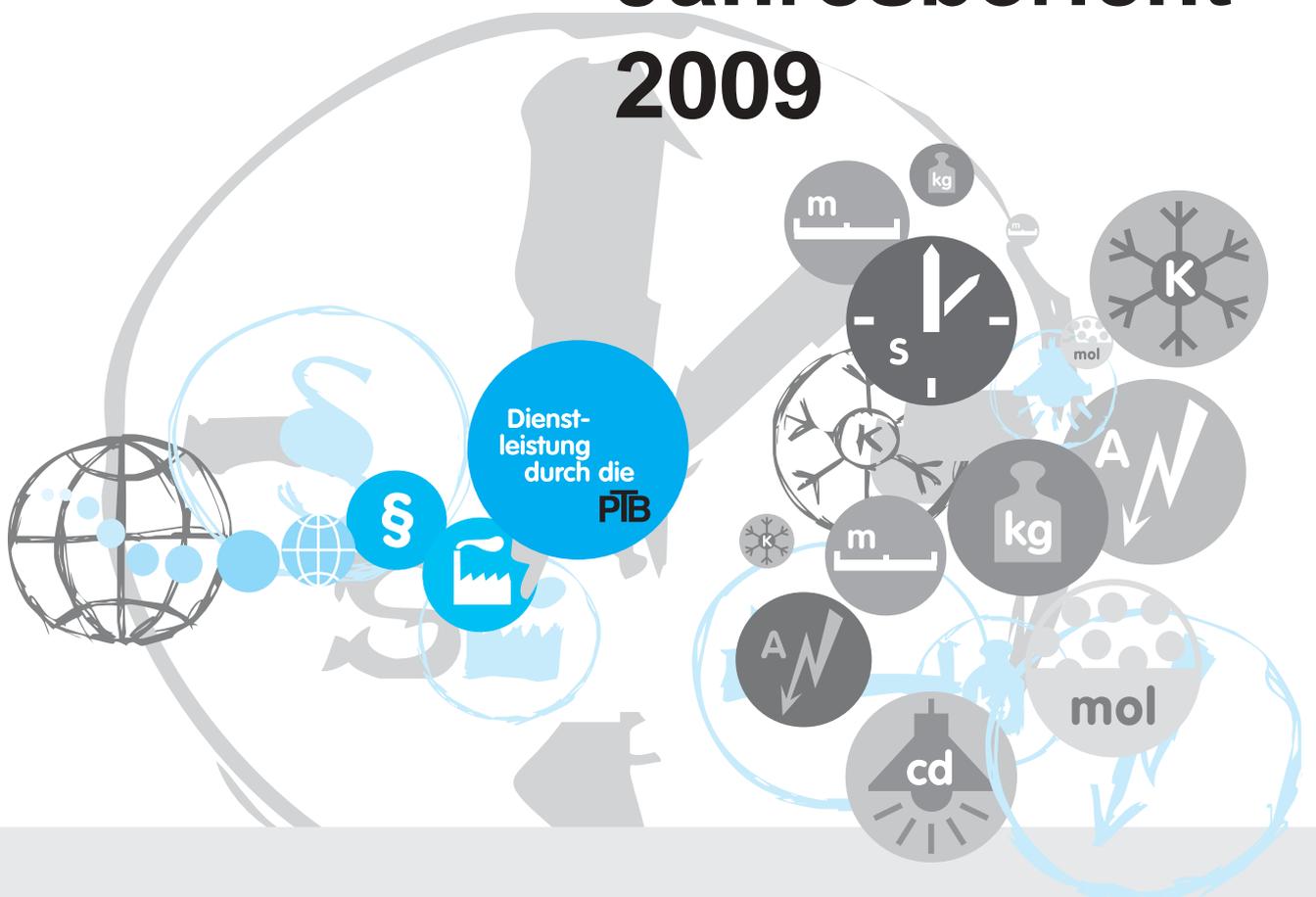


# Physikalisch- Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin

## Jahresbericht 2009



# Vorwort

Das Jahr 2009 war für die PTB ein aufregendes und in mancher Hinsicht sogar ein besonders positives Jahr. So hat zum Beispiel das Europäische Parlament beschlossen, die koordinierte europäische Metrologieforschung gemäß Artikel 169 des europäischen Einigungsvertrages ab 2010 für die nächsten sieben Jahre mit einer Kofinanzierung von 200 Millionen Euro zu fördern. Am 18. Mai haben wir in einer Pressekonferenz im Beisein von Vertretern des Europäischen Parlaments, der Kommission, des BMBF und BMWi das Programm der Öffentlichkeit vorgestellt. Eine ausführliche Darstellung des Europäischen Metrologieforschungsprogramms (EMRP) und der mit der Durchführung verbundenen Strukturen ist in den PTB-Mitteilungen 4.2009 unter dem Themenschwerpunkt „Europäische Metrologie“ zu finden. Kennzeichnend für das EMRP ist, dass es sich verstärkt auch den „Megathemen“ der Gegenwart (Energie, Klima und Umwelt, Gesundheit) zuwendet.

2009, wieder frei von der Last externer Evaluationen, stand natürlich die fachliche Arbeit uneingeschränkt im Vordergrund. Damit befassen sich der vorliegende Jahresbericht und die ausführlichere Darstellung auf den Internetseiten der PTB. Hier möchte ich Sie insbesondere auf den Block „Nachrichten des Jahres“ hinweisen, wo einige der spektakulärsten Ergebnisse kurz vorgestellt werden, wie etwa die Entwicklung eines Quantennormals für die Kapazitätseinheit Farad auf der Basis des Quanten-Hall-Effekts, die erstmalige Realisierung eines Bose-Einstein-Kondensats mit dem Erdalkaliumatom Calcium oder die direkte Beobachtung (live imaging) der Ausbildung und Reparatur von DNA-Strahlenschäden in Zellkulturen mit unserem Mikro-Ionenstrahl.

Erfreulich ist auch die zunehmende auswärtige Anerkennung unserer Forschungsergebnisse und Dienstleistungen. So wurden im Jahr 2009 u. a. ausgezeichnet:

- Uwe Klausmeyer mit dem Lord Kelvin Award der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC)
- Volker Wittstock mit dem Lothar-Cremer-Preis der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA)
- Lorenz Mitschang und Wolfgang Kilian zusammen mit Christian Freud (FUB) im Innovationswettbewerb Medizintechnik des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und
- Detlef Schiel, Olaf Rienitz und Bernd Güttler zusammen mit Kollegen der Universität Stuttgart und des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wasserforschung (Mülheim) mit dem CITAC Award 2009.

Besonders erwähnt werden soll auch der Besuch des damaligen Bundesministers für Wirtschaft und Technologie, Karl-Theodor zu Guttenberg, und seine anerkennenden Worte über unsere Arbeit.

Ende des Jahres 2009 hieß es Abschied nehmen von einer sehr bedeutenden Instanz der PTB, dem Deutschen Kalibrierdienst (DKD). Der DKD verlässt nach über 30 Jahren Erfolgsgeschichte formal die PTB und wird in die neugegründete alleinige deutsche Akkreditierungsstelle (DAkKS) eingegliedert. Der DKD als Teil der DAkKS verbleibt aber an seinem Sitz in der PTB Braunschweig und ist mit der PTB auch weiterhin fachlich verbunden, um so seine hohe Kompetenz zu erhalten und auszubauen.

Das QUEST-Institut an der PTB, gemeinsam mit der Leibniz-Universität Hannover als Teil des Exzellenzclusters QUEST eingerichtet, hat seine Aufbauphase zwar noch nicht abgeschlossen, aber dennoch bereits neue wissenschaftliche Ergebnisse erzielt.

Auch in anderen Bereichen hat sich das Engagement der PTB in der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses erneut verstärkt. Aktuell arbeiten ca. 100 Doktoranden und ca. 30 Post-Docs an wissenschaftlichen Projekten in der PTB – Zahlen, die in den nächsten Jahren durch das Europäische Metrologieforschungsprogramm (EMRP) voraussichtlich noch erheblich steigen werden. Diese jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler stammen nicht nur aus Deutschland, sondern aus allen Teilen der Welt und tragen so zusammen mit unseren Gastwissenschaftlern zur traditionell internationalen Atmosphäre in unseren Laboratorien bei.

Auch bei der Förderung des ganz jungen Nachwuchses für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung haben wir uns in diesem Jahr besonders engagiert: Mit dem Projekt „WissensForscher in der PTB“ bieten wir Grundschulern aus der Region physikalischen Experimentalunterricht rund um Kilogramm, Meter und Sekunde an. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die sich für dieses Projekt, das eine enorme Nachfrage bei den Grundschulen ausgelöst hat, ehrenamtlich einbringen.

Natürlich gilt mein Dank darüber hinaus allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der PTB für ihren engagierten Einsatz.

Ernst O. Göbel



# Foreword

The year 2009 was an exciting and – in some ways – even an especially positive year for PTB. Thus, for example, the European Parliament agreed to fund the coordinated European metrological research in accordance with Article 169 of the Treaty on European Union, for the next seven years, with co-financing of 200 million euros, starting in 2010. On May 18th, we presented the programme to the public in a press conference in the presence of representatives of the European Parliament, the Commission, the BMBF and the BMWi. A detailed description of the European Metrology Research Programme (EMRP) and the structures involved with its implementation can be found in the *PTB-Mitteilungen 4.2009* under the topic “*Europäische Metrologie*” (“European Metrology”). Characteristic of the EMRP is that it increasingly also addresses present-day “mega-themes” (energy, climate and environment, health).

In 2009, free again of the burden of external evaluations, naturally the main focus was unreservedly on technical work. This is addressed by the present annual report and the more detailed description on PTB’s Internet pages. Here I would particularly like to refer you to the block “News of the Year”, where some of the most spectacular events are briefly presented, as, for instance, the development of a quantum standard for farad, the unit of capacitance, on the basis of the quantum Hall effect, the first-time realization of a Bose-Einstein condensate with the alkaline earth atom calcium, or the direct observation (live imaging) of the formation and repair of radiation-induced DNA damage in cell cultures with our micro-ion beam.

The increasing external recognition of our research results and services is also gratifying. Thus, in 2009, distinguished, among others, were:

- Uwe Klausmeyer, with the Lord Kelvin Award of the *International Electrotechnical Commission* (IEC)
- Volker Wittstock, with the Lothar Cremer Prize of the *Deutsche Gesellschaft für Akustik* (DEGA) (German Acoustical Society)
- Lorenz Mitschang and Wolfgang Kilian, together with Christian Freud (FUB) in the Medical Technology Innovation Competition of the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), and
- Detlef Schiel, Olaf Rienitz and Bernd Güttler, together with colleagues from the University of Stuttgart and the *Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung* (Mülheim), with the CITAC Award 2009.

Special mention should also be made of the visit of Karl-Theodor zu Guttenberg, the then Federal Minister of Economics and Technology, and his commendatory words about our work.

At the end of 2009, it was time to take leave of a very important PTB authority, the *Deutscher Kalibrierdienst* (DKD) (German Calibration Service). After a more than 30-year success story, the DKD is formally leaving PTB and will be integrated into the newly founded, sole *Deutsche Akkreditierungsstelle* (DAkKS) (German Accreditation Body). DKD, as part of DAkKS, will, however, remain at its location at PTB Braunschweig and remain professionally affiliated with PTB in order to maintain and expand in this way its high degree of competence.

The QUEST Institute at PTB, established together with the Leibniz University of Hannover as part of the QUEST Excellence Cluster, has not yet completed its start-up phase, but it has nonetheless already achieved novel scientific results.

Also in other areas, PTB has again reinforced its commitment to promote the advancement of young scientists. Currently, about 100 doctoral candidates and about 30 post-docs are working on scientific projects at PTB. It is expected that these numbers will still increase exceedingly in the next few years due to the *European Metrology Research Programme* (EMRP). These young scientists come not only from Germany but also from all parts of the world and thus, together with our guest scientists, contribute to the traditionally international atmosphere in our laboratories.

Also for the encouragement of very young talent in science, research and development, we have been exceptionally active this year: With the project "Knowledge Searchers at PTB" we offer primary school pupils from the region instruction in physics experiments - all about the kilogram, meter and second. At this point, I would like to thank all of those who worked on an honorary basis on this project which met with an enormous demand at the primary schools.

Naturally, my thanks are moreover directed towards all employees of PTB for their dedicated service.

Ernst O. Göbel

A large, stylized handwritten signature in grey ink, which appears to be "E. Göbel". The signature is written in a cursive, flowing style with a prominent initial "E".

Der gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2009. Den kompletten Jahresbericht mit Nachrichten und speziellen Listen finden Sie auf den Internetseiten der PTB (unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de) im Bereich „Publikationen“).

Außerdem führen wir Sie von dort zur Datenbank 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 2009)
- 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

Fachabteilungen • Scientific Divisions 8

Kuratorium • Advisory Board 16

Präsidium • Presidential Board 20

Qualitätsmanagement • Quality Management 26

Gesetzliches Messwesen • Legal Metrology 27

Technologietransfer • Technology Transfer 28

Informationstechnologie • Information Technology 29

Technische Zusammenarbeit • Technical Cooperation 30

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit • Press and Information Office 32

Zahlen und Fakten • Figures and facts 34

Berichte der Abteilungen

Mechanik und Akustik 45

Elektrizität 63

Chemische Physik und Explosionsschutz 75

Optik 87

Fertigungsmesstechnik 105

Ionisierende Strahlung 117

Temperatur und Synchrotronstrahlung 129

Medizinphysik und metrologische Informationstechnik 151

Anhang

Der Deutsche Kalibrierdienst 166

Kuratorium 169

Organigramm 170

Arbeitsgebiete 172

Geländepläne 176

## Nachrichten des Jahres • News of the year

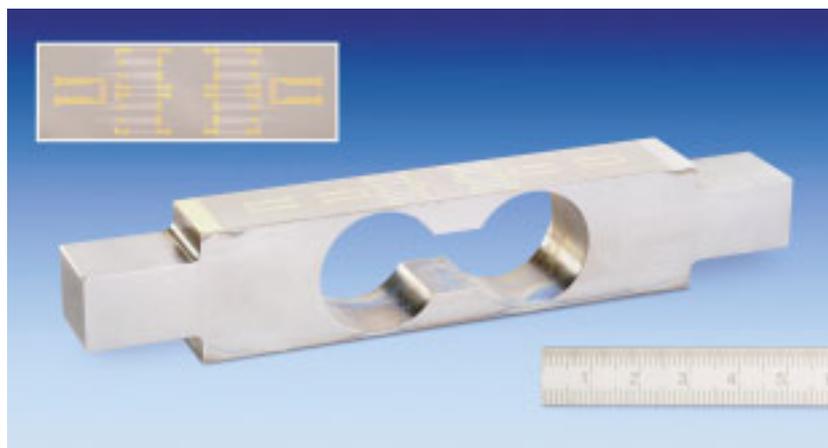
### Neue Wägezelle aus Silicium

Die Technologie konventioneller Dehnungsmessstreifen-Wägezellen wurde in der PTB auch für hochpräzise Wägungen weiterentwickelt. Die neue Wägezelle aus einkristallinem Silicium (statt aus Metall) mit aufgesputterten (statt geklebten) Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen weist ein deutlich verbessertes Zeit- und Hystereseverhalten sowie eine bessere Reproduzierbarkeit auf.

Mit einem Jahresumsatz von 500 Millionen Euro hat die Wägetechnik in Deutschland einen großen Marktanteil. Ein Großteil dieses Jahresumsatzes wird mit konventionellen Wägezellen für geringe bis mittlere Präzision erreicht. Sie bestehen aus metallischen Federkörpern mit aufgeklebten Dehnungsmessstreifen. Auf diesem Prinzip beruht auch der von der PTB weiterentwickelte Sensor. Doch statt aus Metall besteht sein Federkörper aus Silicium. Da sich einkristallines Silicium bei Belastung ideal elastisch verformt, sind Zeitabhängigkeiten und Hysterese eines solchen Federkörpers vernachlässigbar. Die Kennlinien der Silicium-Wägezellen zeigen im Vergleich zu denen konventioneller Wägezellen bei Hysterese, Nullpunktverhalten und Reproduzierbarkeit der Messwerte jeweils um mehr als eine Größenordnung bessere Werte. Die Nichtlinearität ist vergleichbar mit der konventioneller Wägezellen.

Die anhand der Kriech- und Richtigkeitsprüfung bewerteten Silicium-Wägezellen erreichen bis zu 50 000 Teilungsschritte für eichfähige Anwendungen und sind somit auch für präzise Wägungen, etwa bei Laborwaagen, geeignet.

Silicium-Wägezelle mit aufgesputterten Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen



Silicon load cell with sputtered-on thin-film strain gauges

### New silicon load cells

At PTB, the technology of conventional strain gauge load cells has been further developed, also for high-precision weighing. The new load cell made of monocrystalline silicon (instead of metal) with sputtered-on (instead of glued) thinfilm strain gauges shows a significantly improved time and hysteresis behaviour, as well as a better reproducibility.

With an annual turnover of 500 million euros, weighing technology makes up a large share of the market in Germany. A large part of this annual turnover is achieved with conventional load cells for low to medium precision. These load cells are made of metallic mechanical springs with glued strain gauges. The sensor which was further developed by PTB works according to the same principle. Its spring bellow, however, is made of silicon instead of metal. Since, under the influence of a load, monocrystalline silicon deforms ideal-elastically, the time-dependency and hysteresis of such a spring bellow is negligible. Compared to those of conventional load cells, the characteristic curves of the silicon load cells achieve values which are better by more than one order of magnitude with regard to hysteresis, zero-point behaviour and reproducibility. The non-linearity is comparable to that of conventional load cells.

The silicon load cells which were analysed by means of creeping and correctness tests achieve more than 30,000 intervals for applications subject to legal verification and are, thus, suitable also for precision weighing operations such as, for example, in the case of laboratory balances.

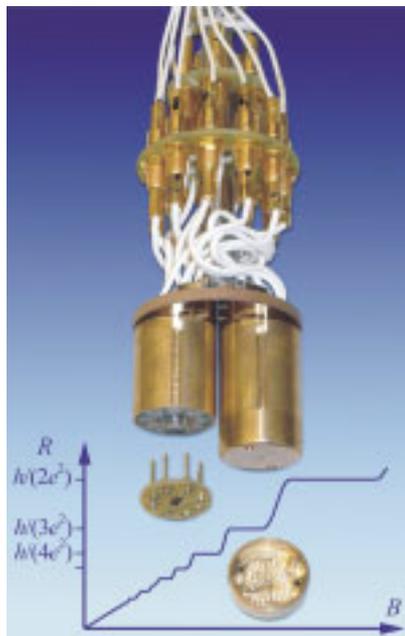
## Neues Quantennormal der Kapazität mit unübertroffener Genauigkeit

Die Einheit der Kapazität, das Farad, wird konventionell mit Hilfe eines berechenbaren Kondensators dargestellt. Der PTB ist es gelungen, die Kapazitätseinheit mit Hilfe eines Quantennormals genauer zu reproduzieren, als es mit den besten berechenbaren Kondensatoren möglich ist.

Das neue Quantennormal basiert auf dem Wechselstrom-Quanten-Hall-Effekt. Beim Quanten-Hall-Effekt, der bei tiefen Temperaturen in starken Magnetfeldern auftritt, nimmt der Hall-Widerstand Werte an, die ein ganzzahliger Bruchteil der sogenannten von-Klitzing-Konstante  $R_K$  sind. Gemäß  $R_K = h/e^2$  hängt diese nur vom Planck'schen Wirkungsquantum  $h$  und von der Elementarladung  $e$  ab. In der Gleichstrommesstechnik wird der Quanten-Hall-Effekt bereits seit vielen Jahren zur Reproduzierung der Einheit des elektrischen Widerstands mit einer Genauigkeit von  $1 \text{ n}\Omega/\Omega$  und besser genutzt.

Für präzise Wechselstromanwendungen des Quanten-Hall-Effekts musste eine spezielle Schirmungstechnik für Quanten-Hall-Bauelemente entwickelt werden, um störende kapazitive Effekte zu unterdrücken, die Präzisionsmessungen verhindern. Das Herzstück des neuen Quantennormals der Kapazität bilden zwei geschirmte Quanten-Hall-Widerstände in einer sogenannten Quadraturbrücke. Auf diese Weise wurde ein 10-pF-Kapazitätsnormal mit einer relativen Unsicherheit von nur  $12 \text{ nF/F}$  ( $k = 2$ ) gegen die von-Klitzing-Konstante kalibriert. Damit kann die PTB als weltweit erstes metrologisches Institut eine direkt auf Quantengrößen rückgeführte Kapazitätskalibrierung mit einer Unsicherheit durchführen, die mit konventionellen Verfahren bisher nicht erreicht wurde.

Halter für zwei geschirmte Quanten-Hall-Widerstände, die das Herzstück eines Quantennormals der Kapazität bilden. Das Diagramm zeigt die Quantenstufen eines Quanten-Hall-Widerstandes.



## New Quantum Standard for Capacitance of Unmatched Accuracy

The unit of capacitance, the farad, is conventionally realised by means of a calculable capacitor. PTB has now succeeded in reproducing the unit of capacitance by means of a quantum standard, more accurately than it would be possible even with the best of calculable capacitors.

The new quantum standard is based on the AC quantum Hall effect. The quantum Hall effect, which occurs at low temperatures and in strong magnetic fields, is characterised by values of the Hall resistance which are an integral fraction of the so-called Von Klitzing constant  $R_K$ . According to  $R_K = h/e^2$ , this constant solely depends on Planck's constant  $h$  and on the elementary charge  $e$ . In DC measurement techniques, the quantum Hall effect has already been used for many years to reproduce the unit of electrical resistance with an accuracy of  $1 \text{ n}\Omega/\Omega$  and even better.

For precise AC applications of the quantum Hall effect, a special shielding technique for quantum Hall elements had to be developed in order to suppress disturbing capacitive effects which make precise measurements impossible. The core of the new quantum standard of capacitance are two shielded quantum Hall resistances in a so-called quadrature bridge. In this way, a 10 pF capacitance standard having a relative uncertainty of only  $12 \text{ nF/F}$  ( $k = 2$ ) has been calibrated against the Von Klitzing constant. As the first metrology institute worldwide, PTB can thus perform capacitance calibrations which are directly traceable to quantum quantities with an uncertainty which has not been achieved with conventional methods so far.

Support holder for two shielded quantum Hall resistances which represent the core of a quantum standard for capacitance. The diagram shows the quantum steps of the quantum Hall resistance.

## Primärnormal für die Messung von Klinischen Proteinmarkern

Immunochemische Detektionsverfahren ermöglichen heute den Nachweis von Biomolekülen wie Proteinen selbst in extrem kleinen Konzentrationsbereichen. Dies hat zur Entdeckung vieler klinischer Marker auf der Basis von Proteinen geführt, die große Bedeutung bei der Früherkennung lebensbedrohlicher Erkrankungen (Herzinfarkt, Krebs) haben. Diese Nachweisverfahren basieren auf Reaktionen von Antigenen mit Antikörpern nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip. Solche Reaktionen sind trotz hoher Spezifität oft nicht eindeutig. Kreuzreaktionen mit anderen Molekülen sind häufig. Dies kann zu falschen Messergebnissen und Fehldiagnosen führen

Referenzmessverfahren zur zuverlässigen Quantifizierung von Proteinmarkern sind deshalb wichtig in der klinischen Chemie. Problematisch ist jedoch die Größe der Proteine. Sie können 1000-mal größer sein als „klassische“ Moleküle wie z. B. Cholesterin.

Die PTB kann jetzt Proteine in einer klinisch relevanten Matrix (Wachstumshormon in Blutserum) messen. Das in der PTB entwickelte, primäre Verhältnismessverfahren beruht auf einer Weiterentwicklung der klassischen Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie (ID-MS) und erbringt den Nachweis, dass eine Rückführung von Konzentrationsmessungen auch von großen Biomolekülen auf die SI-Einheiten im relevanten (extrem niedrigen) Konzentrationsbereich mit der notwendigen Genauigkeit möglich ist.

Der Lösungsansatz zur Quantifizierung komplexer Biomoleküle (Proteine) beruht auf der Quantifizierung von Proteolyseprodukten (kleinen Bruchstücken) dieser Proteine. Dabei werden die Zielmoleküle über geeignete Enzyme in kleinere Peptide zerlegt. Mit Hilfe der ID-MS kann die Peptidkonzentration bestimmt und daraus auf die Proteinkonzentration geschlossen werden.

Das vorgestellte Verfahren ist inzwischen als nationales Normal international anerkannt. Die PTB ist damit das erste nationale Metrologieinstitut, das ein Messverfahren für die Quantifizierung von Proteinen in Blutserum als Messfähigkeit (CMC-Eintrag) in der Datenbank des BIPM registriert hat.

## Primary standard for the measurement of clinical protein markers

Immunochemical detection methods have now made it possible to detect biomolecules such as proteins even in extremely small concentration ranges. This has led to the discovery of numerous clinical markers on the basis of proteins which are of great importance for the early detection of life-threatening diseases (myocardial infarction, cancer). These detection methods are based on reactions of antigens with antibodies according to the key/keyhole principle. Such reactions are, despite their high specificity, often not unambiguous. Cross reactions with other molecules are frequent. This can lead to false measurement results and false diagnoses.

Reference measurement methods for the reliable quantification of protein markers are therefore essential in clinical chemistry. The problem is, however, the size of the proteins. These can be 1000 times larger than “classical” molecules such as, e.g., cholesterol.

PTB is now able to measure proteins in a clinically relevant matrix (growth hormone in serum). The primary ratio measurement method developed at PTB is based on a further development of conventional isotope dilution mass spectrometry (ID-MS) and furnishes proof that also concentration measurements of large biomolecules can be traced back to the SI units in the relevant (extremely low) concentration range with the required accuracy.

The approach for the quantification of complex biomolecules (proteins) is based on the quantification of proteolysis products (small fractions) of these proteins. The target molecules are thereby fragmented into smaller peptides by means of appropriate enzymes. The peptide concentration can be determined by means of ID-MS, and conclusions with regard to the protein concentration can be drawn from it.

The presented procedure has meanwhile been internationally recognised as a national standard. PTB is therefore the first national metrology institute which has had a measurement procedure for the quantification of proteins in serum registered as a measuring capability (CMC entry) in the BIPM database.

## Erstes Bose-Einstein-Kondensat mit Erdalkaliatomen

In der PTB ist es weltweit zum ersten Mal gelungen, mit Calcium ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC) eines Erdalkalielements herzustellen. Gegenüber den am meisten genutzten Alkalielementen für BECs bieten Erdalkali-Atome völlig neue Möglichkeiten für Präzisionsmessungen, da sie sehr schmale Übergänge im optischen Spektralbereich besitzen, die mit Lasern angeregt werden können.

Wird ein stark verdünntes Gas bis fast zum absoluten Nullpunkt abgekühlt, so treten die quantenmechanischen Eigenschaften der Gasteilchen in den Vordergrund. Bei Teilchen mit ganzzahligem Spin (Bosonen) befinden sich dann immer mehr Teilchen im selben Quantenzustand und können ein BEC bilden.

Dazu wurden  $2 \cdot 10^6$  Calciumatome in magneto-optischen Fallen mit Laserlicht auf eine Temperatur von  $20 \mu\text{K}$  vorgekühlt und dann in eine optische Dipolfalle geladen. Durch Abschwächen der Haltekraft der Dipolfalle verdampfen die energiereichsten Atome, wodurch die Temperatur der übrig bleibenden Atome gering wird. Mit  $10^5$  Atomen beträgt die kritische Temperatur für den Übergang zum BEC typischerweise  $200 \text{ nK}$ . Bei weiterer Abkühlung konnte ein reines Kondensat aus etwa  $2 \cdot 10^4$  Atomen erzeugt werden.

Die Verbindung des neuen Ca-BECs mit der vorhandenen Technologie des optischen Calciumfrequenznormals soll jetzt für Präzisionsuntersuchungen genutzt werden, unter anderem als ein Forschungsschwerpunkt im Centre for Quantum Engineering and Space-Time-Research (QUEST in der PTB).

Gemessene Dichteverteilung der Calciumatome. Aus der Mitte der thermischen Atomwolke ragt nadelförmig das Bose-Einstein-Kondensat hervor.

Measured density distribution of the calcium atoms with the spicular Bose-Einstein condensate.

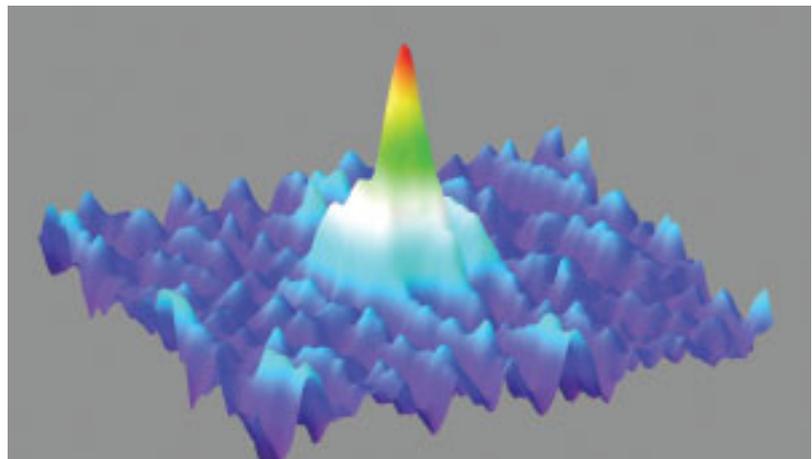
## First Bose-Einstein condensate with alkaline earth atoms

At PTB, it was possible for the first time worldwide to produce a Bose-Einstein condensate (BEC) from the atoms of the alkaline earth element calcium. In contrast to the hitherto customary Bose-Einstein condensates made of alkali elements, alkaline earth elements offer with their super narrow spectral lines novel possibilities for precision investigations.

If a strongly diluted gas is cooled close to absolute zero, then the quantum-mechanical properties of the gas particles come to the fore. In the case of bosons, i.e. particles with integer spin, a phase transition occurs, in which more and more particles are in the same state. This is called a Bose-Einstein condensate.

To this end,  $2 \cdot 10^6$  calcium atoms, precooled in magneto-optical traps to a temperature of  $20 \mu\text{K}$ , were loaded in an optical dipole trap. By weakening the holding force, hot atoms evaporate, whereby the remaining atoms are cooled. The critical temperature is reached with  $10^5$  atoms at typically  $200 \text{ nK}$ . Of these, approx.  $2 \cdot 10^4$  atoms can be cooled to form a pure condensate.

The new Ca-BEC – combined with technologies of the optical calcium frequency standard – will be used for precision investigations. This goal is now to be further pursued at PTB – among others, as a focus of research of the excellence cluster QUEST (Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research) at PTB.



## Dimensionelle Messungen an Kolben-Zylinder-Systemen

Das Boltzmann-Projekt der PTB verfolgt das Ziel, die Boltzmann-Konstante  $k$  mittels der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie möglichst präzise zu bestimmen. Hierzu werden unter anderem genau definierte Heliumgasdrücke benötigt. Diese Drücke sollen mit Hilfe einer Druckwaage realisiert werden, deren wesentliche Komponenten Kolben-Zylinder-Systeme sind. Für die präzise Berechnung des Drucks muss die Geometrie von Kolben und Zylinder bei Umgebungsdruck genau genug bekannt sein. Die geforderten geringen relativen Messunsicherheiten für die effektive Querschnittsfläche können dabei nur durch aufwendige Messverfahren erreicht werden.

Für die Formmessungen wurde hierzu ein Zylinderformmessgerät sehr hoher Grundgenauigkeit eingesetzt. Die Messunsicherheit des Geradheitsmessverfahrens konnte durch ein verbessertes Umschlagmessverfahren, das die Einflüsse von Führungsabweichungen weitgehend eliminiert, weiter minimiert werden. Zur Messung der Durchmesser wurde der Komparator für Maß und Form eingesetzt. Dieses hochpräzise Referenzgerät stellt die Weltspitze für taktile Abstands- und Durchmessermessungen im Messbereich bis zu 180 mm dar.

Um dreidimensionale Informationen zu erhalten, wurde ein mathematisches Ausgleichsverfahren entwickelt, das die 3D-Gestalt von Kolben und Zylinder aus den redundanten Messinformationen mit möglichst geringen Widersprüchen ermittelt. Es konnte gezeigt werden, dass die dimensionellen 3D-Standardmessunsicherheiten nur 7 nm (für den Kolben) bzw. 15 nm (für den Zylinder) betragen. Daraus leitet sich eine relative Messunsicherheit für die Querschnittsfläche von  $0,7 \cdot 10^{-6}$  ab. Mit diesen Werten ist das im Boltzmann-Projekt definierte Ziel für die dimensionelle Charakterisierung der Kolben-Zylinder-Systeme sogar deutlich unterschritten worden.

3D-Gestalt eines Druckkolbens (stark überhöht dargestellt)



## Dimensional measurements on piston-cylinder systems

The Boltzmann project of PTB is aimed at determining the Boltzmann constant  $k$  as precisely as possible by means of dielectricity constant gas thermometry. This requires, among other things, exactly defined helium gas pressures. These pressures shall be realized with the aid of a pressure balance, whose most important components are piston-cylinder systems. For the precise calculation of the pressure, the geometry of the piston and of the cylinder at ambient pressure must be known with sufficient accuracy. Thereby, the required low relative measurement uncertainties for the effective cross-sectional area can be reached only with the aid of sophisticated measurement procedures.

For the form measurements, a cylinder form measuring instrument of very high basic accuracy was used. By an improved reversal method, which largely eliminates the influences of guide errors, the measurement uncertainty of the straightness measurement procedure could be further minimized. For the measurement of the diameters, the comparator for length and form was used. This high-precision reference device is the worldwide leading device for tactile distance and diameter measurements in the measurement range up to 180 mm.

To obtain three-dimensional information, a mathematic compensation procedure has been developed which determines the 3D shape of the piston and of the cylinder from the redundant measurement information with the minimum possible contradictions. It could be shown that the dimensional 3D standard measurement uncertainties amount to only 7 nm (for the piston) and to 15 nm (for the cylinder). From this, a relative measurement uncertainty of  $0.7 \cdot 10^{-6}$  is derived for the cross-sectional area. With these values, the objective defined in the Boltzmann project for the dimensional characterization of the piston-cylinder systems has furnished an even clearly better result.

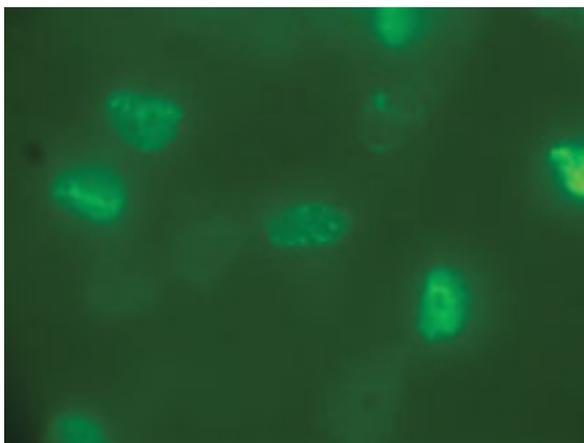
3D shape of a pressure piston (strongly amplified representation)

## Live Cell Imaging

Das Gesundheitsrisiko durch geringe Strahlendosen von weniger als 100 mSv ist kaum abschätzbar, weil einerseits epidemiologische Daten nur für höhere Dosen existieren und andererseits die Strahlenantwort von vielen biologischen Effekten sowie individuellen Unterschieden abhängen kann. Um das Risiko bei niedrigen Strahlendosen besser abzuschätzen, müssen die grundlegenden biophysikalischen und onkologischen Wirkungsmechanismen entschlüsselt werden. Für die notwendigen experimentellen Untersuchungen ist der Microbeam der PTB ein ideales Instrument. In einer interdisziplinären Kooperation zwischen der PTB, der Deutschen Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen (DSMZ, Braunschweig) und der Universitätsklinik Düsseldorf wurde am Microbeam die neue Methode des „Live Cell Imaging“ etabliert.

Durch die gezielte Bestrahlung mit einzelnen oder abgezählten Teilchen werden im Zellkern oder Zytoplasma lebender Zellen genau definierte Strahlenschäden erzeugt. Entlang von Teilchenspuren entstehen Doppelstrangbrüche, die in Sekunden und Minuten Reaktionen und Reparaturprozesse in den Zellen auslösen. Durch die Fusion des fluoreszierenden Proteins GFP mit einem Reparaturprotein, welches in Zellen an den Doppelstrangbrüchen akkumuliert, können diese frühen Reaktionen „live“ beobachtet werden.

Auch die Effekte unterschiedlicher Strahlenqualitäten lassen sich am Microbeam studieren. Zum Beispiel wird mit  $\alpha$ -Teilchen die Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung, mit hochenergetischen Protonen dagegen die Wirkung von locker-ionisierender Röntgenstrahlung untersucht. In früheren Studien wurden hauptsächlich die späten biologischen Effekte wie klonales Überleben oder Chromosomenaberrationen durch falsche DNA-Reparatur ausgewertet.



## Live Cell Imaging

The health risk caused by low radiation doses of less than 100 mSv can hardly be assessed because – on the one hand – epidemiological data exist for higher doses only and because, on the other hand, the radiation response can depend on many radiobiological effects as well as individual sensitivities. For a better assessment of the risk at low radiation doses, the basic biophysical and oncological mechanisms of action must be decoded. For the necessary experimental investigations, the microbeam of PTB is an ideal instrument. In an interdisciplinary cooperation between PTB, the German Collection of Microorganisms and Cell Cultures (Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen – DSMZ, Braunschweig) and the University Hospital of Düsseldorf, the new method of “live cell imaging” was established at the microbeam.

By means of a targeted irradiation with single or counted particles, well-defined radiation damage is generated in the cell nucleus or cytoplasm of living cells. Along the particle tracks, double strand breaks (DSB) occur which – within seconds and minutes – can trigger a variety of reactions and repair processes in the cell. These initial responses can now be observed “live” as the appearance of fluorescent foci (along the particle tracks), because the cells have been genetically modified by fusing, for example, the green fluorescent protein (GFP) to a selected reporter or repair protein, which then accumulates at the DNA damage sites.

The effects of different radiation qualities, too, can be studied at the microbeam. For example, the impact of densely ionising radiation is examined with  $\alpha$ -particles, whereas in contrast to this, the impact of loosely ionising X-radiation is examined with high-energy protons. In the previous studies, mainly the late biological effects, such as clonal survival or chromosome aberrations due to false DNA repair, have been measured.

Leuchtende Foci: Doppelstrangbrüche (hier: in humanen Fibroblasten nach der Bestrahlung mit  $\alpha$ -Teilchen) lassen sich durch ein fluoreszenzmarkiertes Reporterprotein sichtbar machen.

Luminous foci: Double strand breaks (here: in human fibroblasts after irradiation with  $\alpha$ -particles) can be made visible by means of a fluorescence-labelled reporter protein.

## THz-Strahlung an der Metrology Light Source

Die Metrology Light Source (MLS) in Berlin-Adlershof ist eine ideale Strahlungsquelle für die Metrologie. Sie liefert brillante Strahlung vom THz- bis zum weichen Röntgenbereich. Bei einer speziellen Einstellung des Speicherrings, die besonders kurze Elektronenpakete (Bunches) zu speichern ermöglicht, erfolgt kohärente Emission von Synchrotronstrahlung im Wellenlängenbereich von THz-Strahlung. Dadurch sind im THz-Bereich um viele Größenordnungen höhere Strahlungsleistungen verfügbar als bei Normalbetrieb eines Speicherrings. Die MLS ist der erste Elektronenspeicherring weltweit, der für diesen speziellen Betriebsmodus konzipiert und aufgebaut wurde.

Für die Nutzung der langwelligen THz-Strahlung an der MLS wurde eine spezielle Strahlführung geplant, um die Strahlung ohne signifikante Beugungsverluste zum Experiment zu transportieren. Dazu war es notwendig, die Aperturen und optischen Elemente (Spiegel und Fenster) im Strahlrohr im Vergleich zu konventionellen, typischerweise für das mittlere Infrarot optimierten Strahlführungen zu vergrößern. Erste Messungen zeigten eine wesentliche Überhöhung der Strahlungsleistung (von bis zu 60 mW) im THz-Bereich. Diese ist um mehr als zwei Größenordnungen höher als an einem typischen IR-Strahlrohr.

Insgesamt bieten sich somit ideale Voraussetzungen für die Metrologie im langwelligen Spektralbereich. An diesem neuen THz-Strahlrohr kann insbesondere auch die Mikrospektroskopie im IR-Bereich bis in den sub-THz-Bereich ausgedehnt werden. Zur Zeit wird der zugehörige Messplatz mit einem Fourier-Transform-Spektrometer und einem Mikroskop ausgestattet und für den Nutzerbetrieb vorbereitet.

Vergleich der gemittelten THz-Leistung im Fokus des THz- und IR-Strahlrohres an der MLS – bei einer Elektronenenergie von 630 MeV.

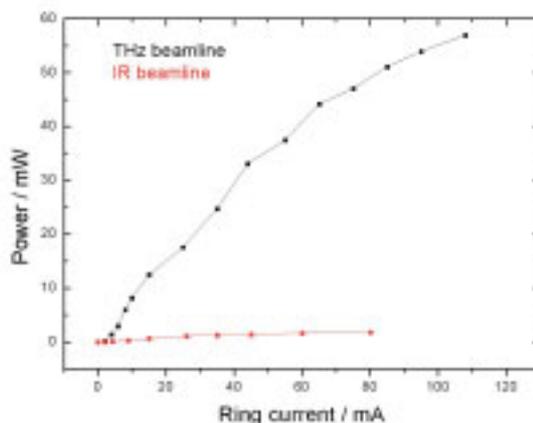
## THz radiation at the Metrology Light Source

The Metrology Light Source (MLS) in Berlin-Adlershof is an ideal radiation source for metrology. It provides brilliant radiation from the THz range to the soft X-ray region. If the storage ring is adjusted in a specific way, facilitating in particular the storage of short electron packages (bunches), a coherent emission of synchrotron radiation in the wavelength range of THz radiation occurs. Due to this, radiant powers are available in the THz range which are higher by many orders of magnitude than during the normal operation of a storage ring. The MLS is the first electron storage ring worldwide which has been designed and set up for this specific operating mode.

For the use of the longwave THz radiation at the MLS, a specific beam guidance was planned to transport the radiation to the experiment without any significant diffraction losses. For this purpose, it was necessary to enlarge the apertures and optical elements (mirror and windows) in the beamline, in comparison to conventional beam guidances optimized typically for the medium infrared. First measurements showed a substantial enhancement of the radiation power (of up to 60 mW) in the THz range. The latter is greater by more than two orders of magnitude than on a typical infrared beamline.

All in all, this opens up ideal conditions for metrology in the longwave spectral range. At this new THz beamline, especially the microspectroscopy in the IR range can be extended up to the sub-THz range. Currently, the suitable measuring set-up is being equipped with a Fourier Transform

Spectrometer and a microscope and prepared for user operation.



Comparison of the averaged THz performance in the focus of the THz and IR beamline at the MLS – at an electron energy of 630 MeV.

## Blick ins Immunsystem

Wissenschaftlern der PTB ist es gelungen, durch kernmagnetische Resonanz an  $^{129}\text{Xe}$ -Atomen die Bindung eines Krankheitserregers an ein für die Immunabwehr wichtiges Protein spektroskopisch nachzuweisen. Eindringende körperfremde Antigene (Bakterien, Viren oder Parasiten bzw. deren Fragmente) müssen in einem ersten Schritt der Immunabwehr von einem bestimmten Proteinkomplex mit der Bezeichnung MHC gebunden werden. Das ist die Voraussetzung dafür, dass die schädlichen Eindringlinge von T-Zellen erkannt und in einer anschließenden Immunreaktion zerstört werden können.

Die Formation des Komplexes aus Antigen-MHC wurde in der PTB untersucht. Da Xenon als Edelgas kaum chemische Bindungen eingehen kann, wird es mittels eines Molekülkäfigs und eines sogenannten Linkers an das Antigen gekoppelt. Ungestört von seinem neuen Anhang bindet das Virusfragment in wässriger Lösung anschließend an das MHC-Protein. Dieses Ereignis kann mithilfe kernmagnetischer Resonanzmessung nachgewiesen werden. Die Nachweisgrenze kann unter Ausnutzung des Austauschprozesses von Xenonatomen zwischen Molekülkäfig und Lösung bis in den Bereich von nmol/l herabgesetzt werden. Das ist eine wichtige Voraussetzung für die Beobachtung der Antigenbindung durch MHC. Die Arbeit gelang in Kooperation mit dem Forschungsinstitut für Molekulare Pharmakologie und dem Max Delbrück Zentrum für Molekulare Medizin in Berlin.

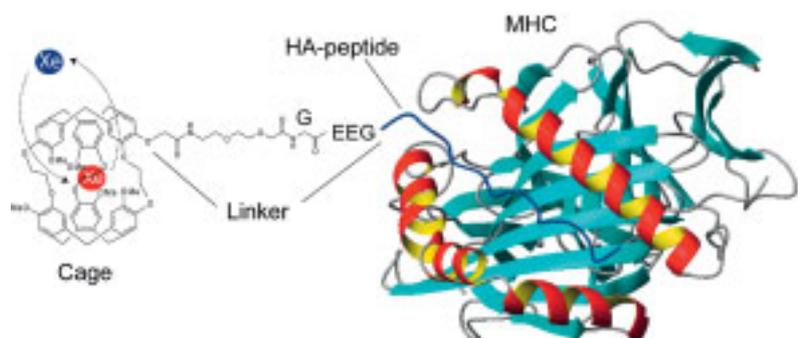
Xenonatome wechseln ständig zwischen der Lösung und dem Molekülkäfig (Cage), der mit dem HA-Peptid über einen Linker (Polyethylenglykol und Viererpeptid GEEG) gekoppelt ist. Dieses Konstrukt kann sich an MHC binden, sodass sich drei Formen NMR-spektroskopisch unterscheiden lassen: freies Xenon, Xenon im Käfig ohne oder mit Bindung an MHC.

## Insight into the immune system

By means of nuclear magnetic resonance on  $^{129}\text{Xe}$  atoms, scientists from PTB have managed to spectroscopically demonstrate the bond of a pathogenic germ to a protein which is important for the immune system. In a first step, the invading exogenous antigens (bacteria, viruses, parasites, or their fragments) have to be bound by a certain protein complex designated as "MHC". This is the precondition for the harmful intruders to be detected by T cells and destroyed during a subsequent immune reaction.

The formation of the complex of antigen and MHC has been investigated at PTB. Since xenon, a noble gas, can hardly be responsive to any other bonds, it is bound to the antigen, in the present case a fragment of the influenza virus by means of a molecular cage and of a so-called linker. Unhindered by its new appendix, the virus fragment then binds to the MHC protein in an aqueous solution. This complex formation can be demonstrated by means of nuclear magnetic resonance. By exploiting the exchange process of xenon atoms between the molecular cage and the solution, the complex formation can even be detected at nano molar concentrations – an important requirement for observing the antigen binding by MHC. This work was successfully carried out in collaboration with the Leibniz-Institut für Molekulare Pharmakologie and the Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin in Berlin.

Xenon atoms permanently move between the solution and the molecular cage (Cage) which is coupled to the HA peptide via a linker (polyethylene glycol and quadripeptide GEEG). This construction can bind to an MHC so that NMR spectroscopy makes it possible to differentiate between three forms: free xenon, xenon in the cage with or without an MHC bond.



## Die 60. Sitzung des Kuratoriums der PTB

Die 60. Jahrestagung des Kuratoriums der PTB fand am 28. und 29. Mai 2009 in Braunschweig statt.

Die Tagung begann mit der Begrüßung der Kuratoren und Gäste durch Prof. Dr. Ernst O. Göbel, Präsident der PTB. Im Anschluss wurden die Teilnehmer zu ausgewählten Arbeitsgruppen und Messplätzen aus den Abteilungen der PTB sowie dem QUEST-Institut auf dem PTB-Gelände geführt.

Das nachmittägliche Kolloquium stand dann ganz im Zeichen der Beteiligung der PTB am Exzellenzcluster „QUEST – Quantum Engineering and Space-Time-Research“. Als Teil des Clusters wurde auf dem Braunschweiger Gelände das QUEST-Institut an der PTB eingerichtet. An QUEST sind neben der PTB die Leibniz-Universität Hannover, das MPI für Gravitationsphysik, das Laserzentrum Hannover und das Zentrum für angewandte Raumfahrttechnik und Mikrogravitation der Universität Bremen beteiligt. Es soll vier Kernbereiche der Forschung (Quanten-Engineering, Quantensensoren, Physik der Raumzeit und Zukunftstechnologien) deutlich voranbringen. Das Kolloquium eröffnete Prof. Göbel. Im Anschluss informierte Prof. Dr. Wolfgang Ertmer, Kurator der PTB und QUEST-Koordinator, über die Vorgeschichte sowie den organisatorischen Rahmen von QUEST. Fachvorträge hielten der QUEST-Institutseiter Prof. Dr. Piet Schmidt, sowie die Leiterin der QUEST-Nachwuchsforscherguppe Dr. Tanja E. Mehlstäubler. Sie sprachen zu den Themen „Quantenlogik-Spektroskopie an gefangenen Ionen: Vom Quantencomputer zur Uhr“ und „Quanten-Sensoren mit lasergekühlten Ionen“.

Die Kuratoriumssitzung am 29. Mai 2009 wurde von MinDir Jürgen Meyer, dem neuen Präsidenten des Kuratoriums der PTB, eröffnet. Meyer informierte in seinem Bericht über das Europäische Metroloieforschungsprogramm EMRP, die Rahmenbedingungen für die Arbeit der PTB und die Technologiepolitik der Bundesregierung und des BMWi. Im Zusammenhang mit dem EMRP wünschte Meyer allen Beteiligten viel Erfolg bei der Durchführung des Programms und der Projekte und sicherte die weitere finanzielle und

## The 60th meeting of the Kuratorium (Advisory Board) of PTB

The 60th annual meeting of the Kuratorium of PTB took place on 28th and 29th May 2009 in Braunschweig.

The meeting began with the reception of the members of the Kuratorium and guests by Prof. Dr. Ernst O. Göbel, President of PTB. Following this, the participants were taken to selected Working Groups and test stands from the divisions of PTB as well as to the QUEST Institute which has been newly established on PTB's Braunschweig campus.

The afternoon's colloquium was dominated by PTB's participation in the Excellence Cluster "QUEST – Quantum Engineering and Space-Time-Research". As part of the Cluster, the QUEST Institute was set up at PTB on its Braunschweig campus. Apart from PTB, Leibniz University Hannover, the MPI for Gravitational Physics, the Hannover Laser Centre and the Center of Applied Space Technology and Microgravity of the University of Bremen are involved in QUEST. Its goal is to promote four core areas of research (quantum engineering, quantum sensors, the physics of space-time and future technologies). The colloquium was opened by Prof. Göbel. After that, Prof. Dr. Wolfgang Ertmer, member of the Kuratorium of PTB and QUEST Coordinator, informed the audience about QUEST's previous history as well as its organisational scope. The Head of the QUEST Institute at PTB, Prof. Dr. Piet Schmidt, and Dr. Tanja E. Mehlstäubler, Head of the QUEST Junior Research Group, presented QUEST's scientific work in their lectures "Quantum logic spectroscopy on trapped ions: from quantum computers to clocks" and "Quantum sensors with laser-cooled ions".

The meeting of the Kuratorium on 29th May 2009 was opened by Jürgen Meyer, head of the Directorate-General "Technology Policy" in the Federal Ministry of Economics and Technology (BMW) and the new President of PTB's Kuratorium. In his report, he gave an overview of the European Metrology Research Programme EMRP, the framework conditions for the work of PTB and the technology policy of the federal government and the BMWi. In connection with the EMRP, he wished all those concerned much success in



Sitzung des Kuratoriums der PTB am 29. Mai 2009 in Braunschweig.

Meeting of the Advisory Board of PTB on 29th May 2009 in Braunschweig.

ideelle Unterstützung durch das BMWi zu. Darüber hinaus sei das EMRP ein gutes Beispiel für europäische Koordinierung von Forschungsprogrammen und könne daher ein Vorbild auch für andere Ressortforschungseinrichtungen und Forschungsfelder sein. Auch der Wissenschaftsrat habe das EMRP mit großem Interesse wahrgenommen.

Die sehr gute bis exzellente Bewertung der Forschung der PTB durch den Wissenschaftsrat müsse nun gesichert und ausgebaut werden. Hier unterstütze das BMWi die meisten der vorliegenden Empfehlungen, insbesondere für die Verbesserung der Rahmenbedingungen bei Personalgewinnung, Haushaltsflexibilisierung und Bürokratieabbau. Diese seien auch in die Erarbeitung der neuen Zielvereinbarung zwischen PTB und BMWi eingeflossen.

Das BMWi sehe die Arbeit der PTB als wichtigen Teil der Technologiepolitik und wolle hier gerne unterstützend tätig werden, auch durch Erhöhen des Bekanntheitsgrades der vielfältigen Kompetenzen der PTB im BMWi.

Eine Auswahl der herausragenden Ergebnisse der PTB aus dem vergangenen Jahr stellte Prof. Göbel angereichert mit einigen Kennzahlen, Daten und Fakten in seinem Bericht vor.

Unter anderem berichtete Prof. Göbel über den aktuellen Stand der Großprojekte zur metrologischen Grundlagenforschung, die der Vorbereitung einer möglichen Neudefinition

implementing the programme and the projects, and assured the further financial and political support by the BMWi. He pointed the EMRP out to be a good example of the European coordination of research programmes, which could also be a model for other departmental research institutes and fields of research and emphasised that the German Council of Science and Humanities, too, had taken note of the EMRP with great interest.

As Dr. Meyer continued, the “very good” to “excellent” evaluation of PTB’s research by the German Council of Science and Humanities now has to be built on and extended. Here, the BMWi is supporting most of the recommendations made, in particular those for the improvement of the framework conditions in personnel recruitment, the flexibilisation of the budget and the reduction of bureaucracy, and these recommendations have also been taken into account in the development of the new “Agreement on Objectives” between PTB and BMWi.

The BMWi sees PTB’s work as an important part of its technology policy and is committed to actively supporting it, also by making the manifold fields of competence of PTB better known within the BMWi.

In his report, Prof. Göbel presented a selection of PTB’s outstanding results from the past year, augmented with some of the key data, facts and figures.

der Basiseinheiten für die Masse, die Stoffmenge, die elektrische Stromstärke und die Temperatur dienen. Es werde angestrebt, diese Projekte nach Möglichkeit rechtzeitig zur Sitzung der Meterkonvention im Jahre 2011 abzuschließen. Prof. Göbel erwähnte den erfolgreichen Start der Braunschweig International Graduate School of Metrology (IGSM). Dort sei insbesondere die Sommerschule im letzten Jahr hervorzuheben, auf der hochkarätige Sprecher/innen, teils aus dem Kuratorium der PTB, verschiedene Aspekte der Metrologie beleuchtet hatten.

Weiterhin beschrieb er den Stand der Vorbereitungen zur Durchführung des European Metrology Research Programme (EMRP) mit Hilfe der 7-jährigen Artikel-169-Förderung durch die EU. Zu den 200 Mio. Euro, die die nationalen Metrologieinstitute einbringen, steuert die EU weitere 200 Mio. Euro bei. In insgesamt 11 Aufrufen ("calls") zur Einreichung von Projektvorschlägen, verteilt über die nächsten fünf Jahre, sollten zahlreiche europäisch koordinierte Forschungskonsortien gebildet werden, die auf gesellschaftlich und wirtschaftlich relevanten Gebieten metrologische Forschung betreiben und eine europäische Infrastruktur nachhaltig einrichten bzw. vorbereiten. Der erste Aufruf werde sich mit dem Thema „Metrologie für die Energie“ befassen; nach der Begutachtung Ende 2009 werde mit dem Start der Projekte Anfang 2010 gerechnet.

Besides other things, Prof. Göbel reported on the current state of the large-scale projects on metrological basic research, which are serving to prepare a possible redefinition of the base units for mass, amount of substance, electrical current and temperature. The aim is to complete these projects, if possible, in time for the meeting of the Meter Convention in 2011. Prof. Göbel mentioned the successful start of the Braunschweig International Graduate School of Metrology (IGSM). Here, the Summer School in the last year was to be emphasised in particular, where high-profile speakers, some of them from PTB's Kuratorium, highlighted different aspects of metrology.

Prof. Göbel, furthermore, described the status of the preparations for the implementation of the European Metrology Research Programme (EMRP) with the aid of the 7-year support by the EU in accordance with Article 169 of the EC contract. Besides the EUR 200 million which the National Metrology Institutes are contributing, the EU is providing a further EUR 200 million. It is envisaged that in a total of 11 "calls" spread over the next five years, numerous research consortia coordinated across Europe should undertake metrological research on socially and economically relevant areas and sustainably set up or prepare a new European metrology infrastructure. The first call will deal with the subject of "Metrology for Energy"; after the review of the proposals at the end of 2009, the start of the projects is expected for the beginning of 2010.



Prof. Dr.-Ing. Scheuren, Prof. Dr. von Klitzing, Dipl.-Ing. von Siemens und Prof. Dr. Dössel im QUEST-Institut der PTB, in dem u. a. die wissenschaftlichen Grundlagen einer neuen Generation optischer Uhren entwickelt werden sollen.

Prof. Dr.-Ing. Scheuren, Prof. Dr. von Klitzing, Dipl.-Ing. von Siemens and Prof. Dr. Dössel in the QUEST Institute of PTB, in which, besides other things, the scientific bases of a new generation of optical clocks are to be developed.

Bei den Großprojekten wies Prof. Göbel u. a. auf die Einweihung des Glocker-Baus mit seinen Elektronenbeschleunigeranlagen und den 7-Tesla-Magnetresonanztomografen hin, der in Berlin-Buch gemeinsam mit dem Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin betrieben wird. Für die Zukunft seien verschiedene weitere Erweiterungs- bzw. Ersatzbauten auf den PTB-Arealen in Berlin und Braunschweig geplant.

Im weiteren Verlauf der Sitzung stellte sich Dr. J. Stenger als neues Mitglied des Präsidiums mit seinen Aufgaben und Zielen vor. Dr. U. Siegner und Dr. H. Bosse berichteten anlässlich ihrer Berufungen zu Abteilungsleitern über die Arbeiten der Abteilungen 2 bzw. 5.

Der Vorsitzende des Ausschusses zur Ergänzung des Kuratoriums, Prof. Dr. Klaus von Klitzing, berichtete über die Sitzung des Ausschusses vom Vortag, und der Schatzmeister des Helmholtz-Fonds e. V., Ruprecht von Siemens, stellte seinen Bericht zur positiven wirtschaftlichen Entwicklung des Helmholtz-Fonds e. V. vor.

#### **Persönliches:**

Als neue Mitglieder des Kuratoriums wurden Dr. Petra Gowik, Prof. Dr.-Ing. Winfried Büttner, Prof. Dr. Wolfgang Ertmer und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kowalsky berufen.

Im Berichtsjahr schied Prof. Dr. Christian P. Beckervordersandforth als Mitglied aus dem Kuratorium aus.

As examples of large-scale projects, Prof. Göbel pointed out, among other things, the dedication of the Glocker Building with its electron accelerator facility and the 7-Tesla magnetic resonance tomograph, which is operated in Berlin-Buch jointly with the Max Delbrück Centre. For the future, further extensions or replacement buildings are planned at the PTB sites in Berlin and Braunschweig.

In the further course of the meeting Dr. J. Stenger, as a new member of the Presidential Board, presented his tasks and objectives and – on the occasion of their assignment as heads of their divisions – Dr. U. Siegner and Dr. H. Bosse reported on the work of Divisions 2 and 5.

The Chairman of the Committee for the Extension of the Advisory Board (Ausschuss zur Ergänzung des Kuratoriums), Prof. Dr. Klaus von Klitzing, reported on the previous day's meeting of the Committee, and the Treasurer of the Helmholtz Fund (Helmholtz-Fond e. V.), Ruprecht von Siemens, presented his report on the positive economic development of the Helmholtz Fund.

#### **Personal matters:**

Dr. Petra Gowik, Prof. Dr.-Ing. Winfried Büttner, Prof. Dr. Wolfgang Ertmer and Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kowalsky were appointed as new members of the Kuratorium.

In 2009, Prof. Dr. Christian P. Beckervordersandforth retired from the Kuratorium.

## EU-Förderung für das Europäische Metrologieforschungsprogramm bewilligt

Um die weltweite Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie langfristig zu sichern und kommenden metrologischen Herausforderungen mit vereinten Kräften zu begegnen, hat sich die PTB als Deutschlands nationales Metrologieinstitut mit ihren europäischen Partnerinstituten zusammengetan und das europäische Metrologieforschungsprogramm (EMRP) auf den Weg gebracht, welches die Kompetenz aller Institute in gemeinsamen Forschungsprojekten bündelt. Das EMRP wird Forschungsansätze ermöglichen, die einzelnen Instituten im Alleingang bisher nicht möglich waren.

Aktuell wird ein Teil des Programms mit einem finanziellen Einsatz von 64 Mio. Euro bearbeitet, wovon die EU ein Drittel kofinanziert. Dabei stehen gesellschaftlich und wirtschaftlich relevante Fragen der Metrologie auf den Gebieten Gesundheit, Elektrizität und Magnetismus, SI und Naturkonstanten sowie der dimensionellen Metrologie im Vordergrund. Um das volle EMRP implementieren zu können, haben sich die europäischen Metrologieinstitute, zusammengeschlossen im Verein EURAMET mit Sitz in Braunschweig, um eine Förderung des EMRP nach Artikel 169 des EG-Vertrages bemüht.

Im Frühjahr 2009 entschieden das Europäische Parlament und der Ministerrat, das mit einem Budget von 400 Mio. Euro für die

## EU Funding for the European Metrology Research Programme approved

In order to ensure the long-term global competitiveness of European industry and to meet future metrological challenges with combined strength, the Physikalisch-Technische Bundesanstalt, as Germany's national metrology institute, has joined forces with its European partner institutes and has launched the European Metrology Research Programme (EMRP), which concentrates the competence of all institutes into joint research projects. The EMRP will enable research approaches which have so far not been possible for individual institutes to undertake alone.

Currently, a part of the programme has been worked out with a financial input of 64 million euros, of which the EU co-finances one-third. Thereby, socially and economically relevant metrological questions in the fields of health, electricity and magnetism, SI and natural constants as well as dimensional metrology come to the fore. To be able to implement the entire EMRP, the European metrology institutes, united in the EURAMET association, located in Braunschweig, have endeavoured to obtain funding for the EMRP in accordance with Article 169 of the EC Treaty.

In spring 2009, the European Parliament and the Council of Ministers resolved to support

Pressekonferenz aus Anlass der Zustimmung des Europaparlaments zur EMRP-Förderung nach Artikel 169 des EG-Vertrages.

Von links: MinDirig Volker Rieke (BMBF), MinDir Jürgen Meyer (BMW), Erika Mann (Abgeordnete des Europäischen Parlaments), Dr. Robert-Jan Smits (EU-Kommission), Prof. Dr. Ernst O. Göbel (PTB-Präsident)

Press conference on the occasion of the approval by the European Parliament of the EMRP funding in accordance with Article 169 of the EC Treaty.

From left: Min.Dirig. Volker Rieke (BMBF), Min.Dir. Jürgen Meyer (BMW), Erika Mann (Member of the European Parliament), Dr. Robert-Jan Smits (EU Commission), Prof. Dr. Ernst O. Göbel (PTB President)



nächsten sieben Jahre geplante Forschungsprogramm mit 200 Mio. Euro zu unterstützen. Die restlichen 200 Mio. Euro werden von den europäischen Mitgliedsstaaten selbst aufgebracht. Mit diesem Erfolg ist eine wichtige Voraussetzung für eine Neuausrichtung der metrologischen Forschung innerhalb Europas geschaffen.

Das Programm wird von EURAMET gemanagt werden. In den nächsten Jahren werden die europäischen Forscher Gelegenheit haben, sich mit ihren Konsortien um Fördermittel zur metrologischen Forschung in verschiedenen Bereichen zu bewerben (siehe Tabelle 1). Von den vorgesehenen Aufrufen ist der erste, zum Thema „Metrologie für Energie“, bereits durchgeführt worden. Insgesamt neun große internationale Forschungsprojekte wurden bewilligt, die verschiedene Aspekte dieses wichtigen und aktuellen Themas abdecken, von neuen Beleuchtungssystemen über moderne Hochspannungs-Gleichstromversorgungsnetze bis hin zur verbesserten Effizienz von Kraftwerken aller Art (siehe Tabelle 2).

Das mittelfristige Ziel des EMRP ist, die Metrologie in Europa koordiniert so weiterzuentwickeln, dass sie den neuen Herausforderungen gerecht wird.

the planned research programme with its seven-year budget of 400 million euros, with 200 million euros. The remaining 200 million euros will be raised by the European member states themselves. This success creates an important precondition for a re-orientation of metrological research within Europe.

The programme will be managed by EURAMET. In the next few years, European researchers will have the opportunity to apply – with their consortiums – for funding for metrological research in various fields (see Table 1). Of the scheduled calls, the first one on the subject “Metrology for Energy” has already been conducted. A total of nine large international research projects have been approved; they cover various aspects of this important and topical subject, from novel lighting systems to modern high-voltage direct-current supply grids and to the improved efficiency of all types of power plants (see Table 2).

The medium-term goal of the EMRP is to so further develop metrology in Europe in a coordinated fashion, so as to be able to meet the new challenges.

	Aufruf Call	Schwerpunkt Main focus	Budget (Mio. Euro) Budget (millions Euro)
	2009	Energie/Energy (1.)	34
	2010	Umwelt/Environment (1.)	48
		Industrie/Industry (1.)	48
	2011	Gesundheit/Health (2.)	30
		SI-Darstellung/SI realization (1.)	30
		Neue Technologien/ New technologies	30
	2012	Industrie/Industry (2.)	40
		SI-Darstellung/SI realization (2.)	40
		Offener Exzellenz-Aufruf/ Open excellence call	10
Table 1: Aufrufe im Rahmen der Artikel-169-Förderung des EMRP	2013	Energie/Energy (2.)	55
		Umwelt/Environment (2.)	35

Table 1: Aufrufe im Rahmen der Artikel-169-Förderung des EMRP

Table 1: Calls within the scope of the Article 169 funding of the EMRP

- Characterisation of Energy Gases
- Metrology for Energy Harvesting
- Metrology for Liquefied Natural Gas
- Smart Electrical Grids
- Metrology for Solid State Lighting
- Metrology for Improved Power Plants
- Metrology for High-Voltage Direct Current
- Metrology for the New Generation of Nuclear Power Plants
- Metrology for Biofuels

Tabelle 2: Die im ersten Aufruf bewilligten EMRP-Projekte

Table 2: The EMRP projects approved in the first call

### Hermann-von-Helmholtz-Symposium und -Preis

Alle zwei Jahre lädt der Helmholtz-Fonds in Erinnerung an einen der Gründungsväter der PTB und ihren ersten Präsidenten zum Hermann-von-Helmholtz-Symposium ein. Dieses Jahr fand die Veranstaltung am 23. Juni in der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften in Berlin statt.

Die Veranstaltung stand diesmal unter dem Leitthema „Temperatur“. Drei ausgewiesene Experten, Prof. Dr. P. Hängi, Prof. Dr. G. Hasinger und Prof. Dr. H. Miller, befassten sich in ihren mitreißenden Vorträgen mit den Fragen „Temperatur: Was ist das eigentlich?“, „Wie kalt ist das Weltall?“ und „Wie warm ist die Erde? – Temperaturmessung in der Klimaforschung“. Ca. 100 interessierte Besucher erhielten einen Einblick in die wissenschaftlichen Herausforderungen, die mit dem alltäglichen Begriff der Temperatur verbunden sind.

Im Anschluss an die Symposiumsveranstaltung wurden die Preisträger des mit 20 000 Euro dotierten „Helmholtz-Preises 2009“ des Helmholtz-Fonds und des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft ausgezeichnet. Prof. Tobias J. Kippenberg, Dr. Ronald Holzwarth und Dipl.-Phys. Pascal Del’Haye wurden für ihre Entwicklung eines „Mini-Frequenzkammes auf einem Chip“ von der hochrangigen Expertenjury aus 36 Bewerbungen ausgewählt. Der neue „Mini-Kamm“

### Hermann von Helmholtz Symposium and Prize

Every two years, the Helmholtz Fund issues invitations to the Hermann von Helmholtz symposium in memory of one of the founding fathers of PTB and its first president. This year the event was held on 23rd June in the *Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften* (Berlin-Brandenburg Academy of Sciences) in Berlin.

This time, the guiding theme of the event was “Temperature”. Three distinguished experts, Prof. Dr. P. Hängi, Prof. Dr. G. Hasinger and Prof. Dr. H. Miller, addressed in their stirring lectures the topics “Temperature: What exactly is that?”, “How cold is space?” and “How warm is the Earth? – Temperature Measurement in Climate Research”. About 100 interested visitors received an insight into the scientific challenges which are still associated with this everyday term.

Following the symposium, the prize winners were awarded the “Helmholtz Prize 2009” of the Helmholtz Fund and the *Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft*, endowed with EUR 20 000. Prof. Tobias J. Kippenberg, Dr. Ronald Holzwarth and Dipl.-Phys. Pascal Del’Haye were selected by the high-ranking expert jury out of 36 applicants for developing a “mini-frequency comb on a chip”. The new “mini-comb” is based on an optical microresonator. When laser light is coupled into it, extremely high light intensities (photon densities) occur



Die Preisträger des Helmholtz-Preis 2009: Prof. Dr. Tobias Kippenberg (3. v. l.), Dr. Ronald Holzwarth (2. v. l.) vom MPI Garching und Dipl.-Phys. Pascal Del'Haye (4. v. l.) vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching mit Prof. Dr. Ernst O. Göbel (Vorsitzer des Helmholtz-Fonds e. V., links) und Dipl.-Ing. Ruprecht von Siemens (Schatzmeister des Helmholtz-Fonds e. V.).

The prize winners of 2009: Prof. Dr. Tobias Kippenberg (third from left), Dr. Ronald Holzwarth (second from left) from MPI Garching, and Dipl.-Phys. Pascal Del'Haye (fourth from left) from the Max Planck Institute for Quantum Optics in Garching, with Prof. Dr. Ernst O. Göbel (chairman of the Helmholtz Fund, left) and Dipl.-Ing. Ruprecht von Siemens (treasurer of the Helmholtz Fund).

beruht auf einem optischen Mikroresonator. Wird in ihn Laserlicht eingekoppelt, so treten extrem hohe Lichtintensitäten (Photonendichten) auf, mit einer Fülle von nichtlinearen Effekten. Ein solcher Effekt, der „Kerr-Effekt“, ermöglicht die Entstehung eines Frequenzkammes: Zwei Lichtquanten gleicher Energie werden in zwei Photonen umgewandelt, von denen das eine eine höhere, das andere eine niedrigere Energie hat. Die neu erzeugten Photonen können nun ihrerseits mit den ursprünglichen Lichtquanten interagieren und dabei wiederum neue Frequenzen erzeugen. Aus dieser Kaskade entsteht ein überraschend breites Spektrum von Frequenzen – ganz ohne die Verstärkung durch ein Lasermedium, das bei der herkömmlichen Methode nötig ist. Wie beim Femtosekundenlaser haben die im Mikroresonator generierten Frequenzen mit extrem großer Genauigkeit den gleichen Abstand, sodass sich der „Kamm“ hervorragend für Frequenzmessungen eignet.

with an abundance of nonlinear effects. One such effect, the “Kerr effect”, enables the creation of a frequency comb: two light quanta of equal energy are converted into two photons, of which one has a higher and the other has a lower energy. The newly produced photons can now interact with the original light quanta and thereby, in turn, produce new frequencies. From this cascade, a surprisingly broad spectrum of frequencies is created – entirely without the amplification within a laser medium which is necessary with the conventional method. As is the case with the femtosecond laser, the frequencies generated in the microresonator are – with extremely great accuracy – equally spaced, so that the “comb” is perfectly suitable for frequency measurements.



Minister zu Guttenberg und Prof. Göbel beim „Zeitvergleich“ vor der Atomuhr CS2

Minister Guttenberg and Prof. Göbel at a “time check” in front of the CS2 atomic clock

Großer Andrang zur Ansprache des Ministers an die PTB-Mitarbeiter

PTB's lecture hall packed with employees waiting to hear Minister Guttenberg's address to PTB



### Besuch des Bundeswirtschaftsministers

Am 30. Juli besuchte der Bundeswirtschaftsminister Karl-Theodor zu Guttenberg die PTB. Der oberste Dienstherr nutzte diese Gelegenheit, um sich selbst im Rahmen einer Laborführung ein Bild der Forschungs- und Dienstleistungsarbeiten zu machen. Anschließend richtete er in einer Rede im Hörsaal einige persönliche Worte an „seine“ Mitarbeiter im Hause und gratulierte ihnen zu ihrer guten Arbeit.

### Visit by the Federal Minister of Economics

On 30th July, the Federal Minister of Economics and Technology Karl-Theodor zu Guttenberg visited PTB, which is supervised by his ministry. He used this occasion for a laboratory tour, to gain an impression of the research and services performed here. Following this, in a speech held in the auditorium he addressed some personal words to “his” colleagues at PTB and congratulated them on their good work.



Prof. Göbel und Vizeminister Pu Changcheng im AQSIIQ anlässlich der Verlängerung der Vereinbarung über die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Metrologie zwischen AQSIIQ und dem BMWi

Prof. Göbel and Vice-Minister Pu Changcheng at AQSIIQ on the occasion of the extension of the agreement on the cooperation in the field of metrology between AQSIIQ and the BMWi

## Kooperationsabkommen mit China verlängert

Am 26. August 2009 unterzeichneten in China der Vizeminister Pu Changcheng der „General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine (AQSIQ)“ der Volksrepublik China und der Präsident der PTB, Prof. Ernst O. Göbel, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) die Verlängerung der Vereinbarung über die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Metrologie.

Ergänzend dazu wurde am 24. April 2009 in Braunschweig ein Memorandum of Understanding (MoU) zwischen dem nationalen Metrologieinstitut der Volksrepublik China (NIM) und der PTB unterzeichnet. Damit wird eine 30-jährige intensive und erfolgreiche Zusammenarbeit fortgeführt, die ganz wesentlich vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) gefördert wurde.

Die erste Vereinbarung zwischen dem Bundesministerium für Wirtschaft und dem damaligen Hauptamt für Metrologie der Volksrepublik China wurde am 29. Oktober 1979 vom damaligen Präsidenten der PTB, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Kind, und dem Vizeminister Li Leshan unterzeichnet.

Im Rahmen seines Besuches nahm Prof. Göbel auch an der Eröffnung des neuen zusätzlichen Standortes des NIM (Second Experimental Base, Changping Campus) teil. Dort sind auf einer Fläche von über 5 ha hochwertige Laborgebäude mit modernster Ausstattung errichtet worden, die das NIM in die Lage versetzen sollen, auf dem Gebiet der Metrologie eine führende Rolle einzunehmen.

Festveranstaltung zur Eröffnung des Changping Campus des NIM

Ceremony for the opening of the Changping Campus of the NIM



## Cooperation agreement with China extended

On 26th August 2009, Vice-Minister Pu Changcheng of the "General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine (AQSIQ)" of the People's Republic of China and the President of PTB, Prof. Ernst O. Göbel, by order of the Federal Ministry of Economics and Technology of the Federal Republic of Germany (BMWi), signed the extension of the agreement on the cooperation in the field of metrology.

In addition, on 24th April 2009 in Braunschweig, a Memorandum of Understanding (MoU) between the national metrology institutes of the People's Republic of China (NIM) and PTB was signed. As a result, 30 years of intensive and successful cooperation is continued, which was quite substantially promoted by the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ).

The first agreement between the Federal Ministry of Economics and the then Department of Metrology of the People's Republic of China was signed on 29th October 1979 by the then President of PTB, Prof. Dr.-Ing. Dieter Kind, and Vice-Minister Li Leshan.

Within the scope of his visit, Prof. Göbel also participated in the opening of the new additional campus of the NIM (Second Experimental Base, Changping Campus). There, on an area of more than 5 hectares, high-quality laboratory buildings with state-of-the-art equipment have been built; these are to put the NIM in a position of assuming a leading role in the field of metrology.

## Qualitätsmanagement

In Ergänzung zu den in einer Bundesoberbehörde geltenden rechtlichen Regelungen und Zuständigkeiten betreibt die PTB ein technisch ausgerichtetes Qualitätsmanagement. Seine ständige Verbesserung und Anpassung an die nationalen und internationalen Anforderungen wurde systematisch fortgesetzt. Dabei steht die uneingeschränkte weltweite Anerkennung der Ergebnisberichte der PTB im Vordergrund.

Grundlage dieser weltweiten Anerkennung bildet der jährliche Nachweis der Wirksamkeit des Qualitätsmanagementsystems gegenüber den internationalen Vertragspartnern. Auch in diesem Jahr konnte dies erfolgreich nachgewiesen werden.

Darüber hinaus wurden die Evaluierungen zwischen den nationalen Metrologie-Instituten (NMIs) von Deutschland, Österreich und der Schweiz erfolgreich fortgesetzt. Es wurden sechs Vor-Ort-Begutachtungen durch internationale Fachexperten durchgeführt. Dadurch konnte sowohl das Vertrauen in die europäischen Bewertungsverfahren gestärkt als auch ein Erfahrungsaustausch auf speziellen Gebieten der Metrologie unter dem Blickwinkel des Qualitätsmanagements ermöglicht werden. Für diese Begutachtungen konnten diesmal auch zwei Vorsitzende technischer Komitees von EURAMET gewonnen werden. Inzwischen sind weitere Länder dem Beispiel der deutschsprachigen NMIs gefolgt und haben ähnliche europäische Projekte gegründet, die die Evaluierung und Verbesserung der Qualitätsmanagement-Systeme durch internationale Fachexperten zum Ziel haben.

Im Ergebnis der externen und internen Bewertungsprozesse wurde die Angemessenheit und anforderungsgerechte Ausgestaltung des Qualitätsmanagements in der PTB sowohl durch die PTB selbst als auch durch die internationalen Bewertungsgremien erneut bestätigt. Außerdem konnten alle vom Gesetzgeber bzw. von Kunden geforderten Anerkennungen oder Akkreditierungen in Tätigkeitsfeldern, die nicht durch die Meterkonvention abgedeckt sind, unverändert bestätigt werden.

## Quality management

As supplement to the legal rules and competences effective in a higher federal authority, PTB operates a technically oriented quality management. Its constant improvement and adaptation to the national and international requirements were systematically continued. Thereby, the unrestricted worldwide recognition of the results reports of PTB (e.g. calibration certificates according to DIN EN ISO/IEC 17025) come to the fore.

The basis of this global recognition is that proof of the effectiveness of the QM system is rendered annually to the international contractual partners. Also in this year, this has been successfully accomplished by comparison measurements and by submitting reports.

Furthermore, the evaluations between the national metrology institutes (NMI) of Germany, Austria and Switzerland have been successfully continued. Six on-site assessments were conducted by international technical experts. As a result, confidence in the European review procedures could be reinforced and an exchange of experiences in special fields of metrology became possible from the perspective of quality management. This time it was possible to win over two chairpersons of EURAMET's technical committees for these assessments. Meanwhile, other countries have followed the example set by the German-speaking NMIs and have launched similar European projects, whose goal is the evaluation and improvement of the quality management systems by international technical experts.

As a result of the external and internal review processes, it was declared that the QM system is suitable and has been set out by PTB according to the requirements. This was confirmed once again by the international assessment committees. Furthermore, all approvals and accreditations required by the legislator or by the customers in fields of activity that are not covered by the Metre Convention could be confirmed without any modifications.

## PTB tritt dem OIML-MAA bei

Jede dritte Waage weltweit ist „Made in Germany“. Der große Marktanteil der deutschen Waagenindustrie spiegelt den guten Ruf ihrer Produkte wider – sie gelten als präzise und verlässlich. Zu diesem Erfolg trägt auch die PTB bei. Ihre nach OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale) ausgestellten Zertifikate sorgen dafür, dass von ihr geprüfte Waagen in zahlreichen Ländern der Welt zugelassen werden können. Bisher war die Anerkennung dieser Zertifikate nur „moralisch verpflichtend“. Doch seit dem 24.09.2009 gehört die PTB zum Kreis der weltweit zehn Institute (Issuing Participants), deren Zertifikate bindend sind. Es handelt sich dabei um Zertifikate, die in Einklang mit einer neuen, stark verpflichtenden Vereinbarung stehen, die alle Mitglieder der OIML, der weltweiten Organisation für das gesetzliche Messwesen, getroffen haben. Die OIML hat es sich zum Ziel gesetzt, überall auf der Welt die gleichen Qualitätsstandards für wichtige Messgeräte durchzusetzen, um unter anderem faire und verlässliche Grundlagen für den weltweiten Handel zu schaffen.

Die PTB darf nun auf Grundlage dieses sogenannten OIML-Mutual Acceptance Arrangement (OIML-MAA) Zertifikate ausstellen, und zwar zunächst für die Messgerätearten „Nichtselbsttätige Waagen“ (OIML R76) und „Wägezellen“ (OIML R60). Eine Anerkennung von Prüfergebnissen akkreditierter oder durch „peer assessments“ begutachteter Hersteller-Prüflaboratorien ist im Rahmen des OIML-MAA noch nicht möglich. Die PTB setzt sich aber in den entsprechenden Gremien der OIML weiterhin für die Durchsetzung dieser insbesondere für deutsche und europäische Hersteller wichtigen Forderung ein, und zwar unter klar definierten Bedingungen und mit einem hohen Anforderungsniveau an die betreffenden Prüflaboratorien. Die PTB beabsichtigt, die in zuständigen Leitungsgremien der OIML bereits begonnenen intensiven Diskussionen und Beratungen zu fördern, die sich mit der Anerkennung von Hersteller-Prüfergebnissen befassen. Ziel ist die Anerkennung von Hersteller-Prüfergebnissen für Waagen und Wägezellen unter definierten und streng kontrollierbaren Bedingungen. Das würde die zeitraubende Routinearbeit in der Prüflaboratorien deutlich reduzieren.

## PTB joins OIML-MAA

Every third weighing instrument worldwide is “Made in Germany”. The large market share of Germany’s weighing instrument industry reflects the good reputation of its products – they are viewed as precise and dependable. PTB has also contributed to this success. Its certificates awarded according to OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale) ensure that the weighing instruments tested by PTB can be approved in numerous countries in the world. Previously the recognition of these certificates was only “morally binding”. But since 24 September 2009 PTB has belonged to the circle of ten institutes worldwide (the “Issuing Participants”) whose certificates are binding. These are certificates which are in line with a new, strongly binding agreement, made by all members of OIML, the worldwide organization for legal metrology. OIML has set itself the aim of bringing through the same quality standards for important measuring instruments all over the world, in order to create fair and dependable foundations for worldwide trade.

PTB may now – on the basis of this so-called OIML Mutual Acceptance Arrangement (OIML-MAA) – issue certificates initially for the measuring instrument categories of “Non-automatic weighing instruments” (OIML R76) and “Load cells” (OIML R60). A recognition of the test results of manufacturers’ test laboratories which have been accredited or which have been evaluated by means of “peer assessments” is, within the scope of the OIML-MAA, not yet possible. However, in the respective OIML committees, PTB is still campaigning to bring through this requirement (which is of special importance for German and European manufacturers) – under clearly defined conditions and with a high requirement level for the test laboratories concerned. PTB intends to further the intensive discussions and consultations which have already begun in the executive committees of OIML with regard to the recognition of manufacturers’ test results. The aim is the recognition of manufacturers’ test results for weighing instruments and load cells under defined and strictly controlled conditions. That would clearly reduce the time-consuming routine work in the test laboratories.

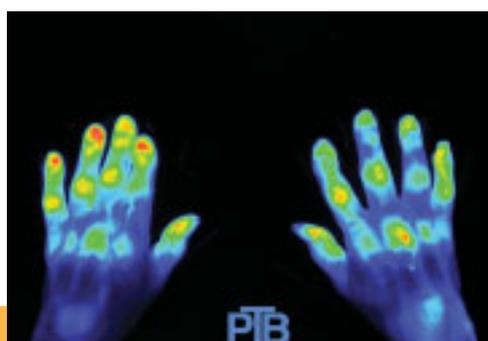
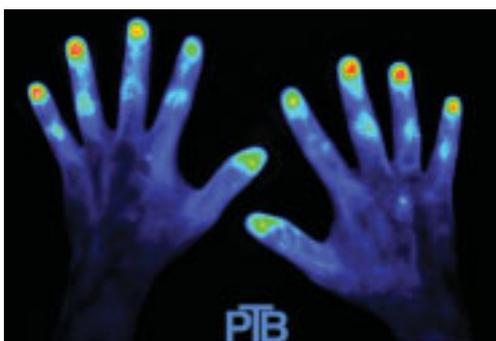
## Erfolgreicher Technologietransfer – „Rheuma-Video“ offenbart Entzündungsherde frühzeitig

PTB-Wissenschaftler des Instituts Berlin haben in einem Kooperationsprojekt mit mehreren Partnern eine Früherkennungsmethode für Rheuma entwickelt. Erste Studien zeigen, dass mit dem Verfahren Rheumaherde früher als mit einem Röntgengerät und preiswerter als mit einem Kernspintomographen entdeckt werden können.

Das optische Rheuma-Bildgebungsverfahren arbeitet mit einem Fluoreszenz-Farbstoff, der von nah-infrarotem Licht angeregt wird und seit langem klinisch zugelassen ist. Trifft das Licht auf ein Farbstoffmolekül, beginnt dieses zu leuchten und verrät so den Ort, an dem es sich gerade aufhält. Zuerst leuchten die Fingerspitzen, dann wandert das zuvor injizierte Kontrastmittel in Richtung des Handgelenkes weiter, live unter den Augen von Patient und Arzt. Sammelt sich der Farbstoff an bestimmten Gelenken, dann ist das für den Arzt ein Hinweis auf einen Rheumaherd, denn dort ist die Durchblutung erwartungsgemäß höher als in gesundem Gewebe.

Nach vielversprechenden Ergebnissen aus einer klinischen Vorstudie hat eine Berliner Medizintechnikfirma die Lizenzrechte von der PTB erworben, um eine größere Studie vorzubereiten. Erste Geräte wurden an rheumatologische Kliniken ausgeliefert, die nun die Praxistauglichkeit der Geräte erproben. Auch die gesetzlichen Krankenkassen haben bereits Interesse an dem Bildgebungsverfahren gezeigt.

Beide Bilder (links: Proband mit gesunden Händen; rechts: Rheumapatientin) entstanden jeweils 45 Sekunden nach der Injektion des Kontrastmittels. Die Aufnahmen wurden mit dem 2-Hand-Imager der PTB gemacht.



## Successful technology transfer – „Rheumatism video“ reveals centres of inflammation at an early stage

In a cooperation project with several partners, scientists of the Berlin Institute of the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) have developed an early detection method for rheumatism. First studies have shown that with this method, centres of rheumatism can be detected at an earlier stage than is possible with an X-ray apparatus and at lower costs than with a magnetic resonance tomograph.

The optical imaging method for rheumatism works with a fluorescent dye which is stimulated by near-infrared light and has been clinically approved for a long time. If the light hits a dye molecule, this molecule begins to light up and reveals thus its current location. First, the fingertips light up, then the contrast medium, which has been injected beforehand, moves on towards the wrist - live before the very eyes of the patient and the doctor. If the dye concentrates at certain joints, the doctor has an indication that there must be a centre of rheumatism, as the blood circulation is unsurprisingly higher there than in healthy tissue.

Following the promising results of a clinical preliminary study, a Berlin medical technology company acquired licensing rights from PTB in order to prepare a larger study. First instruments have been delivered to clinics for rheumatic diseases that are now testing the instruments' suitability for daily use. Also the statutory health insurance companies have already shown an interest in the imaging procedure.

Each picture (left: test person with healthy hands; right: patient suffering from rheumatism) was taken 45 seconds after the injection of the contrast medium. The pictures were taken with the 2-hand-imager of PTB.

## ArchiSafe – Elektronische Akten für die Ewigkeit

Immer höhere Berge von Akten und Dokumenten in Behörden und Unternehmen machen den Weg zum eGovernment, also der elektronischen Verwaltung, unumgänglich, denn sie spart Papier und gewährleistet den schnellen Austausch von Daten. Doch digitale Informationen sind flüchtig und leicht und unbemerkt zu manipulieren. Eine elektronische Akte muss daher hohen Anforderungen in puncto Authentizität, Integrität, Vertraulichkeit und Vollständigkeit erfüllen. Im Projekt ArchiSafe der PTB wurde ein Prototyp für eine Archivlösung geschaffen, mit der elektronische Akten langfristig rechtssicher aufbewahrt werden können. Die PTB hat im Rahmen des ArchiSafe-Projekts ein Schutzprofil entwickelt, welches erstmals Softwareentwicklern in Firmen und Behörden einen Katalog von Sicherheitsanforderungen liefert, der als Basis zur Entwicklung eigener Archivlösungen dienen kann. Das bundesweit erste Schutzprofil für den Bereich der Langzeitarchivierung wurde vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) nach den Common Criteria zertifiziert.

Die Evaluation des Schutzprofils für die Langzeitarchivierung wurde von der Prüfstelle CSC Deutschland Solutions GmbH, München, durchgeführt. Die Nutzung des ArchiSafe-Schutzprofils geht in die Hände des BSI über. Somit können Unternehmen und Behörden das Schutzprofil nutzen, um eigene Softwarelösungen zu entwickeln und entsprechend zertifizieren zu lassen.

Die Zertifikatsurkunden für das von Dr. Hackel (3.v.l.) und seinem Team entwickelte Schutzprofil für die elektronische Langzeitarchivierung wurden bei einem gemeinsamen Kolloquium der PTB und des BSI übergeben. Weitere Personen im Bild: Bernd Kowalski (BSI, rechts) sowie PTB-Präsident Prof. Göbel (3.v.r.) und BSI-Präsident Dr. Helmbrecht (Mitte).



## ArchiSafe – Electronic files in perpetuity

Piles of files and documents growing higher and higher in the offices of public authorities and businesses make the path to eGovernment, i.e. electronic administration, inevitable, because it saves paper and ensures the fast exchange of data. However, digital information is volatile and easily and unnoticeably manipulated. Therefore, an electronic file must fulfil high requirements in terms of authenticity, integrity, confidentiality and completeness. In the case of PTB's ArchiSafe project, a prototype for an archiving solution was created with which electronic files can be stored long-term and legally secure. Within the scope of the ArchiSafe project, PTB has developed a safeguarding profile which, for the first time, supplies software developers in companies and authorities with a catalogue of safety requirements which can serve as a basis for the development of one's own archiving solutions. The first national protective profile for the area of long-term archiving was certified by the Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (Federal Office for Information Security) in accordance with the Common Criteria.

The evaluation of the protective profile for long-term archiving was conducted by the testing laboratory CSC Deutschland Solutions GmbH, Munich. The use of the ArchiSafe protective profile is passed on to the BSI. Thus, businesses and public authorities can use the protective profile to develop their own software solutions and have them certified accordingly.

The certificates for the protective profile for long-term archiving developed by Dr. Hackel (third from left) and his team were presented at a joint colloquium of PTB and BSI. Other persons in the photo: Bernd Kowalski (right, BSI) as well as PTB President Prof. Göbel (third from right) and BSI President Dr. Helmbrecht (centre).

## Neue Zeiten für die Zusammenarbeit mit Armenien

Ausgehend von der regionalen Zusammenarbeit nahm die PTB in diesem Jahr direkte Kontakte mit Armenien auf. Thema der Beratung ist die nationale Qualitätsinfrastruktur des Landes. Motor der Bestrebungen in Armenien sind die bevorstehenden Verhandlungen über ein Freihandelsabkommen mit der Europäischen Union. Die PTB konnte beispielsweise Kooperationsmöglichkeiten mit nationalen und internationalen Partnern identifizieren. Aufbauend auf der bisherigen Zusammenarbeit mit der Weltbank, der Europäischen Kommission und dem International Trade Center in anderen Projekten konnten unmittelbar gemeinsame Aktivitäten mit dem armenischen Wirtschaftsminister abgestimmt werden. Gemeinsam wird bis Anfang 2010 ein fachlich und politisch abgestimmtes Konzept der nationalen Qualitätsinfrastruktur erarbeitet. Die PTB gestaltet den Prozess mit ihrer fachlichen Kompetenz maßgeblich mit, so mit der Beratung zur Neufassung des Metrologiegesetzes, bei der Durchführung eines Sensibilisierungs-Seminars der Europäischen Union, einer von der Weltbank finanzierten Nachfrageerhebung und einer vertieften Analyse der Metrologie und Akkreditierung.

## Ghana als Vorreiter der Metrologie in Westafrika

Nachdem bereits die Laboratorien für Masse, Temperatur und Druck des Ghana Standard Board (GSB) ihre Akkreditierung des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) erhalten haben, nahm das GSB auch die nächste Hürde zur internationalen Anerkennung. Im September 2009 wurde Ghana als erstes westafrikanisches Land assoziiertes Mitglied der Meter-Konvention. Die Verbesserung des metrologischen Angebots und der Prüfdienstleistungen des GSB unterstützt die Chancen Ghanas auf regionale und internationale Exporte (von der Fischereiwirtschaft bis zur Off-shore-Erdölförderung) und zugleich das allgemeine Investitionsklima. Durch qualifizierte Importkontrollen und Überwachung profitiert auch der Verbraucherschutz in Ghana. Die Qualität und Quantität der Waren auf den Märkten im Land werden verlässlicher – zum Vorteil der Kunden. Überdies wird Ghana als stärkstes Land für Dienstleistungen der Qualitäts-

## New times for the cooperation with Armenia

On the basis of the regional cooperation, PTB opened direct contact with Armenia in this past year. The subject of the consultation is the national quality infrastructure of the country. The motor of the goals in Armenia is the forthcoming negotiations about a free trade agreement with the European Union. PTB could, for example, identify opportunities for cooperation with national and international partners. Based on the previous cooperation with the World Bank, the European Commission and the International Trade Center in other projects, it was possible to coordinate joint activities directly with Armenia's Economic Minister. Jointly by the beginning of 2010, a technically and politically coordinated concept of the national quality infrastructure will be worked out. PTB with its technical competence significantly helps shape the process, for example with the consulting for the amended version of the metrology law, with the conducting of an awareness-raising seminar of the European Union, a demand survey financed by the World Bank and an in-depth analysis of metrology and accreditation.

## Ghana as precursor of metrology in West Africa

After the laboratories for mass, temperature and pressure of the Ghana Standard Board (GSB) had already received their accreditation of the Deutscher Kalibrierdienst (DKD) (German Calibration Service), the GSB also took the next hurdle for international recognition. In September 2009, Ghana was the first West African country to become an associated member of the Metre Convention. The improvement of the metrological offer and the testing services of the GSB support Ghana's chances for regional and international exports (from fisheries to off-shore oil production) and at the same time the general investment climate. Through qualified import controls and monitoring, also the consumer protection in Ghana profits. The quality and quantity of the goods on the markets in the country are becoming more reliable – to the advantage of the customers. Moreover, Ghana as strongest country for services of the quality infrastructure within the Economic Community of West African States (ECOWAS), will in future be

infrastruktur innerhalb der Westafrikanischen Staatengemeinschaft (ECOWAS) in Zukunft eine Schlüsselrolle bei der Stärkung der Panafrikanischen Metrologieorganisation AFRIMETS zukommen.

### **Aufbau regionaler Qualitätsinfrastruktur in der Karibik**

Das wirtschaftliche Integrationsbündnis CARICOM (Caribbean Community), die Mitgliedschaft in der WTO sowie das Wirtschaftspartnerschaftsabkommen (EPA) mit der Europäischen Union eröffnen der Karibik zahlreiche Möglichkeiten hinsichtlich ihrer sozialen und wirtschaftlichen Entwicklung. Die Qualitätsinfrastruktur in der Karibik, insbesondere die der kleineren Insel- und Festlandstaaten, ist bisher kaum ausgeprägt. Seit 2007 berät die PTB die Länder beim Aufbau einer regionalen Qualitätsinfrastruktur innerhalb eines Projekts der Inter-American Development Bank (IDB). Seit 2009 führt die PTB zwei eigenständige Vorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) durch. Das erste Vorhaben zielt darauf ab, die Grundinfrastruktur der Metrologie in der Karibik zu stärken und zuverlässige messtechnische Dienstleistungen anzubieten. Das zweite Vorhaben wirkt hierzu ergänzend und setzt sich das Ziel eines koordinierten und nachfrageorientierten Aufbaus der regionalen Qualitätsinfrastruktur, die international Anerkennung findet. Träger der Vorhaben ist die CARICOM Regional Organization for Standards and Quality (CROSQ). Der deutsche Beitrag umfasst dabei Fach-, Organisations- und Prozessberatungen durch internationale, regionale und nationale Kurzzeitfachkräfte, Fortbildungen und Schulungen, Gerätebeschaffungen, Seminare, Workshops sowie die Unterstützung von Vergleichsmessungen.

Die PTB wirkt seit rund 45 Jahren im Auftrag der Bundesregierung in der technischen Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Transformationsländern. Die Partnerländer werden unterstützt, ihre nationalen Systeme der Qualitätsinfrastruktur (Mess-, Normen-, Prüfwesen, Qualität sichern, Akkreditierung, Zertifizierung) zu stärken. Dadurch leistet die PTB in den Partnerländern einen Beitrag zur gerechten Teilhabe am globalen Handel sowie dem Verbraucher-, Umwelt- und Gesundheitsschutz.

accorded a key role in the strengthening of AFRIMETS, the Pan-African metrology organization.

### **Setting up the regional quality infrastructure in the Caribbean**

The economic integration alliance CARICOM (Caribbean Community), the membership in the WTO as well as the Economic Partnership Agreement (EPA) with the European Union open up numerous opportunities for the Caribbean in terms of its social and economic development. The quality infrastructure in the Caribbean, in particular that of the smaller island and mainland states, has so far scarcely taken shape. Since 2007, PTB has been advising the countries in the setting up of a regional quality infrastructure within a project of the Inter-American Development Bank (IDB). Since 2009, PTB has been implementing two independent projects on behalf of the Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) (Federal Ministry for Economic Cooperation and Development). The first project aims at strengthening the basic infrastructure of metrology in the Caribbean and to offer reliable metrological services. The second project acts supplementary to this and sets itself the goal of a coordinated and demand-oriented set-up of the regional quality infrastructure, which gains international recognition. The supporting organization of the project is the CARICOM Regional Organization for Standards and Quality (CROSQ). The German contribution thereby encompasses technical, organizational and process consulting through international, regional and national short-term specialists, advanced education and training courses, equipment procurement, seminars, workshops as well as the support of comparison measurements.

For about 45 years, PTB has been acting on behalf of the federal government in the technical cooperation with developing and transformation countries. The partner countries are supported in the strengthening of their national systems of quality infrastructure (metrology, standardization, testing, quality assurance, accreditation, certification). As a result, PTB contributes to the fair participation of the partner countries in global trade as well as consumer, environmental and health protection.

## Grundschüler experimentieren in der PTB

Physik im Speziellen und Naturwissenschaft im Allgemeinen ist nicht erst etwas für „die Großen“. Denn selbständig experimentieren, beobachten und schlussfolgern, das gibt es jetzt im *WissensForscher*-Labor der PTB auch schon für Grundschüler. An jeweils einem Termin pro Woche können sich Schüler im Alter zwischen sechs und zehn Jahren mit Kilogramm, Meter und Sekunde auseinandersetzen – Themen, die auch in der PTB zuhause sind. Die Kinder, die mit der ganzen Klasse oder als Arbeitsgemeinschaft in die PTB kommen, sind unter Anleitung selbst für die Durchführung der Experimente verantwortlich. Das *WissensForscher*-Projekt will damit nicht nur bei Schülern Interesse und Freude am physikalischen Experimentieren wecken, es bietet auch Grundschulen Hilfestellung dabei, wie naturwissenschaftlicher Unterricht mit geringem Aufwand spannend gestaltet werden kann. Dabei steht das fundierte naturwissenschaftliche Konzept, das den Kindern eigene Erfahrungen beim phänomenorientierten Forschen ermöglicht, im Vordergrund.

Durch den Schnupperunterricht möchte die PTB Grundschullehrer ermutigen, die Idee und das Konzept der *WissensForscher* – einem Projekt, das von einigen PTB-Mitarbeitern ehrenamtlich und in ihrer privaten Zeit ins Leben gerufen wurde – selbst auszuprobieren, sei es im Sachkundeunterricht, in einer AG oder in der Betreuungszeit. Hierbei wurden auch Unterrichtsmaterialien entwickelt – für experimentellen Physikunterricht zum „Nachmachen“. Bisher liegen 24 Unterrichtseinheiten sowie eine Lehrmittel-DVD für Schulen mit Filmen und Hintergrundinformationen zum Download ([www.WissensForscher.de](http://www.WissensForscher.de)) bereit. Weiteres Material ist in Vorbereitung. Das Projekt hat inzwischen landesweit Aufmerksamkeit bei Schulen und Politikern erregt und wird von mehreren Sponsoren und Stiftungen sowie von der Landesschulbehörde und dem niedersächsischen Kultusministerium gefördert.

Die Resonanz auf das gesamte Projekt und auf das PTB-Angebot eines experimentellen Physikunterrichts war derart groß, dass alle Termine für das laufende Schuljahr innerhalb

## Primary school pupils experiment at PTB

Physics in particular and natural sciences in general are not just meant for “grown-ups”, because independent experimenting, observation and reasoning are offered now in the *WissensForscher* (*KnowledgeSearchers*) laboratory of PTB, even for primary school pupils. On one date each per week, pupils from six to ten years old can deal with the kilogram, metre and second – subjects that are at home at PTB. The children, who come to PTB with their whole class or as a school club, are responsible for the conducting of their experiments, under guidance. The *WissensForscher* Project (*KnowledgeSearchers* Project) does thereby not only want to arouse the pupils' interest and joy in physical experimentation, it also offers primary schools assistance in showing how natural science instruction can be made fascinating with little effort. Thereby, the well-founded natural science concept which enables the children to gain their own experience with the phenomenon-oriented research, comes to the fore.

Through the taster instruction, PTB would like to encourage primary school teachers themselves to try out the idea and the concept of the *WissensForscher* – a project that has been created by some PTB staff members on an honorary basis and in their own free time – whether it be in special field instruction, in a school club or during supervisory periods. Hereby, instruction materials were also developed – for experimental physics instruction to be “reproduced”. Up to now, there are 24 instruction units as well as a teaching aid DVD for schools, with films and background information ready for downloading ([www.WissensForscher.de](http://www.WissensForscher.de)). Further material is being prepared. The project has meanwhile attracted attention nationwide in schools and with politicians and is funded by several sponsors and foundations as well as by the state school authority and the Niedersächsisches Kultusministerium (Ministry of Culture of Lower Saxony).

The resonance to the entire project and to the PTB offer of experimental physics instruction was so great that all dates for the current school year were booked out within a few days. At the same time, the first *WissensForscher* AGs (*KnowledgeSearcher*

weniger Tage ausgebucht waren. Gleichzeitig gründen sich rund um die PTB (in Braunschweig und Salzgitter) die ersten *WissensForscher*-AGs in den Schulen. Das *WissensForscher*-Labor der PTB hat damit seine „Probezeit“ überaus erfolgreich absolviert und wird als längerfristiges Projekt fortgesetzt.

Zum Start des *WissensForscher*-Labors kamen am 11. August 2009 Zweitklässler der Grundschule Löwenherz aus Wedtlenstedt bei Braunschweig in die PTB. Schon vor diesem Start waren innerhalb weniger Tage alle wöchentlichen Unterrichtstermine weit über das Schuljahr hinaus ausgebucht. Anmeldungen werden aber weiter entgegengenommen: Telefon: 0531- 592 3006 (Pressestelle, PTB).

clubs) are being established in the schools all around PTB (in Braunschweig and Salzgitter). The *WissensForscher* laboratory of PTB has thus completed its “trial period” extremely successfully and will be continued as a long-term project.

At the beginning of the *WissensForscher* laboratory on 11th August 2009, second grade pupils from the Löwenherz Primary School in Wedtlenstedt near Braunschweig came to PTB. Already prior to this start, all weekly instruction dates were booked out within a few days, far beyond the school year. Registrations, however, are still being accepted: Telephone: +49 531 592 3006 (Press and Information Office, PTB).



**WissensForscher**  
Kinder experimentieren

# Zahlen und Fakten • Figures and Facts

## Personal: Entwicklung • Staff: development

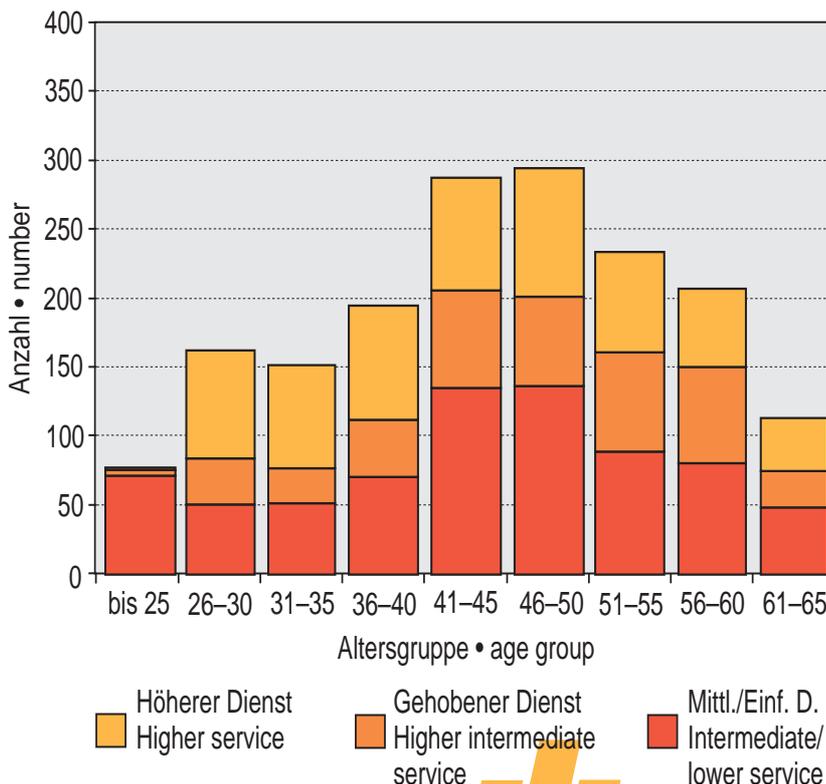
Personelle Entwicklung von 2000 bis 2009 (Stand: 31. Dezember 2009) • Development of staff

a) unbefristet • unlimited in time    b) zeitlich befristet • limited in time

Beschäftigungsverhältnis	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
a)										
Beamte • civil servants	501	503	507	506	508	510	515	523	517	513
Angestellte • employees	808	786	767	744	727	692	863	833	830	831
Arbeiter • workers	207	211	208	207	193	196	—*	—	—	—
gesamt • total	1516	1500	1482	1457	1428	1398	1378	1356	1347	1344
b)										
Auszubildende • trainees	147	136	138	144	158	159	150	136	134	135
befristet Beschäftigte temporary staff	44	52	53	52	61	69	66	98	110	175
Drittmittelpersonal staff members financed by third parties	92	104	106	122	105	109	169	162	172	185
Mitarbeiter gesamt staff member total	1799	1792	1779	1775	1752	1735	1763	1752	1763	1839

\* 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 2009)**

	BS	Berlin	
IT-Systemelektroniker	18 (6)	– –	information and telecommunication technologists
Elektroniker/in für Geräte und Systeme	31 (10)	– –	electronics technician for devices and systems
Physiklaboranten	22 (6)	– –	laboratory technicians, physics
Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik	14 (4)	– –	electronics engineer for electrical and building services engineering
Feinwerkmechaniker			precision instrument maker
Fachrichtung Feinmechanik	12 (4)	6 (2)	speciality: precision mechanics
Fotografen	3 (1)	– –	photographers
Technische Zeichner	3 (1)	– –	draftsmen
Feinoptiker	2 (2)	– –	precision optician
Mediengestalter	1 (0)	– –	media designer
Tischler	– –	4 (2)	joiners
Systeminformatiker	– –	10 (0)	IT systems technicians
Fachangestellte für Bürokommunikation	– –	6 (3)	specialists in office communications
Verwaltungsfachangestellte	– –	3 (0)	public administration employee
gesamt	106 (34)	29 (7)	total

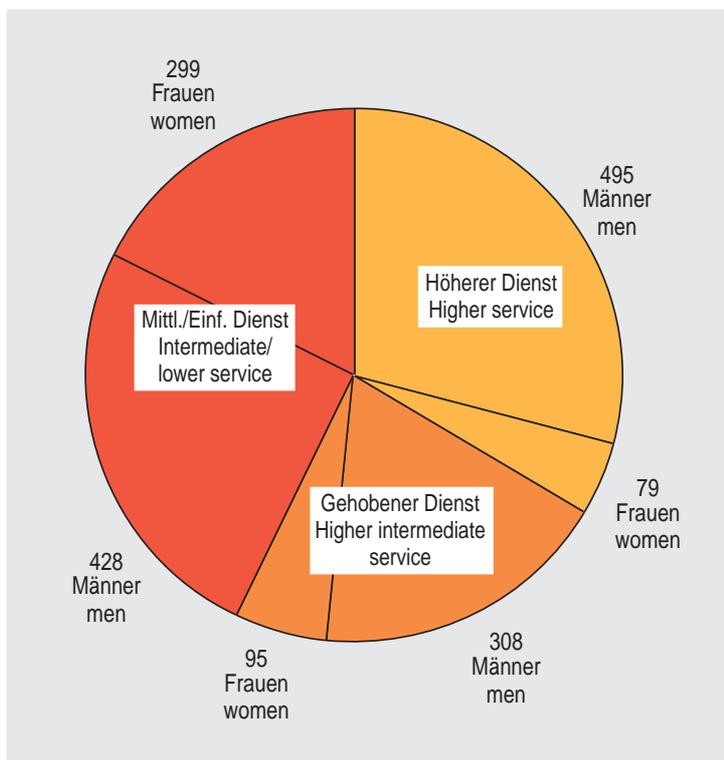
Die PTB gehört zu den größten Ausbildungsbetrieben in der Region. Gegenwärtig sind 135 Auszubildende bei der PTB angestellt. In Klammern sind die Neueinstellungen im Berichtsjahr angegeben.

The PTB is among the most important institutions of the region which provide training. 135 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)



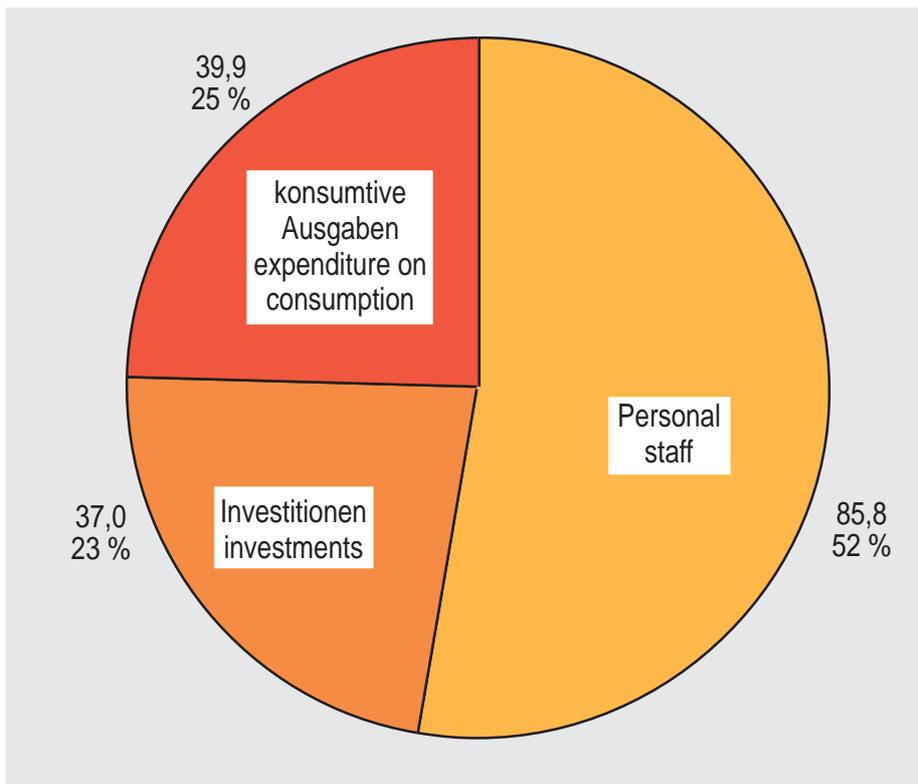
**Haushalt: Gebühren • Budget: charges**

Das Gebührenaufkommen (Gebühren und tarifliche Entgelte) der PTB im Vergleich der letzten Jahre (in 1000 Euro)

Comparison of the charges received by PTB in the past years (fees and compensation for services according to collective tariff agreement) (in 1000 Euro)

Gebühren	2007	2008	2009	charges
Amtshandlungen und sonstige Gebühren	6457	7097	7059	official acts and repayment work; other fees
Prüfung und Zulassung von Spielgeräten	2162	4419	3669	tests and approvals of gaming machines
von Prüfstellen (Elektrizität)	222	311	254	of test centres (electricity)
Leistungen im Rahmen des DKD	1693	992	1305	services rendered within the framework of DKD
Gebühreneingang gesamt	10534	12819	12287	total charges income

**Haushalt: Ausgabenverteilung • Budget: break-down of expenditure**



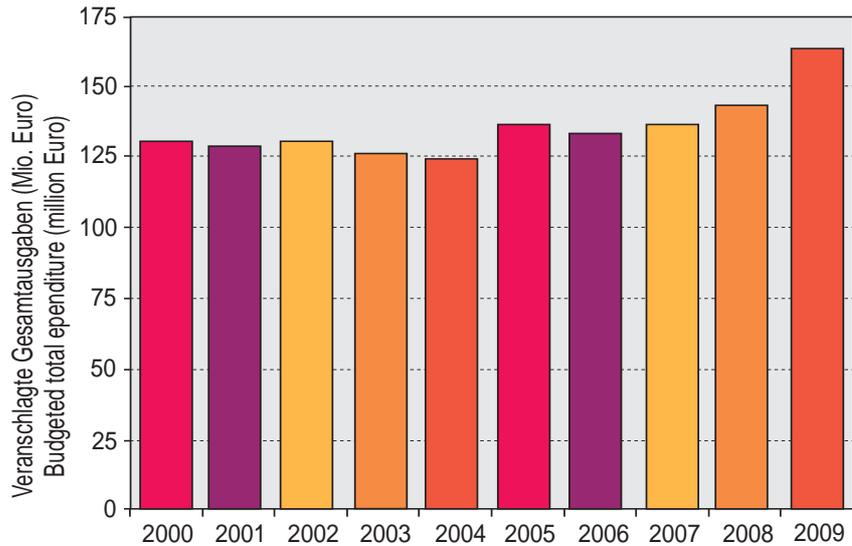
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. Euro). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

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	2007	2008	2009	budgetary means
Personalausgaben	74,4	78,8	85,8	staff costs
Investitionen (Bau und Geräte)	29,0	28,0	37,0	investments (building activities and instruments)
Zuweisungen und Zuschüsse	0,1	0,4	0,6	allocations and grants
konsumtive Ausgaben	29,4	34,0	39,9	expenditure on consumption
gesamt	132,9	141,2	163,0	total

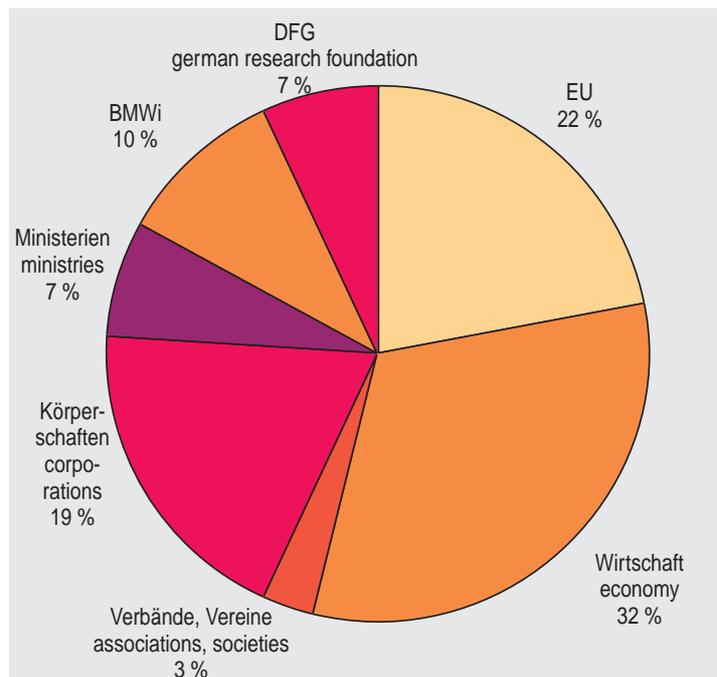
Haushalt: Entwicklung • Budget: development



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 2009 auf 10,4 Mio. Euro. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Insgesamt wurden im Berichtsjahr 18,7 Mio. Euro für 427 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) verwendet (davon 2,6 Mio. Euro für 75 Projekte in Berlin).



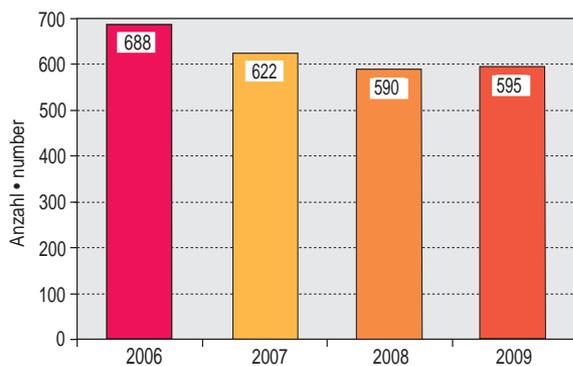
In 2009, the third-party funds for research projects added up to a total of 10,4 million Euro. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources. In the year under review, a total of 18,7 million Euro were used for 427 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 2,6 million Euro of these for 75 projects in Berlin.

Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures

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

... in Braunschweig		2007	2008	2009	
elektrische Energie	MWh	26 119	25 597	27 851	electrical energy
Wärme	MWh	20 492	23 681	21 840	heat
Gas	m <sup>3</sup>	26 775	30 763	31 705	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	87 419	88 210	82 100	water
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnliche Gewerbeabfälle	t	54	64	58	refuse-like industrial waste
recycelte Abfälle	t	398	379	356	recycled waste
Abfälle zur Beseitigung	t	94	32	16	hazardous waste
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	78 204	91 409	80 443	waste disposal costs (approx.)
... in Berlin		2007	2008	2009	
elektrische Energie	MWh	5883	7050	7028	electrical energy
Gas	m <sup>3</sup>	49 200	47 200	48 200	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	24 650	32 800	25 800	water
Helium, flüssig	l	44 100	53 280	63 240	helium, liquid
Stickstoff, flüssig	l	57 798	80 838	66 149	nitrogen, liquid
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnliche Gewerbeabfälle	t	64	65	78	refuse-like industrial waste
recycelte Abfälle	t	25	32	54	recycled waste
Abfälle zur Beseitigung	t	4	4	5	hazardous waste
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	9900	9500	21 500	waste disposal costs (approx.)

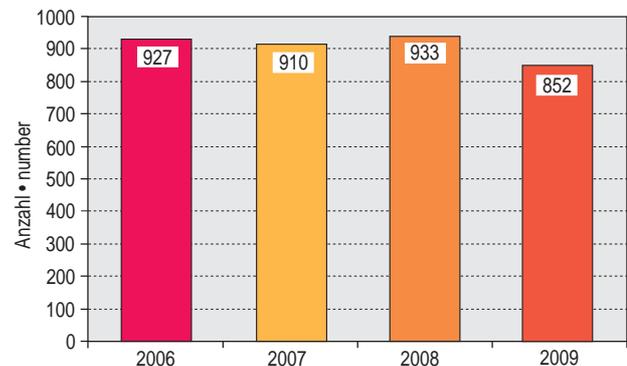
Veröffentlichungen • Publications



Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 2006 bis 2009 (vgl. Datenbank „PTB-Publica“ im Internet)

Number of publications by PTB staff members (in scientific journals, books, conference digests, etc.) between 2006 and 2009 (cf. database “PTB-Publica” on the web)

Vorträge • Lectures



Anzahl der auswärtigen Vorträge, die PTB-Mitarbeiter/innen in den Jahren 2006 bis 2009 gehalten haben

Number of lectures held by PTB staff members outside PTB between 2006 and 2009

**PTB-Seminare im Jahr 2009 • PTB-Seminars in 2009**

245. PTB-Seminar (18.–19. März 2009)  
Scatterometry and Ellipsometry on structured surfaces

246. PTB-Seminar (18. Februar 2009)  
Revisions-sicheres System zur Aufzeichnung von Kassenvorgängen und Messinformationen

247. PTB-Seminar (13. Mai 2009)  
Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich

248. PTB-Seminar (18.–19. Mai 2009)  
Nanopartikel-Charakterisierung: Anforderungen, Methoden und Bedarf an messtechnischer Rückführung?

249. PTB-Seminar (8.–10. Juni 2009)  
Current challenges in the Metrology of Ionizing Radiation in sub-micrometer dimensions

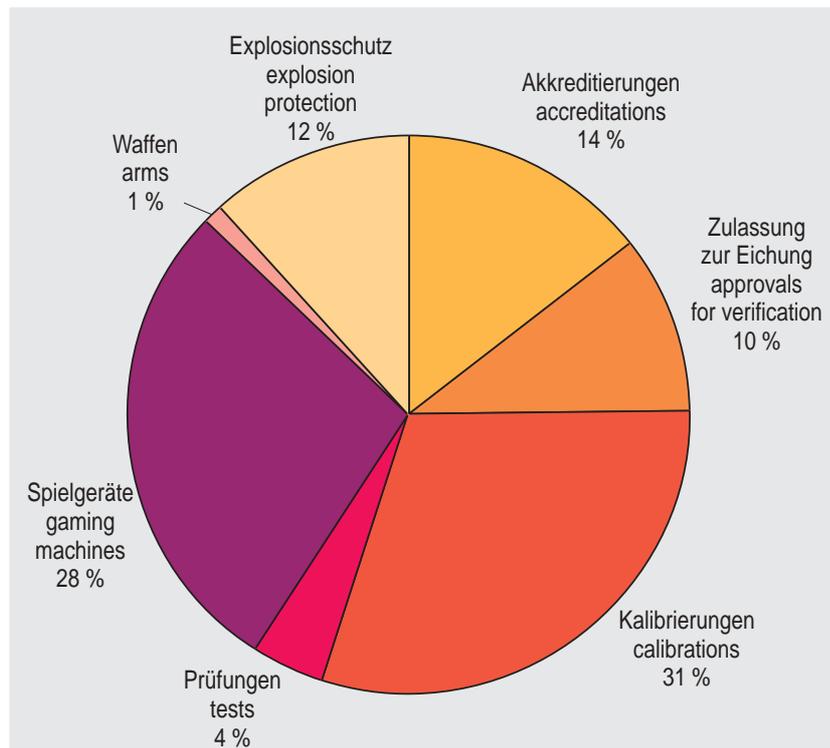
250. PTB-Seminar (24.–25. Juni 2009)  
Microflow Metrology

251. PTB-Seminar (20. Oktober 2009)  
Neue Trends in der optischen Ebenheitsmesstechnik

252. PTB-Seminar (28.–29. Oktober 2009)  
Kommunikative Zähler

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

Einnahmenanteile im Jahr 2009 der verschiedenen Dienstleistungsbereiche der PTB. Gesamtforderungen: 13,28 Millionen Euro.



Income distribution of 2009 among the various service sectors of PTB. Total receivables: 13.28 million euro.

## 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 2009 wurden 22 Länder in vier Kontinenten durch 24 bilaterale Projekte beim Aufbau ihrer Qualitätsinfrastruktur unterstützt. Ebenfalls 24 Projekte verfolgen einen regionalen oder sektoralen Ansatz. Der Projektmittelabfluss im Jahr 2009 betrug 8 Mio. Euro. Fast 2000 Teilnehmer aus 45 Ländern konnten an 140 speziellen Fortbildungsseminaren in Fachinstituten in Deutschland und anderen Ländern durch Projektförderungen teilnehmen. Es wurden 200 Stipendiaten aus 48 Ländern insgesamt mehr als 90 Monate in der PTB, in den Eichbehörden der Bundesländer, der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), in Firmen und Universitäten, in Laboratorien des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) und in nationalen Metrologieinstituten 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 2009, 22 countries on four continents were supported in the setting up of their quality infrastructures by 24 bilateral projects. Likewise, 24 projects follow a regional or sectoral approach. The project funds outflow in 2009 amounted to EUR 8 million. Almost 2000 participants from 45 countries were able to participate in 140 special advanced training seminars in technical institutes in Germany and other countries through project funding. 200 scholarship holders from 48 countries were trained for a total of more than 90 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 German Calibration Service and in state metrological institutes.

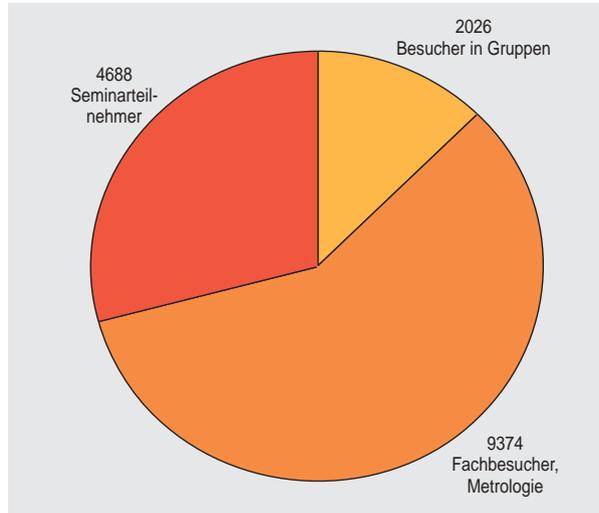
**Gastwissenschaftler, Gäste und Besucher**

Im letzten Jahr kamen 16 088 Besucher aus aller Welt in die PTB (Standort Braunschweig). Den größten Anteil bildeten die metrologischen Fachbesucher aus Wissenschaft und Wirtschaft (9374) sowie die Teilnehmer an unterschiedlichsten Seminaren, Tagungen und Kolloquien (4688). Auch der allgemeine Besucherdienst der PTB, im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit, fand wie gewohnt regen Zuspruch. 2026 Besucher (in 85 Gruppen) schauten den Wissenschaftlern in Braunschweig über die Schultern. Weitere 5000 Besucher folgten der Einladung zum „Tag der offenen Tür“ in Braunschweig und 1300 Besucher kamen zur „Langen Nacht der Wissenschaften“ ins Willy-Wien Laboratorium in Berlin.

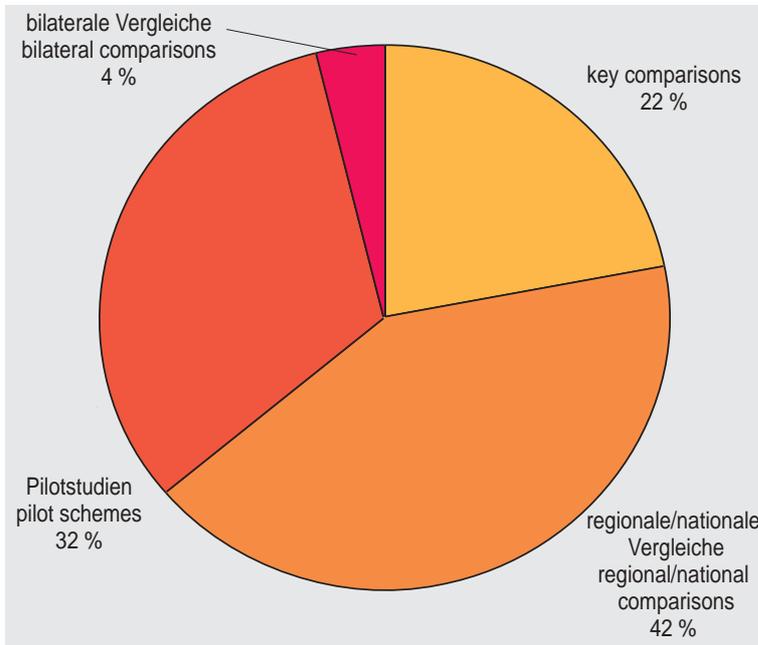
**Guest scientists, guests and visitors**

Last year, 16 088 people from all parts of the world visited PTB (Braunschweig site). Most of them were metrological professionals from science and economy (9374) as well as participants in the diverse seminars, meetings and colloquia (4688).

PTB’s general visitor service within the scope of public relations work was also popular as usual. 2026 visitors (in 85 groups) observed the scientists work in their laboratories. Another 5000 visitors took up the opportunity to visit PTB on its „Open Day“ in Braunschweig and 1300 visitors came to the Willy-Wien Laboratory at the „Long Night of the Sciences“ in Berlin.



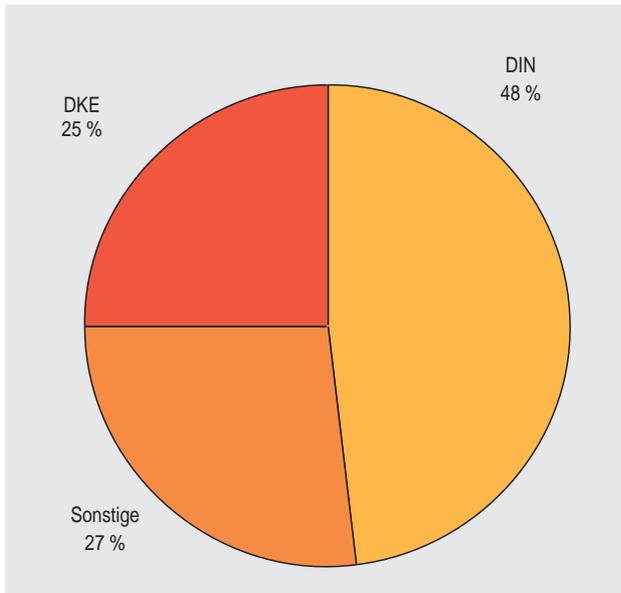
**Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements**



In the year under report, PTB took part in 50 comparable measurements, namely 11 key comparisons, 21 regional/national comparisons, 16 pilot studies and 2 bilateral comparisons. 38 % 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 14 comparable measurements as a pilot lab.

Die PTB nahm im Berichtsjahr an 50 Vergleichsmessungen teil und zwar an 11 Schlüsselvergleichen, 21 regionalen/nationalen Vergleichen, 16 Pilotstudien und 2 bilateralen Vergleichen. 38 % der Vergleichsmessungen waren von direkter Relevanz für die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB im Rahmen des CIPM-MRA. An 14 Vergleichsmessungen nahm die PTB als Pilotlabor teil.

Nationale Normungsvorhaben • National standardization projects

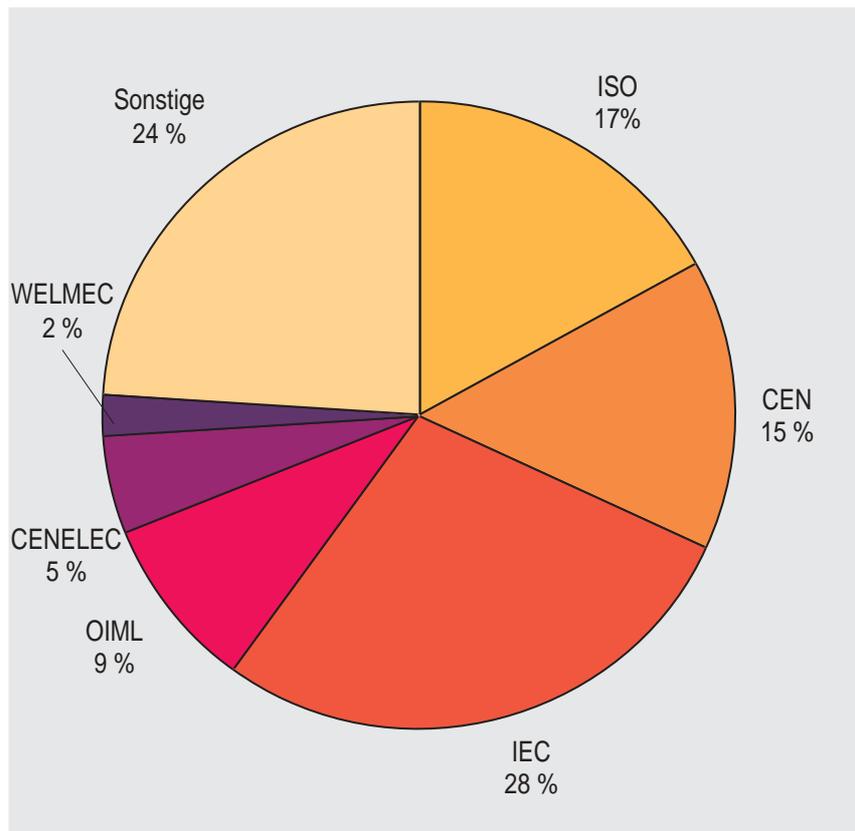


Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei nationalen Normungsvorhaben. Innerhalb des *Deutschen Instituts für Normung e. V.* (DIN) war die PTB an 145 Normenvorhaben beteiligt, bei der *Deutschen Elektrotechnischen Kommission* (DKE) bei 74 Vorhaben.

Break-up of the PTB's committee work for national standardization projects (in percent). PTB cooperated in 145 projects of the *Deutsches Institut für Normung* (DIN) and in 74 projects of the *Deutsche Elektrotechnische Kommission* (DKE).

Internationale Normungsvorhaben • International standardization projects

Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei internationalen Normungsvorhaben. (303 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. (303 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.

**Promotionen 2008 • Doctorates in 2008**

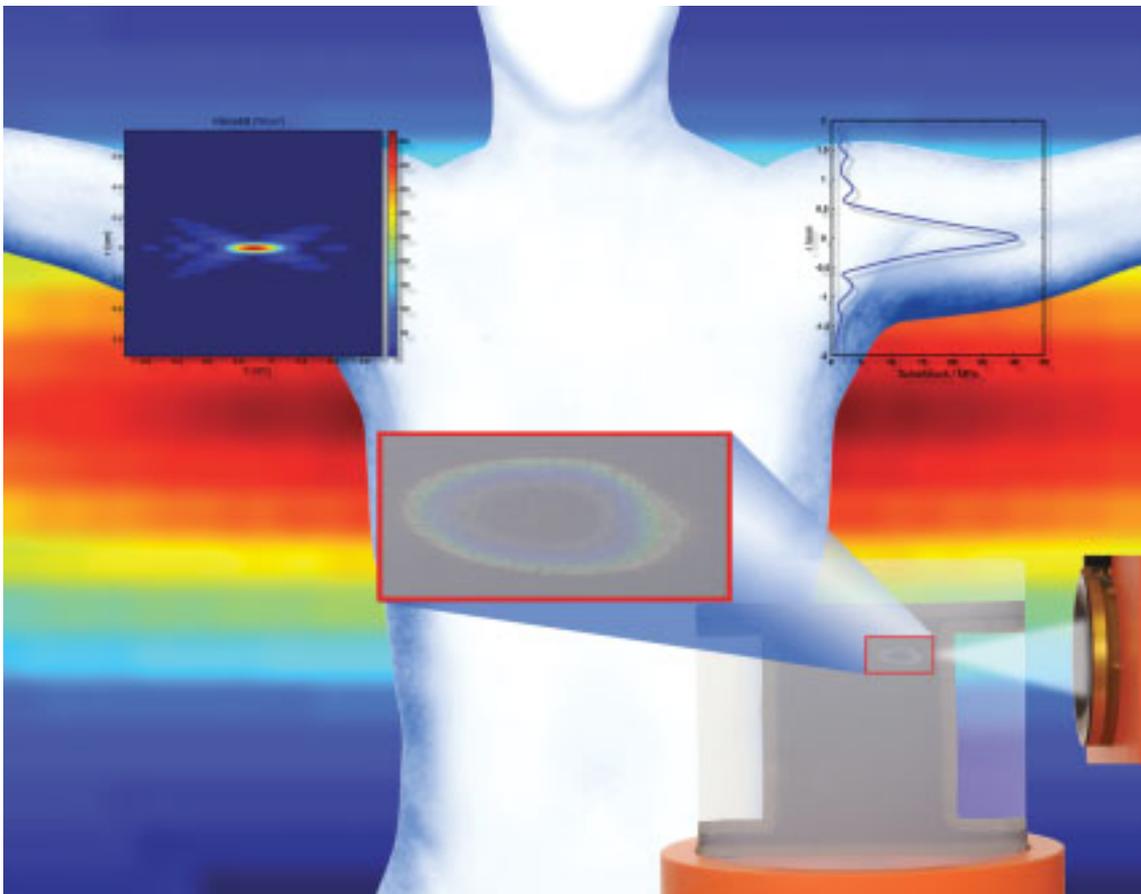
Jörg Riedel (FB 1.5)	Transfervverfahren zur Validierung von Mengen- und Durchflussmessenrichtungen mit Newton'schen Flüssigkeiten
Susanne Lott (FB 3.1)	Isotopenverdünnungsmassenspektrometrische Primärmethode zur Analyse von delta-9-Tetrahydrocannabinol (THC) in Serum und Prüfung von THC-Glucuronid (THCglu) als Urinmarker für THC in Serum
Stefan Mecke (FB 3.5)	Gestaltung und Dimensionierung von Flammensperren
Axel Wiegmann (FB 4.2/FB 8.4)	Multiple Sensorsysteme zur Topographiebestimmung optischer Oberflächen
Felix Vogt (FB 4.3)	Creation of cold and dense ensembles of calcium atoms
Carsten Wanke (FB 6.1)	Erhöhte Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung durch bergbauliche Aktivitäten
Frank Ruede (FB 7.5)	Hochempfindliche Stromsensoren auf DC-SQUID-Basis für den Betrieb in elektromagnetisch gestörter Umgebung
Holger Streitwolf (FB 7.6)	Untersuchung von Beiträgen zur Messunsicherheit bei Prüfungen der Störfestigkeit gegen gestrahlte Hochfrequenz
Heriberto Zavala Fernandez (FB 8.2)	Evaluation and Comparison of the Independent Components of Simultaneously Measured MEG and EEG Data

---

Alle Abteilungsleiterberichte finden sich sowohl auf Deutsch als auch auf Englisch im Web-Jahresbericht auf den Internetseiten der PTB (<http://www.ptb.de/>) unter der Rubrik „Publikationen“.

All reports of the heads of Divisions (in German and English) can be found in the Annual Report on the web on the PTB's Internet pages (<http://www.ptb.de/>) under “Publications”.

# Mechanik und Akustik



Berichte der Abteilungen

*Abteilung*

1

# Mechanik u

## 1. Mechanik und Akustik

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

Die Arbeiten der Abteilung 1 *Mechanik und Akustik* lassen sich den drei Themenbereichen *Masse und abgeleitete Größen* (Fachbereiche 1.1, 1.2, 1.3), *Durchfluss* (Fachbereiche 1.4, 1.5) sowie *Akustik, Ultraschall, Beschleunigung* (Fachbereiche 1.3, 1.6, 1.7) zuordnen. Nachfolgend werden wichtige Arbeiten und Schwerpunktthemen sowie bedeutende 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* und 1.3 *Kinematik* – basierend auf dem Einheiten-, Eich- und Beschussgesetz sowie der Einheitenverordnung und der Eichordnung – an der Darstellung und Weitergabe der mechanischen Einheiten für Masse, Kraft (statisch und dynamisch), Drehmoment (statisch und dynamisch) sowie dynamische Druckmessung gearbeitet.

In der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* wurde im Rahmen des Projektes „Neubestimmung der Boltzmann-Konstante“ die Masse von 22 Belastungsscheiben eines Kolbenmanometers zu je 12,5 kg mit der geforderten Messunsicherheit von 0,6 mg ( $k = 1$ ) bestimmt. Voraussetzung war die Volumenbestimmung der Scheiben mit einer relativen Messunsicherheit von  $1,1 \cdot 10^{-4}$  ( $k = 1$ ). Für die Masse- und Volumenbestimmung mussten spezielle Hilfsmittel angefertigt und Anpassungen an den Messplätzen vorgenommen werden, da sich die Belastungsscheiben in ihrer Form und ihren Abmessungen wesentlich von herkömmlichen Massenormalen unterscheiden.

Im Rahmen des internationalen Avogadro-Projektes werden die Massen zweier  $^{28}\text{Si}$ -Kugeln an den Metrologie-Instituten von Australien, Deutschland, Japan sowie dem BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) als Pilotlabor mit kleinstmöglicher Messunsicherheit bestimmt. Erste Messungen wurden in der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* an der  $^{28}\text{Si}$ -Kugel AVO28-S5 in Luft und unter Vakuumbedingungen mit einer Messunsicherheit von 13  $\mu\text{g}$  ( $k = 1$ ) ausgeführt. Die größten Beiträge zum Unsicherheitsbudget resultieren aus der Luftauftriebskorrektur (9  $\mu\text{g}$ ) für Massebestimmungen in Luft und der Sorptionskorrektur (9  $\mu\text{g}$ ) für Massebestimmungen im Vakuum. Durch den Einsatz neuer Sorptionskörper aus Platin-Iridium wird es zukünftig möglich sein, die Unsicherheit der Sorptionskorrektur deutlich zu verringern. Erste Testmessungen ergaben eine reversible Masseänderung der Referenzmasse bei einem Luft-Vakuum-Transfer von nur 3  $\mu\text{g}$  (40  $\text{ng}/\text{cm}^2$ ).

Unerwünschte magnetische Kräfte können die Ergebnisse von Präzisionsmassebestimmungen erheblich beeinflussen. In der OIML-Empfehlung R111 (2004) werden daher obere Grenzwerte für die magnetische Suszeptibilität und die permanente magnetische Polarisierung festgelegt.

Titelbild:

Hochintensiver therapeutischer Ultraschall (HITU) zur Behandlung von Tumoren – Visualisierung des „hot spot“ mit Hilfe eines gewebeähnlichen Phantoms und der dazugehörige gemessene Schalldruckverlauf senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (rechts oben) sowie die simulierte Intensitätsverteilung (links oben).

# nd Akustik

tion von Gewichtstücken angegeben. Um deren Prüfung mit Hilfe verschiedener Methoden an Gewichtstücken mit unterschiedlichen Geometrien und Nennwerten vergleichen zu können, wurde im Jahr 2008 beschlossen, internationale Vergleichsmessungen zwischen den Mitgliedern der European Association of National Metrology Institutes (EURAMET) durchzuführen. Die Vorbereitung und Koordinierung dieses Projektes, an dem 19 europäische Metrologieinstitute und das Internationale Büro für Maß und Gewicht (BIPM) teilnehmen, wurden von der PTB-Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* als Pilotlabor übernommen. Fünf ausgewählte und vermessene Massenormale mit unterschiedlichen Geometrien, Nennwerten und magnetischen Eigenschaften wurden im Juni 2009 als Transfernormale an den ersten Teilnehmer versandt.

In der Arbeitsgruppe *Waagen* wurden die experimentellen Untersuchungen an neuartigen Wägezellen aus einkristallinem Silicium mit Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen (DMS) mit sehr gutem Erfolg zum vorläufigen Abschluss gebracht. Bei Kennlinienmessungen im Temperaturbereich von  $-10\text{ °C}$  bis  $+40\text{ °C}$  zeigte sich, dass der Temperatureinfluss auf Reproduzierbarkeit, Hysterese und Linearität vernachlässigbar ist, während die relative Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit  $2 \cdot 10^{-4}/\text{K}$  beträgt und für wägetechnische Anwendungen hoher Präzision mit einem linearen Modell digital kompensiert werden kann. Die Ergebnisse der kompensierten Messdaten (Bild 1) belegen die sichere Einhaltung der Fehlergrenzen für die Genauigkeitsklasse B 50 (50 000 Teilungswerte) nach der Internationalen Empfehlung OIML R60; dies bedeutet eine Verbesserung um etwa den Faktor 5 gegenüber konventionellen DMS-Wägezellen (s. auch „Nachrichten des Jahres“).

Die internationalen Bemühungen um multilaterale, verbindliche Regelungen zur gegensei-

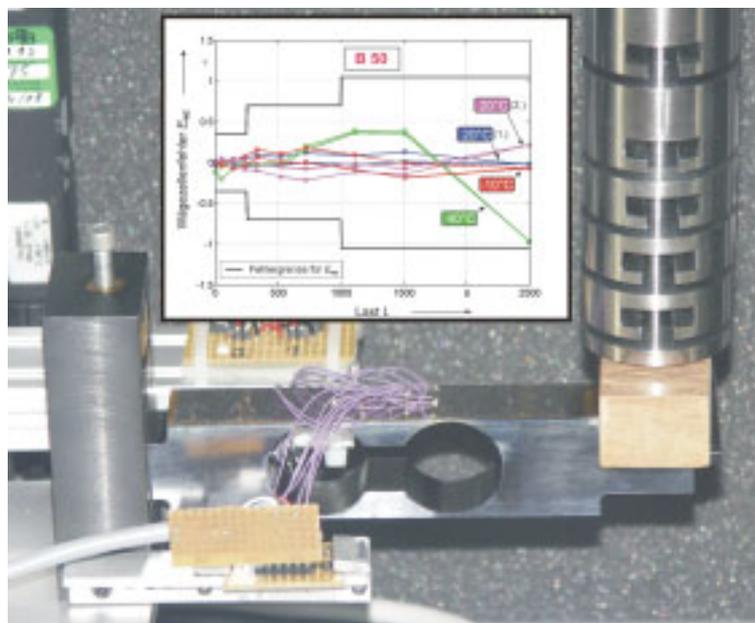


Bild 1: Silicium-Wägezelle im Versuchsaufbau und Ergebnis der Richtigkeitsprüfung für die Genauigkeitsklasse B 50 nach OIML R60.

tigen Anerkennung von Prüfergebnissen nationaler Metrologieinstitute (NMI) sind mit dem MAA (Mutual Acceptance Arrangement) der OIML (Internationale Organisation für gesetzliches Messwesen) in eine neue Phase getreten. Nachdem wesentliche Bedingungen Deutschlands und anderer europäischer OIML-Mitgliedsländer Berücksichtigung gefunden haben, ist nunmehr auch die PTB dem Kreis der „ausstellenden Teilnehmer“ (Issuing Participants) beigetreten, und zwar zunächst für die Messgerätearten „Nichtselbsttätige Waagen“ (OIML R76) und „Wägezellen“ (OIML R60). Eine Anerkennung von Prüfergebnissen akkreditierter oder durch „peer assessments“ begutachteter Hersteller-Prüflaboratorien ist im Rahmen des OIML-MAA noch nicht möglich. Die PTB setzt sich in den entsprechenden Gremien der OIML aber weiterhin für die Durchsetzung dieser insbesondere für deutsche und europäische Hersteller wichtigen Forderung ein, und zwar unter klar definierten Bedingungen und mit

einem hohen Anforderungsniveau an die betreffenden Prüflaboratorien.

Die Arbeitsgruppe *Dynamisches Wägen* hat intensiv an der Überarbeitung der OIML-Empfehlung R50 für Förderbandwaagen mitgearbeitet, die insbesondere eine „Modernisierung“ der Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit und Prüfung von Software sowie die Erweiterung des modularen Konzepts zum Ziel hat. In der Arbeitsgruppe *Informationstechnologie in der Wägetechnik* erfolgte die erstmalige Ausstellung eines Zertifikats für ein besonderes Waagenmodul, das Funktionen realisiert, die es ermöglichen, angeschlossene nichtpreisrechnende Waagen zu preisrechnenden Waagen nachzurüsten.

Im Fachbereich *Festkörpermechanik* werden mit Kraft-Normalmesseinrichtungen (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. Eine besondere Bedeutung kommt der 16,5-MN-K-NME zu, da diese Anlage die einzige in Europa ist, mit der Zug- und Druckaufnehmer bis 16,5 MN mit einer relativen Messunsicherheit von 0,01 % kalibriert werden können. Nach einem massiven Schadensfall im Jahr 2007 konnte die Reparatur der Anlage Ende 2008 abgeschlossen und der Kalibrierbetrieb Anfang 2009 wieder aufgenommen werden. Dieser wird voraussichtlich bis 2010 wegen weiterer Modernisierungsmaßnahmen eingeschränkt bleiben, wobei allerdings nur Kalibrierungen im Bereich größer 5 MN betroffen sind. Für Kalibrierungen bis 5 MN steht inzwischen die modernisierte 5-MN-K-NME zur Verfügung.

Auch die 1-MN-K-NME mit direkter Massewirkung wurde modernisiert und bietet zukünftig die Möglichkeit, im Kraftbereich von 20 kN bis 1 MN nicht nur statische Kräfte, sondern auch sich kontinuierlich ändernde Kräfte zu generieren. Dies geschieht mit einem Kolbenzylindersystem (Vorspannzylinder) mit Spindelpumpenantrieb; die laufende Kraftmessung erfolgt mit drei statisch kalibrierten Referenzkraftaufnehmern.

Die simultane Messung von Kräften und überlagerten Momenten, die sogenannte „Mehrkomponentenmessung“, spielt in der Industrie eine zunehmende Rolle, zum Bei-

spiel bei der Schraub- bzw. Schraubverbindungstechnologie. Im Fachbereich *Festkörpermechanik* wurde eine Anfrage des Deutschen Schraubenverbandes nach rückführbaren Kalibrierungen von Reibwertmessköpfen aufgegriffen, bei denen die Vorspannkraft einer Schraube sowie das Kopf- und Gewindereibmoment zu ermitteln sind. So wurde für die 1-MN-K-NME eine Zusatzeinrichtung entwickelt, die nach einem Direktbelastungsverfahren arbeitet und es ermöglicht, „reine“ Drehmomente in die Kraftachse einzuleiten. Nach dem Aufbau und der Erprobung der Zusatzeinrichtung werden erste Mehrkomponentenmessungen voraussichtlich Mitte 2010 durchgeführt werden können.

Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt ist die Rückführung von dynamischen Kräften. Hier konnte inzwischen das betreffende QM-System weiter ausgebaut und die Rückführung über kalibrierte Laservibrometer sichergestellt werden, so dass der Fachbereich *Festkörpermechanik* ab 2010 dynamische Kalibrierungen von Kraftaufnehmern bis 10 kN für Frequenzen bis 1000 Hz mit Rückführung auf nationale Normale anbieten kann. Bei einigen statischen und dynamischen Anwendungen, beispielsweise bei Prüfständen und Werkzeugprüfmaschinen, müssen simultan zur Kraftmessung auch die Wege (Verformungen) gemessen werden. Hierzu wurde ein neuartiger Kraft-Wegsensor entwickelt und zum Patent angemeldet.

Von der Arbeitsgruppe *Darstellung Drehmoment* als Pilotlabor wurde ein Bericht über die erste weltweite Vergleichsmessung von Drehmomenten bis 1 kN · m (CIPM key comparison CCM.T-K1) fertiggestellt und veröffentlicht. Ein besonders erfreuliches Ergebnis war, dass Messeinrichtungen mit verschiedenen Richtungen der Messachse (horizontal und vertikal) eine sehr gute Übereinstimmung im Rahmen der angegebenen relativen Messunsicherheiten zeigten; dabei wurden auch die kleinsten relativen Messunsicherheiten von  $2 \cdot 10^{-5}$  ( $k = 2$ ) bestätigt. Ebenfalls unter Federführung der Arbeitsgruppe *Darstellung Drehmoment* werden die zur Zeit laufenden Messungen von Drehmomenten bis 20 kN · m fortgesetzt (CIPM key comparison CCM.T-K2).

An der neuen 1-N-m-Drehmoment-Normal-messeinrichtung konnte nach Abschluss der erforderlichen Tests und Überprüfungen der Kalibrierbetrieb aufgenommen werden. Der automatisierte Messablauf garantiert eine nahezu einfluss- und störgrößenfreie Durchführung der Kalibrierungen, was insbesondere bei sehr kleinen Aufnehmern, die zum Teil sehr empfindlich auf Temperatur- und Feuchteschwankungen reagieren, wichtig ist. Die erweiterte Messunsicherheit der Einrichtung wird mit 0,01 % ( $k = 2$ ) angegeben.

Tretkurbelergometer gelten nach dem Medizinproduktegesetz als „Medizinprodukte mit Messfunktion“. Gemessen wird dabei die vom Patienten aufgebrauchte rotatorische Leistung als Produkt aus momentaner Drehzahl und wirkendem Drehmoment. Das Normal, auf das alle kalibrierten Ergometer in Deutschland zurückgeführt werden, befand sich lange Zeit im Institut Berlin der PTB und wurde Anfang 2009 im Rahmen einer PTB-internen Umstrukturierung nach Braunschweig in die Arbeitsgruppe *Darstellung Drehmoment* umgesetzt, die auch schon vorher für die Drehmomentrückführung des „Ergometernormal“ zuständig war. Dieses in der Mitte des Bildes 2 dargestellte Normal für die rotatorische Leistungsmessung hat einen Messbereich von 10 W bis 1000 W bei einer erweiterten Messunsicherheit von 0,3 % und mindestens 0,3 W ( $k = 2$ ).

Eine wichtige metrologische Aufgabe der Arbeitsgruppe *Dynamische Druckmessung* im Fachbereich *Kinematik* ist die Sicherstellung der Rückführbarkeit ballistischer Messungen nach dem Beschussgesetz (BeschG) auf die nationalen Normale. Mit speziellen Kalibrier- und Prüfeinrichtungen werden sicherheitsrelevante, dynamische Messgrößen ermittelt, wie der Gasdruck (bis zu 600 MPa) bei sehr kurzen Anstiegszeiten (bis zu 20  $\mu\text{s}$ ) bzw. Impulsdauern (bis zu 3 ms) sowie die Geschwindigkeit (bis zu 1200 m/s). Bisher werden entsprechende piezoelektrische Druckaufnehmer statisch bzw. quasi-statisch über einen Zeitraum von einigen Sekunden kalibriert. Phänomene wie beispielsweise der Einfluss der Impulsdauer auf die Empfindlichkeit, die Anstiegszeit des Impulses, Resonanzfrequenzen und Dämpfung des Aufnehmers sowie die Abweichung des Aufnehmers vom linearen Verhalten werden bisher nur unzureichend berücksichtigt. Daher werden zur Zeit neue Messverfahren entwickelt, die eine dynamische Primärkalibrierung von piezoelektrischen Druckaufnehmern in einem Druckbereich von 50 MPa bis etwa 800 MPa ermöglichen sollen.

Bild 3 zeigt das angewendete Messprinzip, bei dem eine Stahlkugel auf einen Stempel fällt, der in die Druckkammer eines hydraulischen Druckgefäßes getrieben wird. Ein interessanter Ansatz ist die Rückführung des dynamischen Druckes auf vibrometrische Verfahren,

Bild 2.: Ergometernormal für die Leistungsmessung bis maximal 1000 W (Mitte); links ein Tretkurbelergometer. Für die Kalibrierung werden Pedalarms und Pedale entfernt, die Tretlagerwelle wird direkt mit dem Normal verbunden.



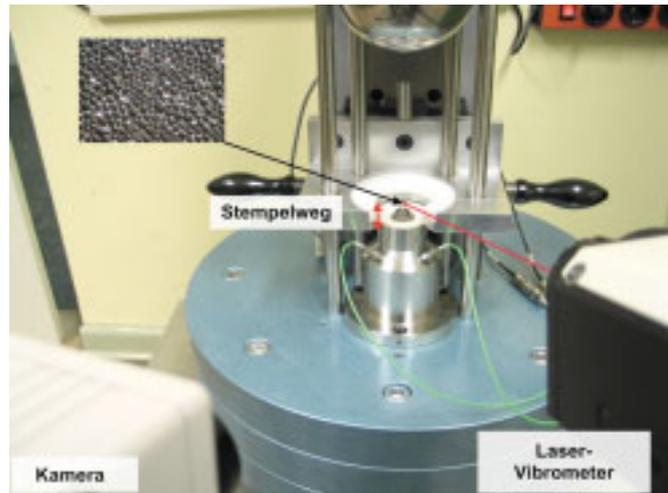
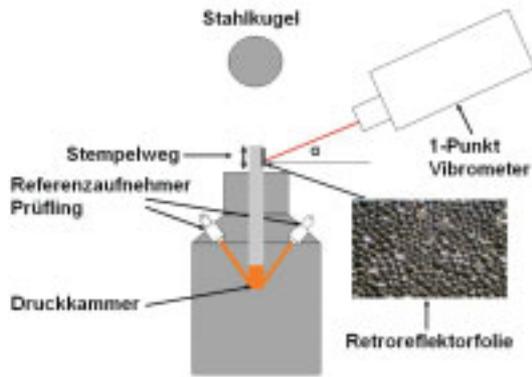


Bild 3: Messaufbau für die dynamische Kalibrierung von Druckaufnehmern durch vibrometrische Erfassung der Stempelleindringtiefe

entweder zur Erfassung der Stempelleindringtiefe oder des Brechungsindex in der Hydraulikflüssigkeit. Der Stempel, auf dessen Oberfläche sich eine reflektierende Folie (Retroreflektorfolie) befindet, wird mit einem Vibrometer unter einem Winkel  $\alpha$  abgetastet. Zu Kontrollzwecken wird zusätzlich ein Referenzempfänger eingesetzt.

Eine ähnliche Apparatur wird auch zur Druckstoßkalibrierung von Druckaufnehmern für kleinere Druckamplituden (bis etwa 100 MPa) entwickelt, wie sie z. B. zur dynamischen Kalibrierung Ex-geschützter Druckaufnehmer benötigt wird. Während auch hier eine stoßende Kugel zur Anregung eingesetzt wird, erfolgt die Beschleunigung der Kugel waagrecht und pneumatisch; der Referenzempfänger arbeitet piezoresistiv. Die Stoßamplituden lassen sich über die Neigung der Gesamteinrichtung und den Druck zur Beschleunigung der Kugel steuern.

## 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. Hierzu werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit dem Ziel durchgeführt, sowohl den Darstellungsbereich als auch die erreichte Messunsicherheit an die steigenden Anforderungen von Industrie und Wissenschaft anzupassen. Aus dem Eichgesetz ergeben sich

darüber hinaus vielfältige Aufgaben zur Sicherung der Einheitlichkeit und Richtigkeit der Durchflussmessungen im gesetzlich geregelten Bereich.

Im Zusammenhang mit der Durchflussmessung von Gasen und Flüssigkeiten spielen häufig auch weitere metrologisch relevante Parameter und Stoffeigenschaften, wie Dichte und Viskosität sowie thermische Energie, eine wichtige Rolle. Daher besteht traditionell eine gute Zusammenarbeit mit der Abteilung 3 *Chemische Physik und Explosionsschutz* sowie mit der Abteilung 7 *Temperatur und Synchrotronstrahlung*.

Im Zusammenhang mit der Nutzung erneuerbarer Energien spielt die möglichst exakte Messung der Windgeschwindigkeit eine große Rolle. Um auch zukünftig die Anforderungen an ausreichend genaue, rückgeführte Kalibrierungen der Messgröße „Strömungsgeschwindigkeit“ erfüllen zu können, wurde der 320-mm-Windkanal der Arbeitsgruppe *Strömungsmesstechnik* im Fachbereich *Gase* zu einem geschlossenen Kanal umgebaut. Zusammen mit der neuentwickelten Vier-Quadranten-Steuerung für die Windkanalregelung lassen sich jetzt stabile Strömungsverhältnisse über einen erweiterten Strömungsgeschwindigkeitsbereich von 0,1 m/s bis 60 m/s realisieren. Weiterhin wurde zwecks geplanter Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in für idealisierte Strömungsbedingungen geeigneten Großwindkanälen ein Kooperationsvertrag mit der Firma WindGuard abgeschlossen. WindGuard betreibt eigene Windkanäle und ist mit über 50 % der weltweiten Anemometerkalibrierungen ein führendes Dienstleistungsunternehmen der

Windenergiebranche und mit über 200 Unternehmen dieser Branche vernetzt.

Im Mai 2009 konnten die Ergebnisse der langjährigen Entwicklungsarbeiten zur Messung von Geschwindigkeitsfeldern mittels Doppler-Global-Messtechniken beim Abschlusskolloquium des DFG-Schwerpunktprogramms SFP 1147 „Bildgebende Verfahren für die Strömungsanalyse“ vorgestellt werden. Das von der PTB im Rahmen einer Dissertation entwickelte Verfahren wurde anhand zeitaufgelöster Messungen komplexer Wirbelstrukturen einer Zylinderstumpfströmung am Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Rostock erfolgreich verifiziert.

Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt der Arbeitsgruppe *Strömungsmesstechnik* war die Organisation und zeitintensive Durchführung von Vor-Ort-Vergleichsmessungen (DKD und EURAMET) zur Rückführung der Messgröße „Strömungsgeschwindigkeit“ auf das PTB-Primärnormal für die Kalibrierung von Laser-Doppler-Anemometern. Ziel war die Verbesserung der Vergleichbarkeit von Kalibrierergebnissen mittels rückwirkungsfreier Messverfahren.

In der Arbeitsgruppe *Gasmessgeräte* wurde eine neuartige Fundamentalapparatur entwickelt und erfolgreich in Betrieb genommen, mit der Messgeräte zur Verbrauchsmengemessung von Gasen geprüft bzw. kalibriert werden können. Die Apparatur, die als klassisches Kolbengerät oder als Durchflusskomparator eingesetzt werden kann, erlaubt eine

Rückführung von Gasvolumenströmen im Bereich 40 l/h bis 4000 l/h mit einer relativen Messunsicherheit von 0,04 % ( $k = 2$ ). Vergleichsmessungen mit etablierten Durchflusssnormalen der PTB, insbesondere mit der Gasmessglocke, ergaben eine sehr gute Übereinstimmung.

Zusammen mit dem VSL (Niederlande), dem NIM (China) und mit Unterstützung der chinesischen Repräsentanz der Firma Elster wurde in Peking eine Konferenz zur Gasmetrologie veranstaltet. Über 130 Fachexperten aus der Gasmengen-Messtechnik und dem gesetzlichen Messwesen aus China und Europa haben sich über die aktuellen Entwicklungen im Gasbereich ausgetauscht. Der Fachbereich *Gase* hat auch das Shanghai Institute of Metrology and Testing Technology (SIMT) bei der Realisierung einer neuen Primär-Kalibriereinrichtung nach dem Vorbild der PTB-Gasmessglocke unterstützt. Für die Fertigung hat ein kompetentes Unternehmen (Ehrler Prüftechnik GmbH) von der PTB eine entsprechende Lizenz erworben. Die Rückführung und Tests zur Produktabnahme wurden von den Mitarbeitern der PTB durchgeführt. Die Möglichkeit einer detaillierten Überprüfung einer Kopie des PTB-Primärnormals an zwei verschiedenen Orten mit vollständigem Ab- und Wiederaufbau war eine einmalige Gelegenheit, alle grundlegenden Aussagen über die Verlässlichkeit eines sol-

Bild 4: Die neue Gasmessglocke des SIMT (China). Links: Aufbau beim Hersteller; Mitte: Aufbau beim SIMT; Rechts: zum Vergleich die PTB-Messglocke



chen volumetrischen Normals zu verifizieren. Die festgestellten Differenzen zwischen den beiden Gasmessglocken, s. Bild 4, lagen deutlich innerhalb der Messunsicherheitsbudgets von jeweils 0,06 %.

Auf dem Hochdruck-Gaszählerprüfstand *pigsar*<sup>TM</sup> der E.ON Ruhrgas, auf dem ein großer Teil der im europäischen Gastransportnetz installierten Gaszähler kalibriert wird, wurden als Beitrag zur Qualitätssicherung Ultraschallgaszähler als zusätzliche Gebrauchsnormale zu den bereits existierenden Turbinenradgaszählern in Betrieb genommen. Neben der gegenseitigen Kontrolle der Gebrauchsnormale bietet das Ultraschall-Messverfahren eine zusätzliche Vergleichsmöglichkeit für die Daten zur Gasbeschaffenheit, die primär ein Prozess-Chromatograph liefert. Darüber hinaus wurde das optische Durchflussnormal nach dem Laser-Doppler-Prinzip nach erfolgreichen Vergleichsmessungen mit der Rohrprüfstrecke in den Prüfstand *pigsar*<sup>TM</sup> integriert.

Im Fachbereich *Flüssigkeiten* konnte ein weiterer wichtiger Schritt zur Bestätigung der relativen Messunsicherheit des Hydrodynamischen Prüffeldes (HDP) von 0,02 % ( $k = 2$ ) getan werden, und zwar durch PTB-interne Vergleichsmessungen mit dem Wärmezählerprüfstand (WZP) des Fachbereichs 7.6 *Wärme* in Berlin. Dies war erstmals möglich durch Verwendung eines speziellen „Vergleichsnormals“, d.h. einer Kombination aus drei Durchflussmessgeräten verschiedener Bauart (Coriolis-, Ultraschall- und magnetisch-induktives Wirkprinzip) der Nennweite 100 mm. Die Übereinstimmung der Messergebnisse lag deutlich innerhalb der Messunsicherheiten der beteiligten Primär- und Vergleichsnormale. Darüber hinaus konnten durch eine Erneuerung des gesamten Rechnersystems am HDP entscheidende Verbesserungen hinsichtlich der Funktionalität und Zuverlässigkeit der komplexen Anlage erreicht werden. Weitere wissenschaftliche Aktivitäten widmeten sich der Untersuchung neuer Verfahren, mit denen unterschiedliche Messbedingungen bei der Kalibrierung und dem nachfolgenden Einsatz von Flüssigkeitsmessgeräten, insbesondere bei Verwendung von Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften, messtechnisch beherrscht werden können. Hierfür wurde u. a. ein neuartiges Injektions-

verfahren entwickelt, erprobt und als Patent angemeldet.

Gleichzeitig wurden die Arbeiten zur Erweiterung des Mineralölzählerprüfstandes (MÖZ) fortgesetzt. Die Messstrecken zum Einbau der Prüflinge wurden von 2,7 m auf mehr als 7 m verlängert, sodass künftig nicht nur deutlich bessere und stabilere Strömungsbedingungen, zum Beispiel durch den Einbau von Gleichrichtern, gewährleistet, sondern auch spezielle Reihenschaltungen von Messgeräten installiert werden können. Dies bringt große Vorteile hinsichtlich einer effizienteren Gestaltung von Kalibrierungen und Prüfungen, ermöglicht vor allem aber auch für künftige internationale Vergleiche die Verwendung spezieller Messgeräteeinrichtungen mit größeren Einbaulängen. Durch die Installation entsprechender Pumpen und Umschalt-einrichtungen im MÖZ wurden die Voraussetzungen für die Realisierung des sogenannten Pumpendirektbetriebes geschaffen, sodass erstmalig ein kontinuierlicher Betrieb des Mineralölzählerprüfstandes realisiert werden kann. Auch das neue magnetostruktive Höhenmesssystem, mit dem eine automatische Füllstandsmessung am 1000-Liter-Behälter erfolgen kann, wurde kalibriert und damit vollständig in den Prüfstand integriert.

Sehr erfolgreich gestaltete sich die Zusammenarbeit mit den Eichbehörden und der Industrie auf dem Gebiet des gesetzlichen Messwesens. Gemeinsam mit der Eichdirektion Nord und der Firma Trimble Germany GmbH wurden die Arbeiten zur Entwicklung eines neuen eichrechtlich abgesicherten Laserscanverfahrens zur Vermessung großer Lagerbehälter mit einem gut besuchten, internationalen Workshop in Hamburg abgeschlossen. Auch auf dem Gebiet der Verbrauchsmengenmessung von Kalt- und Warmwasser sowie thermischer Energie (Wärme) wurde durch die Unterzeichnung einer entsprechenden Forschungsvereinbarung zwischen dem Verband der deutschen Wasser- und Wärmezählerindustrie VDDW, der Arbeitsgemeinschaft Heiz- und Wasserkostenverteilung ARGE HKV und der PTB eine konkrete wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit initiiert. Die Vereinbarung hat zunächst eine Laufzeit von 25 Monaten. Sie befasst sich mit der Untersuchung und Entwicklung strömungsprofilunempfindli-

cher Wasser- und Wärmezähler und der Gestaltung entsprechender Schnittstellen innerhalb der Verteilnetze. Etwa 52 Millionen Wasser- und Wärmezähler in den deutschen Verteilungsnetzen, mehr als 12 Millionen Eichungen dieser Messgeräte jährlich und ein Marktanteil deutscher Messgerätehersteller von über 50 % in Europa unterstreichen die Bedeutung dieser Zusammenarbeit.

Die PTB ist neben EURAMET auch Mitglied von COOMET, der euro-asiatischen Zusammenarbeit nationaler Metrologieinstitute. Vom Fachbereich *Flüssigkeiten*, der als Pilotlabor fungiert, wurden umfangreiche Arbeiten zur Vorbereitung eines COOMET-Ringversuchs für Wasserzählerprüfstände geleistet. Hervorzuheben ist der Workshop im Februar 2009 in der PTB, zu dem alle sieben Teilnehmerländer angereist waren und der den Auftakt für die Vergleichsmessungen bildete (Bild 5).

### 1.3 Akustik, Ultraschall und Beschleunigung

Im Themenbereich *Akustik, Ultraschall und Beschleunigung* werden von den Fachbereichen 1.3 *Kinematik*, 1.6 *Schall* und 1.7 *Angewandte Akustik* metrologische Fragestellungen bearbeitet, die die Darstellung und Weitergabe dynamischer mechanischer Einheiten zum Inhalt haben. Ausgehend von Forderungen des Einheiten-, Eich- und Medizinproduktegesetzes werden vielfältige wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt, und es erfolgen zahlreiche gesellschaftlich und wirtschaftlich

notwendige Kalibrierungen, Prüfungen und Zulassungen industrienah mit höchster Genauigkeit und Verlässlichkeit. Weiterhin steht ein weiter Bereich von Forschungsaufgaben mit metrologischen Zielsetzungen grundlagenorientierter und anwendungsbezogener Fragestellungen im Mittelpunkt der Arbeit.

Im Fachbereich *Kinematik* bildet eine sehr genaue Referenzanlage das Kernstück bei der Prüfung von Geschwindigkeitsmessgeräten zur amtlichen Überwachung des Straßenverkehrs. Zur weiteren Verringerung der Messunsicherheit dieser Referenzanlage wurden im Rahmen einer studentischen Praxisarbeit detaillierte quantitative Untersuchungen durchgeführt. Sie bestätigten, dass der weitestwichtigste Messunsicherheitsbeitrag von der dynamisch veränderlichen Verformung der Fahrzeugreifen herrührt. Die Auswertung von Fotos mit hinreichend schnellen Triggerkameras zeigt, dass dieser bisher konservativ abgeschätzte Beitrag um mehr als den Faktor 2 reduziert werden kann.

Videobasierte Geschwindigkeitsmesssysteme ermöglichen neuerdings auch die Messung der Differenzgeschwindigkeit von Fahrzeugen, um insbesondere sogenannte „Elefantenrennen“ von LKWs zu ahnden. Zu diesem Zweck wurde die Differenzgeschwindigkeit als neue eichrechtliche Messgröße mit Fehlergrenzen von 3 km/h definiert. Inzwischen wurde von der Arbeitsgruppe *Geschwindigkeitsmessgeräte* auch die erste Videouhr zugelassen, die sämtliche Video- und Messdaten in digitaler Form speichert. Schwerpunkt der

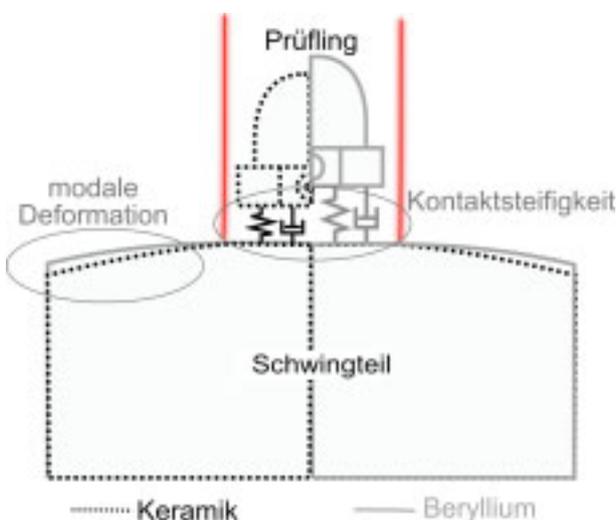


Bild 5: Diskussion des COOMET-Programms und Vorführung des Vergleichsnormals anlässlich des Workshops zum Start des COOMET-Ringversuchs für Wasserzählerprüfstände im Februar 2009 in der PTB

Zulassungsprüfungen war die Analyse der Software zur digitalen Signierung bzw. Verschlüsselung der Daten, so dass deren Integrität und Authentizität jederzeit nachweisbar sind.

Die Arbeitsgruppe *Darstellung Beschleunigung* ist Pilotlabor für die internationale Vergleichsmessung (CIPM key comparison) CCAUV.V-K2, bei der verschiedene Beschleunigungsaufnehmer als Prüflinge von Labor zu Labor geschickt und kalibriert werden. Im Idealfall sollten am Ende die Kalibrierergebnisse aller Teilnehmer im Rahmen der jeweils angegebenen Messunsicherheit übereinstimmen. Zur Vorbereitung der Vergleichsmessungen wurde auch die Langzeitstabilität eines Prüflings in „single ended“-Bauform überprüft. Dabei wurden signifikante Abweichungen zwischen den Ergebnissen eines Schwingerregers mit Beryllium-Schwingteil und eines Erregers mit Keramik-Schwingteil gefunden. Diese Abweichungen sind vermutlich auf eine materialabhängige, lokale Deformation des Schwingteils im Bereich direkt unter dem Prüfling zurückzuführen. Sie lässt sich in einem einfachen Modell als Kontaktsteifigkeit der Montagefläche interpretieren. Da bei der Primärkalibrierung von „single ended“-Aufnehmern der Laserstrahl die Beschleunigung direkt neben dem Prüfling abtastet (Bild 6), wird hier offensichtlich eine andere Beschleunigung beobachtet als die, die der Prüfling selbst erfährt. Wie zukünftig mit diesem

Bild 6: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Situationen bei der Primärkalibrierung von Single-ended-Beschleunigungsaufnehmern mit Schwingteilen aus Keramik und Beryllium



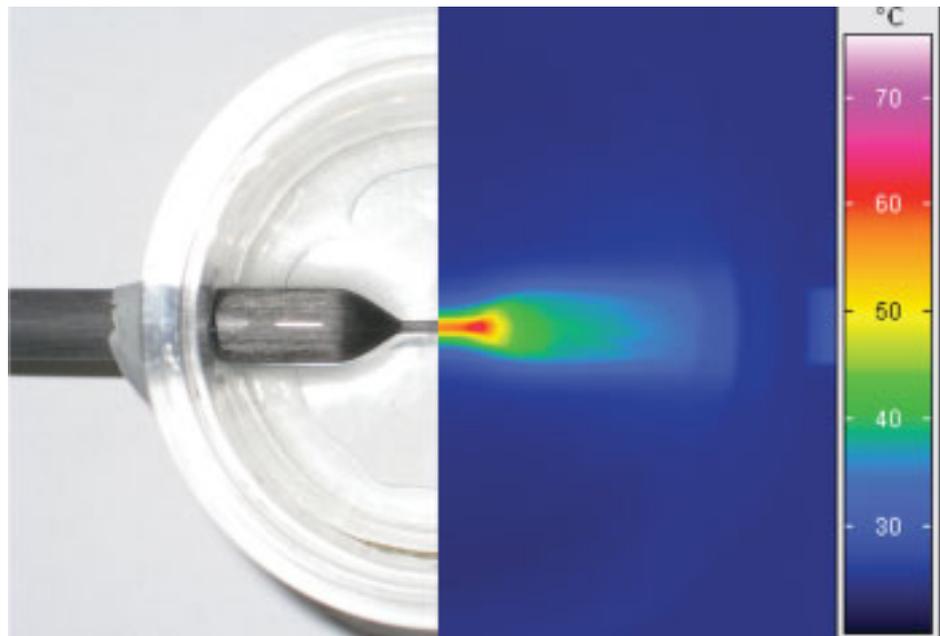
Effekt umgegangen werden soll und welche Konsequenzen er für die praktische Arbeit der Kalibrierlaboratorien hat, wird derzeit international diskutiert.

Im Fachbereich *Schall*, der sich vor allem mit Fragestellungen zur akustischen Messtechnik, dem Gehör und dem Ultraschall beschäftigt, wurden intensiv notwendige Arbeiten zur Weiterentwicklung der Messplätze für die Primärnormale durchgeführt. Am interferometrischen Messplatz zur Darstellung des Ultraschalldrucks wurde für die Bestimmung der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion der eingesetzten Photodioden eine neue Technik entwickelt, die erstmals im gesamten Nutzungsbereich bis 450 MHz verlässliche und genaue Werte lieferte. Dazu wurde mit Hilfe von zwei kommerziell erhältlichen DFB-Lasern ein heterodynes Überlagerungsverfahren aufgebaut, dessen Frequenzauflösung und -stabilität durch eine Regelschleife unter Verwendung der Differenzfrequenz gesichert wurde.

Eine weitere Arbeit betraf die Verbesserung der Darstellung der Einheit des Schalldrucks mit Labornormalmikrofonen in der Druckkammer. Dabei müssen geringe Wechselspannungen, die durch akustische wie elektrische Störungen und durch Drift- und Ausgleichvorgänge beeinflusst werden, möglichst exakt mit minimalem Zeitaufwand gemessen werden. Für eine zuverlässige und robuste Erkennung der Signalstabilität wurden mehrstufige, aus der statistischen Qualitätskontrolle bekannte „Kontrollkarten“ in die Software zur Messplatzsteuerung implementiert. Mit Hilfe dieser Kontrollkarten werden die Kriterien zur Überwachung der Signalqualität wie z.B. die kumulierte Mittelwertabweichung (zur Drifterkennung) und der relative Standardfehler der zu mittelnden Spannungswerte überwacht. Durch ein mehrstufiges adaptives Verfahren gelingt es, die erforderliche Anzahl von Mittelungen während der Messung schnell zu bestimmen und mit Störeinflüssen behaftete Messwerte zuverlässig zu unterdrücken.

Der Fachbereich *Schall* ist aber auch in Projekten mit externen Partnern und Drittmitteln sehr aktiv. So wurde in diesem Jahr ein Projekt abgeschlossen, das aus Mitteln des MNPQ-Programms finanziert wurde und sich

Bild 7: Foto des Heizeinsatzes eines Kalibrierphantoms für Magnetresonanztomographiegeräte aus Kohlenstofffasermaterial (links) sowie eine IR-Kamera-Aufnahme der erzeugten Temperaturverteilung im Phantom (rechts).



in Zusammenarbeit mit der Maico GmbH mit der Verbesserung der Kalibrierverfahren für Hirnstamm-Audiometriegeräte beschäftigte. In verschiedenen Messzyklen an Versuchspersonen wurden Hörschwellen und andere charakteristische subjektive Bezugsdaten für verschiedene neuartige Testsignale bestimmt, die teilweise erst im Projekt erarbeitet worden waren. Damit konnte die Kalibrierung der Geräte verbessert und vor allem objektiviert werden.

In der Arbeitsgruppe *Ultraschall* steht die Entwicklung von Messtechnik und Messverfahren für die Bestimmung der Schallabgabe von medizinischen Ultraschallgeräten im Vordergrund. Messprozeduren können im Falle moderner multimodaler Ultraschallsysteme technisch extrem schwierig, zeitaufwendig und kostenintensiv sein. Die praktische Anwendbarkeit einer in der PTB entwickelten einfachen und Kosten einsparenden thermischen Intensitätssensortechnik wurde nun anhand von ausgiebigen Vergleichsmessungen gezeigt. Die kürzlich erfolgte Miniaturisierung der Sensoren bietet eine räumlich-laterale Auflösung von 0,6 mm, was ähnlich wie bei gewöhnlich eingesetzten Hydrophonen ist. Die Methode hat sich als angemessene Alternative zur Bestimmung zeitlich gemittelter Intensitätsverteilungen, d. h. zur Messung von axialen und lateralen Schallbündelprofilen erwiesen.

Der Fachbereich *Schall* arbeitet weiter aktiv in einem von der EU unterstützten Projekt im

Rahmen des europäischen metrologischen Forschungsprogramms mit, das metrologische Grundlagen für die Anwendung von hochintensivem Ultraschall zur Krebstherapie schaffen soll. In einem Arbeitsschritt soll ein Kalibrierphantom entwickelt werden, das zur Prüfung von Magnetresonanztomographen eingesetzt werden kann, die sehr häufig zur Temperaturmessung während des Eingriffs und damit zur Therapiekontrolle eingesetzt werden (Bild 7). Die Genauigkeit und Verlässlichkeit der Temperaturbestimmung hängt stark von den Sequenzen des Geräts und den Fähigkeiten des Benutzers ab, weshalb eine objektive Prüfung vor einer Anwendung notwendig ist.

Die zentrale Aufgabe der Arbeitsgruppe *Bauakustik* im Fachbereich *Angewandte Akustik* besteht in der Entwicklung von Messverfahren zur Beschreibung von Schallquellen und Schallübertragungen. Die wichtigsten Größen – z.B. das Schalldämm-Maß – sind mit relativ hohen Unsicherheiten behaftet, die nicht analytisch darstellbar sind. Durch eine eigene Modellmesstechnik und die Auswertung weltweiter Ringversuche konnte jedoch eine solide Basis für Unsicherheitsangaben hergestellt werden. Der Arbeitsgruppenleiter, Dr. Volker Wittstock, wurde hierfür von der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA) mit dem höchsten Preis für Nachwuchswissenschaftler, dem Lothar-Cremer-Preis, ausgezeichnet.

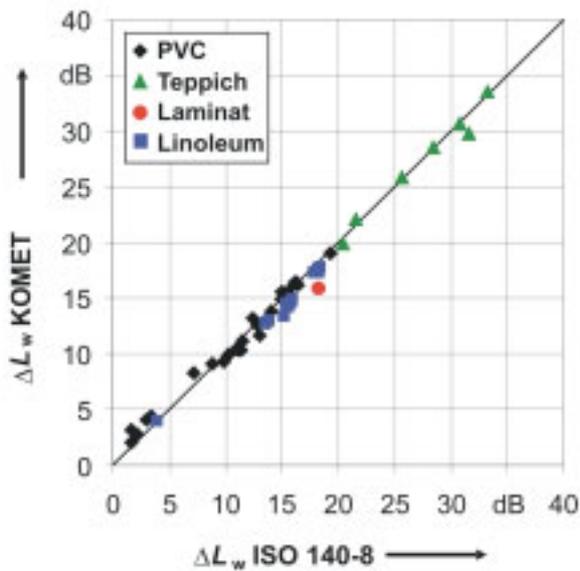


Bild 8: Die Trittschallverbesserungsmaße  $\Delta L_w$  nach dem neuen Kompaktverfahren („KOMET“) für verschiedene Bodenbeläge unterscheiden sich im Rahmen der Messunsicherheiten nicht vom Verfahren nach ISO 140-8.

Weiterhin kamen die Entwicklungsarbeiten für ein wesentlich vereinfachtes Messverfahren zur Bestimmung des Trittschallverbesserungsmaßes von Bodenbelägen zum Abschluss (s. Bild 8). Der Ersatz des bisher erforderlichen, speziellen Zwei-Raum-Prüfstandes durch eine knapp 1 m<sup>2</sup> große Betonplatte macht das Verfahren für viele Bodenbelagshersteller interessant. Das Verfahren ist zur Normung bei ISO vorgeschlagen. Schließlich wurde ein völlig neues Messverfahren zur Bestimmung des Gehgeräuschpegels auf Fußbodenbelägen entwickelt, das sich durch eine umfassende Unsicherheitsanalyse und die bequeme Elimination wesentlicher Un-

sicherheitseinflüsse durch die Differenzbildung aus zwei Messsituationen auszeichnet.

Der wissenschaftliche Austausch wurde u. a. durch eine Informationsveranstaltung für die anerkannten Schallprüfstellen (120 Teilnehmer) und ein Seminar im Kloster Drübeck gepflegt, wo 19 Doktoranden und 5 Hochschullehrer aus PTB und zwei Universitäten ihre Projekte vorstellten und diskutierten.

Schwerpunkt der Arbeitsgruppe *Geräuschmesstechnik* sind Bauartzulassungen von Schallpegelmessgeräten, Mikrofonkalibrierungen und Fragen der Geräuschbekämpfung. Nachdem die Umstellung der erforderlichen Prüfungen entsprechend EN 61672 abgeschlossen ist, wurden Feinarbeiten und Rationalisierungen in den Messabläufen durchgeführt: Durch optimierte und breitbandige Anregesignale wurden schnellere und sicherere Messergebnisse erzielt. Beim Freifeld-Reziprozitäts-Kalibrierplatz konnten die Ursachen von unerwünschtem Übersprechen zwischen Sendee- und Empfangskanal eindeutig lokalisiert werden.

Im Forschungsvorhaben „Schallschutzschirme für Orchestermusiker“ wurde die Überlegenheit der neu entwickelten Schirme unter „Betriebsbedingungen“ eindrucksvoll nachgewiesen (Bild 9).

Die Vertreter der mit Schallpegelmessern betrauten Eichämter trafen sich zu einem Erfahrungsaustausch in der PTB, um die Durchführung von Eichungen zu klären und weiter zu vereinheitlichen.

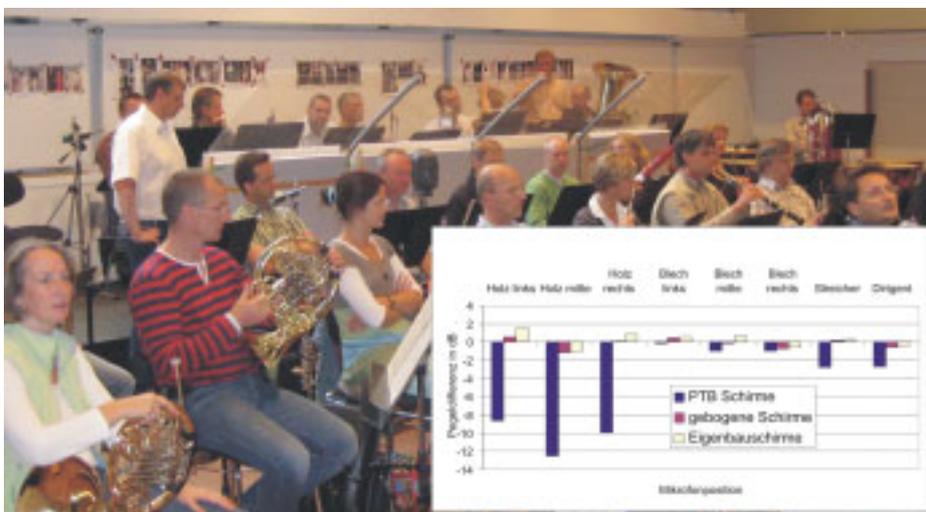


Bild 9: Die neuen Schallschutzschirme senken – im Gegensatz zu den bisherigen Behelfslösungen – insbesondere den Pegel direkt vor den Blechbläsern wirkungsvoll ab (s. kleines Diagramm).

# In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

## Grundlagen der Metrologie

### Einfluss des Schwingerregers bei der Primärkalibrierung von Single-ended-Beschleunigungsaufnehmern

Während der Vorbereitungsmessungen für die anstehende internationale Vergleichsmessung im Bereich der Darstellung der Messgröße Beschleunigung wurden signifikante Differenzen zwischen den Ergebnissen von Kalibrierungen, die auf verschiedenen Schwingerregern gemessen worden waren, gefunden. Die nähere Untersuchung dieses Phänomens führte zur Entdeckung eines bislang nicht beobachteten Störeffekts, der das Ergebnis der Kalibrierung unter bestimmten Voraussetzungen von den Materialeigenschaften des genutzten Schwingteils abhängig macht. (Th. Bruns, FB 1.3, [thomas.bruns@ptb.de](mailto:thomas.bruns@ptb.de))

### Messplatz zur primären Phasenkalibrierung von Laser-Doppler-Vibrometern entwickelt

In der Arbeitsgruppe *Darstellung Beschleunigung* wurde im Rahmen einer Diplomarbeit der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel ein Messplatz zur primären Bestimmung der Phasenverzögerung von Laser-Doppler-Vibrometern (LDV) entwickelt. Um möglichst kleine Messunsicherheiten zu erzielen, versorgt der Laserstrahl des Prüflings (LDV-Messstrahl) auch ein in Quadratur betriebenes Michelson-Interferometer als Referenz. (F. Blume, FB 1.3, [frank.blume@ptb.de](mailto:frank.blume@ptb.de))

### Funktionalitäts- und Zuverlässigkeitsoptimierungen am Hydrodynamischen Prüffeld

Die gesamte IT-Hard- und -Software des Hydrodynamischen Prüffeldes wurde nach mehr als zehnjähriger Betriebslaufzeit durch aktuelle, dem neuesten Stand der Technik entsprechende Computerhardware sowie entsprechende System- und Anwendersoftware ersetzt, wodurch Zuverlässigkeit, Funktionalität und Bedienbarkeit der Anlage wesentlich verbessert werden konnten. (Rainer Engel, FB 1.5, [rainer.engel@ptb.de](mailto:rainer.engel@ptb.de))

### Vor-Ort-Kalibrierung von Flüssigkeitsmessgeräten mit neuartigem Injektionsverfahren

Mengen- und Durchflussmessgeräte werden mit ortsfesten Messeinrichtungen unter Referenzbedingungen geprüft und kalibriert. Problematisch wird es, wenn sich die Messbedingungen bei der industriellen Anwendung von diesen Bedingungen unterscheiden, sich das Messverhalten eines Durchflussmessgerätes daraufhin ändert und die Messergebnisse folglich verfälscht werden. Abhilfe kann ein patentiertes Verfahren schaffen, das mit Hilfe eines statischen Normals (auf der Basis einer exakten Masse- oder Volumenbestimmung) eine Kalibrierung von Mengen- und Durchflussmessgeräten unter Strömungsbedingungen am Einbauort ermöglicht. (J. Riedel, FB 1.5, [joerg.riedel@ptb.de](mailto:joerg.riedel@ptb.de))

### Neukalibrierung des Mineralölzählerprüfstandes

Der Mineralölzählerprüfstand (MÖZ) der PTB dient der Prüfung und Kalibrierung von Mengen- und Durchflussmessgeräten, die für die Messung von Flüssigkeiten außer Wasser vorgesehen sind. Sowohl das Betriebsregime (nunmehr auch mit Pumpendirektbetrieb und „fliegendem“ Start-Stopp) als auch die Steuerung werden zur Zeit grundlegend erweitert. Im Rahmen dieser Erweiterung wurde auch eines der volumetrischen Normale des MÖZ mit einem magnetostriktiven Höhenmesssystem ausgerüstet und neu kalibriert. (J. Riedel, FB 1.5, [joerg.riedel@ptb.de](mailto:joerg.riedel@ptb.de))

### Robuste Signalstatistik für die Darstellung der Schalldruckeinheit

Durch Anwendung moderner Verfahren der Signalstatistik wurde der Messzeitbedarf bei der Druck-Reziprozitätskalibrierung von Labornormalmikrofonen verringert. (T. Fedtke, FB 1.6, [thomas.fedtke@ptb.de](mailto:thomas.fedtke@ptb.de))

### **Bestimmung der Übertragungsfunktion von Photodetektoren mit Hilfe eines heterodynem Überlagerungsverfahrens mit Differenzfrequenzstabilisierung**

Es wird eine Methode für die Kalibrierung von Photodioden unter Bedingungen, wie sie in Ultraschallanwendungen vorkommen, vorgestellt, die mit kostengünstigen optischen und elektronischen Standardbauteilen auskommt. (C. Koch, FB 1.6, christian.koch@ptb.de)

### **Lothar-Cremer Preisträger 2009: Volker Wittstock**

Am 24.3.2009 wurde Volker Wittstock anlässlich der akustischen Jahrestagung in Rotterdam der Lothar-Cremer-Preis der Deutschen Gesellschaft für Akustik verliehen. Die DEGA vergibt diesen Preis jeweils einmal jährlich für herausragende Leistungen von Nachwuchswissenschaftlern. (W. Scholl, FB 1.7, werner.scholl@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Neue Wägezelle aus Silicium**

Die Technologie konventioneller Dehnungsmessstreifen-Wägezellen wurde in der PTB auch für hochpräzise Wägungen weiterentwickelt. Die neue Wägezelle aus einkristallinem Silicium (statt aus Metall) mit aufgesputterten (statt geklebten) Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen weist ein deutlich verbessertes Zeit- und Hystereseverhalten sowie eine bessere Reproduzierbarkeit auf. (S. Mäuselein, FB 1.1, sascha.mauselein@ptb.de)

#### **Drehmoment-Referenzen querbelastet**

Für die Kalibrierung von Drehmomentaufnehmern im Vergleichsverfahren werden sogenannte Referenz-Aufnehmer benötigt, die rückführbare Drehmoment-Bezugswerte liefern. Diese werden ihrerseits in hochwertigen Einrichtungen kalibriert, in denen die Referenz-Aufnehmer anderen – in der Regel geringeren – Querkräften und Biegemomenten ausgesetzt sind als im Einsatz im Vergleichsverfahren. Für typische Beispielsituationen wurden die Einflüsse dieser ungleichen Bedingungen mit Hilfe von speziellen Vorrichtungen untersucht, um Empfehlungen für die Messunsicherheitsberechnung in betroffenen Kalibrierlaboratorien geben zu können. (A. Brüge, FB 1.2, andreas.bruege@ptb.de)

### **Aufbau von Messeinrichtungen zur Bestimmung der Verformung von Kraftaufnehmern**

An statischen und dynamischen Kraftmess-einrichtungen wurden Aufbauten realisiert und untersucht, welche eine Verformungsmessung von Kraftaufnehmern unter Last mittels eines differentiellen Laser-Vibrometers ermöglichen. Gerade im Bereich dynamischer Messungen ist zusätzlich zur Kraft oftmals die Kenntnis des Verformungsweges vonnöten. (A. Buß, FB 1.2, andre.buss@ptb.de)

### **Inkrafttreten der neuen Gasdruckmessmethode im Kaliber .22**

Nach Ablauf der Einspruchsfrist von einem halben Jahr nach der C.I.P.-Plenartagung im Oktober 2008 in Salzburg ist die Messmethode für das Kaliber .22 für Zug-Feld-Messläufe in den C.I.P.-Beschlüssen rechtskräftig. Die Regierungen der C.I.P.-Mitgliedsländer sind nun gehalten, dieses Verfahren zügig in nationales Recht umzusetzen. Damit löst das in der PTB entwickelte Verfahren das bisherige Standardverfahren mit der veralteten Stauchkörpermethode ab und erlaubt die Verwendung von piezoelektrischen Druckaufnehmern auch an kleinvolumigen Hülsen. (E. Franke, FB 1.3, ernst.franke@ptb.de)

### **Fertigstellung des Normentwurfes im CEN/TC 213 „Cartridge operated hand held fixing tools – safety“**

Mit Abschluss der Sitzung der zuständigen Arbeitsgruppe zum in der Überschrift angegebenen Entwurf im September 2009 in Berlin wurde das vorgegebene Zeitfenster für die Bereitstellung zur anschließenden Umfrage in den Mitgliedsländern eingehalten. Die PTB war dabei vorrangig aufgefordert, daran mitzuwirken, dass die sicherheitstechnischen Anforderungen der C.I.P.-Beschlüsse und des Beschussgesetzes in die Normungsvorschrift CEN/TC 213 und prEN 15895 umgesetzt werden. Mit Inkrafttreten der neuen Maschinenrichtlinie 2006/42/EG ist diese zum 29.12.2009 in den europäischen Mitgliedsländern für diese neu aufgenommenen Geräte mit Treibladungsantrieb anzuwenden. In einer Übergangszeit für die C.I.P.-Mitgliedsländer dürfen diese auch noch weiterhin nationales Recht anwenden. (E. Franke, FB 1.3, ernst.franke@ptb.de)

### **Umbau des PTB-Windkanals mit 320 mm Düsendurchmesser abgeschlossen**

Für die Darstellung und Weitergabe der Strömungsmessgröße „Strömungsgeschwindigkeit“ wurde der 320 mm-Windkanal, der wegen seiner offenen Bauweise bisher nur über das Gebläse des Großgaszählerprüfstands betrieben werden konnte, zu einem geschlossenen Windkanal mit nun wahlweise offener oder geschlossener Messstrecke umgebaut und in Betrieb genommen. (H. Müller, FB 1.4, harald.mueller@ptb.de)

### **Darstellung von Gasvolumenströmen mit erheblich verringerter Messunsicherheit**

Die europäische Metrologieorganisation EURAMET hat sich im Bereich der Durchflussmessung gasförmiger Medien das Ziel gesetzt, die Messunsicherheit vor Ort um den Faktor 5 zu verringern. Mit einer neuartigen Fundamentalapparatur ist die PTB diesem Ziel nun entscheidend näher gekommen. (R. Kramer, FB 1.4, rainer.kramer@ptb.de)

### **Verbesserte Qualitätssicherung auf dem Hochdruck-Gaszählerprüfstand pigsar™**

Durch den Einbau von Ultraschallgaszählern als zusätzliche Gebrauchsnormale zu den bereits existierenden Turbinenradgaszählern sowie zum kontinuierlichen Vergleich mit Gasqualitätsdaten wurde in Kooperation mit der PTB die Qualitätssicherung und Langzeitstabilität des Hochdruck-Gaszählerprüfstand pigsar™ der E.ON Ruhrgas weiter verbessert. (B. Mickan, FB 1.4, bodo.mickan@ptb.de)

### **Ein Kompaktverfahren zur Bestimmung des Trittschallverbesserungsmaßes**

Die Ermittlung des Trittschallverbesserungsmaßes war bisher durch die Verwendung eines bauakustischen Deckenprüfstands, bestehend aus zwei übereinander liegenden Räumen von je 50 m<sup>2</sup>, sehr aufwendig. Bei einem in der PTB im Rahmen eines AiF-Projekts neu entwickelten Kompaktverfahren wird die gesamte Zweiraumanordnung durch einen Messaufbau von der Größe eines Schreibtisches ersetzt. (M. Sommerfeld, FB 1.7, marc.p.sommerfeld@ptb.de)

## **Metrologie für die Gesellschaft**

### **Wägelexikon in Englisch erschienen**

In Zusammenarbeit von Wissenschaftlern der Abteilung *Mechanik und Akustik* mit der Firma Mettler-Toledo AG ist im Springer-Verlag das „Dictionary of Weighing Terms“ erschienen. Das neue Wägelexikon ist ein umfassendes Nachschlagewerk der Wägepraxis für alle Nutzer von Waagen in Industrie und Wissenschaft. Es erläutert über 1000 Begriffe aus der Wägetechnik und verwandten Gebieten. Zahlreiche Abbildungen tragen zum besseren Verständnis bei. (P. Zervos, FB 1.1, panagiotis.zervos@ptb.de)

### **Waagentuning mit Nachrüstmodulen**

Im wägetechnischen Bereich wurde das erste Zertifikat für ein besonderes Waagenmodul ausgestellt. Es realisiert Funktionen, die es ermöglichen, angeschlossene einfache, nicht-preisrechnende Waagen zu preisrechnenden Waagen nachzurüsten. Durch Anschluss eines Etikettendruckers, in Verbindung mit geeigneten Funktionen in der Software des Moduls, können bei Bedarf bestehende Waagen zudem zu Preisauszeichnungswaagen nachgerüstet werden. (M. Link, FB 1.1, marcus.link@ptb.de)

### **Kalibrierung von Ergometerprüfständen jetzt in der Arbeitsgruppe Drehmoment**

Tretkurbelergometer gelten nach dem Medizinproduktegesetz als „Medizinprodukte mit Messfunktion“. Gemessen wird dabei die vom Patienten aufgebrachte rotatorische Leistung als Produkt aus momentaner Drehzahl und wirkendem Drehmoment. Das Normal, auf das alle kalibrierten Ergometer letztlich zurückgeführt werden, wird in der PTB jetzt von der Arbeitsgruppe *Drehmoment* in Braunschweig betrieben. (D. Röske, FB 1.2, dirk.roeske@ptb.de)

### **Bauartzulassung eines videobasierten Systems zur Bestimmung von Geschwindigkeitsdifferenzen von Kraftfahrzeugen**

Über eine Verkehrssituation mit einem langsam überholenden LKW hat sich wohl jeder schon einmal geärgert. Derartige Überholmanöver können zu einer erheblichen Behinderung und Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer führen und werden im Falle von LKW-Beteiligung als Elefantenrennen bezeichnet. Durch die Erweiterung der Bauartzulassung für das Verkehrs-Kontroll-System der Fa. VIDIT kann die Differenzgeschwindigkeit zweier einander überholender Fahrzeuge ermittelt werden, sodass jetzt auch die Möglichkeit zur Ahndung verkehrsgefährdender Überholmanöver besteht. (F. Märten, FB 1.3, frank.maertens@ptb.de)

### **Neues Laserscanverfahren für große Lagertanks vorgestellt**

Erfreulich große Resonanz fand der Internationale Workshop „Calibration of storage tanks by optical scanning“, der am 17. und 18. Juni 2009 in Hamburg veranstaltet wurde und den vorläufigen Abschluss einer sehr erfolgreichen Zusammenarbeit von PTB, Eichdirektion Nord und der Trimble Holdings GmbH (früher CALLIDUS precision systems GmbH) bei der Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur laseroptischen Vermessung von großen Lagertanks bildete. (G. Wendt, FB 1.5, gudrun.wendt@ptb.de)

### **CHIRP: Das nützliche Zwitschern – PTB-Forschungsergebnisse unterstützen Neugeborenen-Hörscreening**

Seitdem 2009 das Neugeborenen-Hörscreening gesetzliche Krankenkassenleistung geworden ist, hat die Nachfrage nach zuverlässigen und schnellen Geräten für die objektive Audiometrie stark zugenommen. Die Bestimmung der Hörschwellen für hochwirksame neue „Chirp“-Testsignale in der PTB ermöglicht die verlässliche Kalibrierung der eingesetzten Geräte und unterstützt damit den Verkauf großer Stückzahlen. (J. Hensel, FB 1.6, johannes.hensel@ptb.de)

### **Einfachere Charakterisierung der Schallbündel von Ultraschall diagnostikgeräten mithilfe thermischer Intensitätssensoren**

In der PTB entwickelte thermische Sensoren können vorteilhaft zur Messung von Intensitätsprofilen moderner diagnostischer Ultraschallgeräte eingesetzt werden und ergänzen die konventionelle Hydrophonmesstechnik. (V. Wilkens, FB 1.6, volker.wilkens@ptb.de)

### **Schallschutzschirme erfolgreich im Orchestereinsatz erprobt**

Nach Einführung der neuen EU-Richtlinie 2003/10/EG zum Lärmschutz am Arbeitsplatz war in einem Gemeinschaftsprojekt der AG 1.72 *Geräuschesstechnik* mit den Städtischen Bühnen Münster und der Unfallkasse NRW ein Schallschutzschirm für Orchester Musiker entwickelt worden. Die in Labor-messungen bereits ermittelten Schalldämmwerte konnten nun auch durch Messungen während einer Orchesterprobe bei den Städtischen Bühnen Münster/Westfalen bestätigt werden. (I. Bork, FB1.7, ingolf.bork@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

#### **Rund um die Welt – Waagen made in Germany**

Die PTB stellt nunmehr Zertifikate gemäß OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale) für Waagen und Wägezellen nach dem neuen MAA (Mutual Acceptance Arrangement) aus und fördert so deren Export in alle Welt. Unter den rund hundert Mitgliedstaaten der OIML gehört Deutschland, vertreten durch die PTB, sowohl zu der Gruppe der zehn, die für die Zertifizierung von nichtselbständigen Waagen im Rahmen des MAA zuständig sind, als auch zu einer Gruppe von nur sechs Staaten, die ebensolche Zertifikate für Wägezellen ausstellen dürfen. (P. Zervos, FB 1.1, panagiotis.zervos@ptb.de)

#### **Neues aus der OIML**

Ende Oktober 2008 tagte die 13. Internationale Konferenz für das gesetzliche Messwesen in Sydney, Australien. Zu dieser alle vier Jahre stattfindenden Konferenz der Internationalen Organisation für Gesetzliches Messwesen (OIML) waren insgesamt 127 Teilnehmer aus 41 Mitgliedsländern und acht Korrespondierenden Mitgliedsländern angereist. (R. Schwartz, Abt. 1, roman.schwartz@ptb.de)

### **Anwendung des modularen Konzepts bei Waagen**

In der zweiten Ausgabe des OIML-Bulletins im Jahr 2009 (OIML = Organisation Internationale de Métrologie Légale) wurde von Mitarbeitern der *Abteilung 1* ein Artikel zur Anwendung des modularen Konzepts bei Waagen veröffentlicht. Hintergrund waren metrologische Interpretationsschwierigkeiten sowohl seitens des BIML als auch seitens einiger Mitglieder der OIML hinsichtlich des modularen Konzeptes in der neuesten Ausgabe der OIML-Empfehlung R76-1 (Metrologische Aspekte nichtselbsttätiger Waagen) von 2006. (K. Schulz, FB 1.1, karsten.schulz@ptb.de)

### **Revision der OIML-Empfehlung R50 (Förderbandwaagen) kurz vor dem Abschluss**

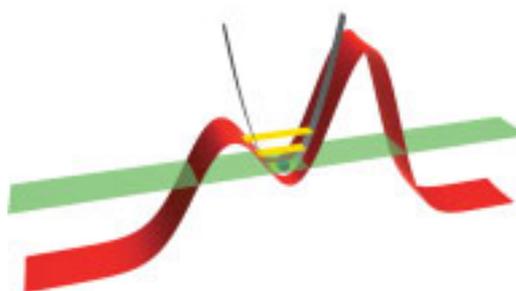
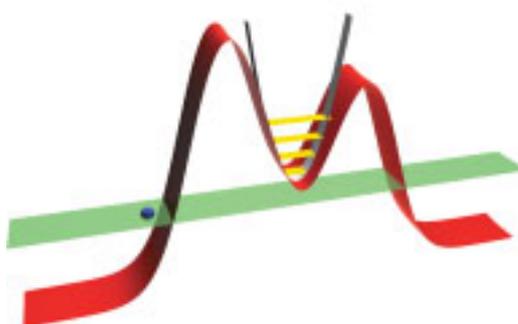
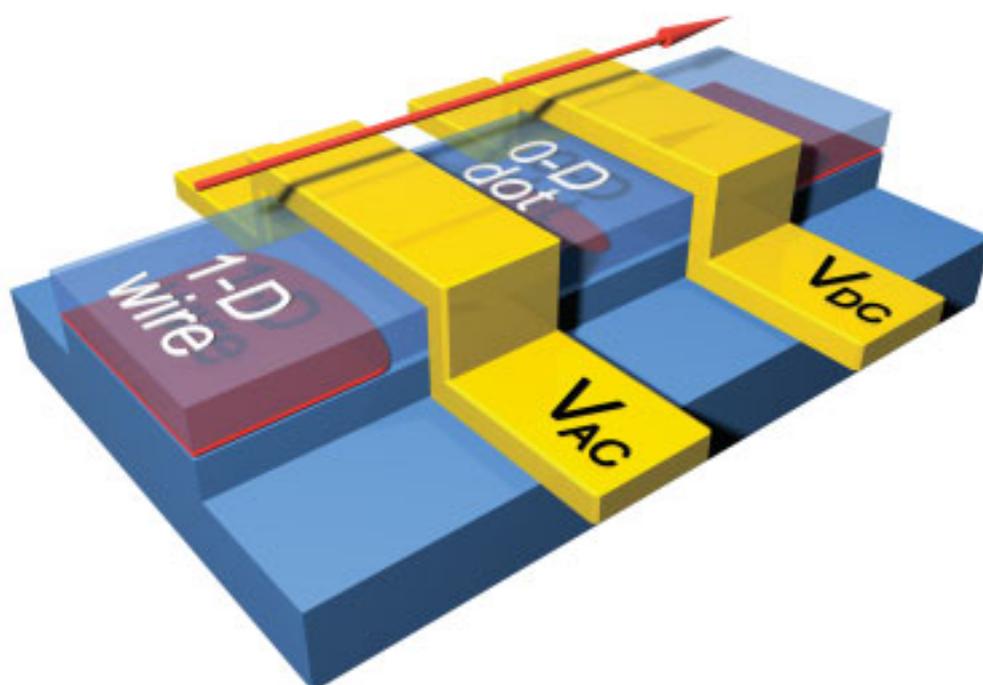
Zurzeit wird die OIML-Empfehlung R50 für Förderbandwaagen überarbeitet und den aktuellen technischen Entwicklungen angepasst. Ziel ist unter anderem, die Förderbandwaagen in Bezug auf EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit) und Prüfung von Softwareaspekten genauso zu behandeln wie andere Arten von Waagen. (K. Schulz, FB 1.1, karsten.schulz@ptb.de)

### **Chinesisch-europäische Konferenz zur Gasmetrologie**

Über 130 Fachexperten der Gasmengen-Messtechnik und des gesetzlichen Messwesens aus China und Europa haben sich am 3. und 4. November 2008 in Peking über die aktuellen Entwicklungen im Gasbereich ausgetauscht. (H. Többen, FB 1.4, helmut.toebben@ptb.de)



# Elektrizität



Berichte der Abteilungen

Abteilung



# Elektrizität

Die Abteilung 2 mit ihren sechs Fachbereichen *Gleichstrom und Niederfrequenz, Hochfrequenz und Felder, Elektrische Energiemesstechnik, Quantenelektronik, Halbleiterphysik und Magnetismus* und *Elektrische Quantenmetrologie* bearbeitet alle Aspekte des Themengebiets *Elektrizität und Magnetismus*. Das Zusammenwirken der Fachbereiche gemäß der „metrologischen Wertschöpfungskette“ von der metrologischen Grundlagenforschung zum Dienstleistungsangebot für Wirtschaft und Gesellschaft zeigt Bild 1. Die Arbeiten der Abteilung konzentrieren sich mittelfristig auf die fünf Schwerpunktgebiete *Elektrische Quantenmetrologie, Aufbau von Quanten- und klassischen Skalen für elektrische und magnetische Einheiten, Elektrische Energiemesstechnik, Metrologie für magnetische Nanostrukturen* und *Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie*.

Zum Ausbau der Schwerpunktgebiete beteiligt sich die Abteilung an sieben der 21 seit dem Jahr 2008 bearbeiteten *Joint Research Projects* des iMERA-plus-Programms. Inzwischen konnten, finanziert durch dieses Programm, acht junge Wissenschaftler/innen eingestellt werden, was die Zahl der in der Abteilung beschäftigten Doktoranden und Postdoktoranden auf 31 erhöht hat. Zur besseren Integration der Nachwuchswissenschaftler/innen hat die Abteilung ein (Post)-Doktorandenseminar ins Leben gerufen, das ein Forum für die Diskussion schwerpunktsübergreifender metrologischer Fragestellungen

Titelbild:

Halbleiter-Einzelelektronenpumpe: Zwei metallische Elektroden (gelb) definieren einen Quantenpunkt (0-D dot) in einem nanostrukturierten Halbleiterdraht (1-D wire). Durch Anlegen einer Wechselspannung ( $V_{AC}$ ) an eine der Elektroden wird das Potential moduliert (schematische Darstellung im unteren Teil), sodass pro Zyklus ein einzelnes Elektron transportiert wird (Pfeil).

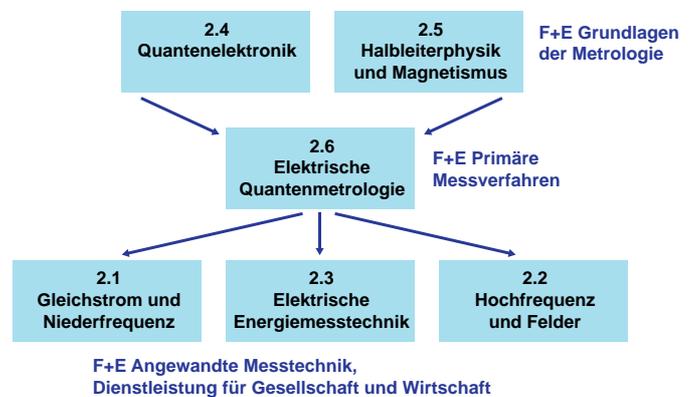


Bild 1: Wertschöpfungskette von der metrologischen Grundlagenforschung zu Dienstleistungen für Gesellschaft und Wirtschaft.

gen bietet (Bild 2). Die wichtigsten Entwicklungen in den Arbeitsschwerpunkten der Abteilung werden im Folgenden dargestellt.

## Elektrische Quantenmetrologie

Die Arbeiten in diesem Gebiet haben die Entwicklung und Validierung von Primärverfahren für die Darstellung und Reproduzierung der elektrischen Einheiten sowie die Untersuchung neuer, für die elektrische Metrologie vielversprechender Quantenphänomene zum Ziel. Zur Validierung der Primärverfahren arbeitet die Abteilung an dem Schluss des quantenmetrologischen Dreiecks in der Variante, die die Ladung, die elektrische Spannung und die Kapazität verknüpft. Letztere wird dabei auf den Quanten-Hall-Effekt zurückgeführt. Im vergangenen Jahr wurden Detailspekte der für das Experiment zentralen metallischen Einzelelektronenpumpen verbessert mit dem Ziel, die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen.

Zur Unterstützung von Experimenten zum Schluss des „direkten“ quantenmetrologischen Dreiecks aus Stromstärke, Spannung und Widerstand entwickelt die Abteilung Einzelelektronenschaltungen, die das Potenzial haben, quantisierte Ströme im Nanoam-



Bild 2: (Post)-Doktorandenseminar der Abteilung *Elektrizität*.

perebereich zu liefern. Dabei werden zwei vielversprechende Konzepte verfolgt. Halbleiter-Einzelelektronenpumpen können auf Grund ihrer modulierbaren Energiebarrieren bei Frequenzen im GHz Bereich betrieben werden (siehe Titelbild). Dabei ist die Beschaltung relativ einfach, was eine notwendige Voraussetzung für die Parallelisierung mehrerer Kanäle zur Stromerhöhung ist. Stabiler Betrieb ist über einen weiten Bereich der Steuerspannungen möglich. Kürzlich konnte gezeigt werden, dass durch das Anlegen eines Magnetfeldes die Qualität der Plateaus der Strom-Spannungskennlinie, die die Erzeugung eines quantisierten Stroms signalisieren, stark verbessert wird. Die Auswertung der Kennlinie mit Hilfe eines kürzlich entwickelten Modells ergibt, dass quantisierte Ströme mit relativen Unsicherheiten bis zu  $10^{-8}$  erzeugt werden können. Die zukünftigen Arbeiten haben die experimentelle Überprüfung dieser auf einer Modellrechnung beruhenden Aussage zum Ziel.

Eine Alternative zu Halbleiter-Einzelelektronenpumpen bieten hybride Schaltungen mit supraleitenden (S) Zuleitungen und einer normalleitenden (N) Ladungsinsel (Bild 3). Aufgrund des Zusammenspiels von Coulomb-Blockade und der Unterdrückung von Strömen im Energiebereich der supraleitenden Bandlücke kann Einzelelektronentransport in solche SNS-Bauelementen mit Hilfe einer einfachen Beschaltung realisiert werden. Dadurch wird es möglich, mehrere SNS-Einzelelektronentransistoren parallel zu

betreiben und so quantisierte Ströme mit Stromstärken in Nanoamperebereich zu erzeugen. Für metrologische Anwendungen muss die Genauigkeit der quantisierten Ströme weiter verbessert werden. Kürzlich konnte in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität von Helsinki gezeigt werden, dass das Vorschalten von Chrom-Widerständen durch die Unterdrückung von Kottunnelprozessen zu einer Verbesserung der Genauigkeit führt.

Die Untersuchung neuer, für die elektrische Metrologie vielversprechender Quantenphänomene konzentriert sich auf das Material Graphen, das aus einer oder wenigen Lagen von Kohlenstoffatomen besteht und ein neues zweidimensionales Elektronensystem darstellt. Quanten-Hall-Bauelemente aus Graphen haben das Potential, quantisierte Widerstandswerte hoher Präzision unter einfacheren Betriebsbedingungen, z. B. bei höheren

Bild 3: Hybrid-Schaltung mit supraleitenden (S) Zuleitungen und einer normalleitenden (N) Ladungsinsel. Die Chrom-Widerstände erhöhen die Präzision des Einzelelektronentransports.

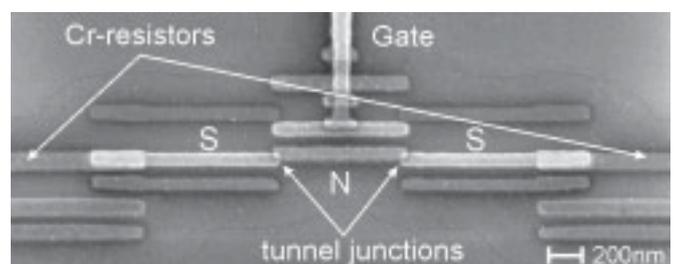
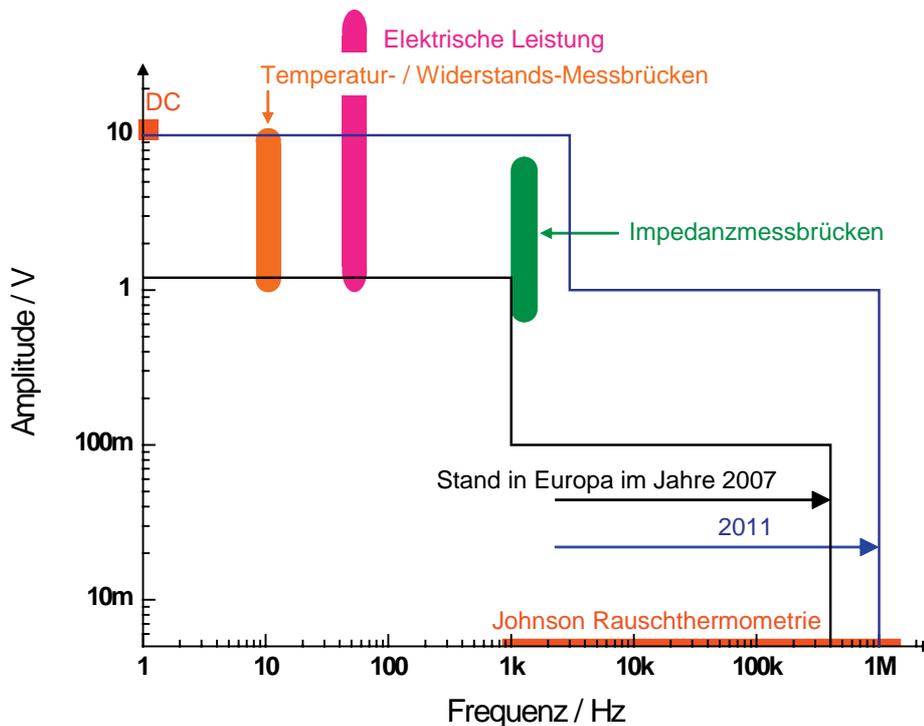


Bild 4: Spannungsamplituden- und Frequenzbereich von Josephson-Normalen: Stand in Europa im Jahre 2007 und angestrebte Erweiterung. Farbig markiert sind die Spannungs- und Frequenzbereiche wichtiger Anwendungen der Wechselspannungsmesstechnik. Nicht gezeigt: Kalibrierung von Thermokonvertern für den Wechsel-Gleich-Transfer und von A/D-Wandlern über einen weiten Frequenzbereich.



Temperaturen, zu liefern. In Zusammenarbeit mit der Leibniz-Universität Hannover wurde eine Herstellungstechnologie für epitaktisches Graphen basierend auf der Rekristallisation von SiC etabliert. Exfoliertes Graphen wird inzwischen an der PTB routinemäßig hergestellt. Systematische Magnetotransport-Untersuchungen dieses neuen Materialsystems werden zur Zeit durchgeführt.

### Quanten- und klassische Einheitenskalen

Bei der Rückführung der Einheit der Kapazität auf Quanteneffekte ist der Abteilung ein Durchbruch gelungen. Die Kapazitätseinheit kann nun direkt auf den Wechselstrom-Quanten-Hall-Effekt zurückgeführt werden. Dafür wurde eine spezielle Quadraturbrücke mit zwei Quanten-Hall-Widerständen entwickelt, mit der Kapazitäten und quantisierte Widerstände verglichen werden können. Mit diesem Verfahren wird eine höhere Präzision erreicht als bei der Darstellung der Kapazität mit den besten heute verfügbaren berechenbaren Kondensatoren (siehe auch die Rubrik „Nachrichten des Jahres“).

Im Bereich Spannung arbeitet die Abteilung daran, den Amplituden- und Frequenzbereich von Josephson-Quantennormalen zu erweitern und diese Normale verstärkt für die Wechselspannungsmesstechnik nutzbar zu machen. Hier existiert eine enge Zusammenarbeit mit anderen europäischen metrologi-

schen Instituten im Rahmen eines von der Abteilung koordinierten *Joint Research Projects* des iMERA-plus Programms. Bild 4 zeigt die Ausgangssituation in Europa im Jahre 2007 und die durch das Projekt angestrebte Erweiterung sowie wichtige Anwendungen der Wechselspannungsmesstechnik. Für Anwendungen, die Spannungsamplituden von 1 V und mehr erfordern, werden programmierbare binär geteilte Josephson-Schaltungen eingesetzt. Hier ist im Jahr 2009 ein weiterer Fortschritt in der Schaltungsfertigung erzielt worden. In Zusammenarbeit mit dem NIST, USA, wurde eine 10-V-SNSNS-Josephson-Schaltung gefertigt (S: Supraleiter Nb, N: Normalleiter NbSi). Die Fünffschicht besteht aus zwei übereinander gestapelte Josephson-Kontakten. Für das 10-V-Josephson-Array halbiert sich dadurch die Zahl der in der Ebene angeordneten Josephson-Elemente von 69 632 auf 34 816. Dies verringert die Komplexität der integrierten Schaltung, was eine Erhöhung der Fertigungsausbeute verspricht.

Impulsgetriebene Josephson-Synthesizer können im Gegensatz zu den binär geteilten Josephson-Schaltungen auch bei höheren Frequenzen eingesetzt werden und eignen sich zur Erzeugung beliebiger Wellenformen. Daher wird dieser Schaltungstyp weiterentwickelt mit dem Ziel, die Spannungsamplitude zu erhöhen, die zur Zeit im 100-mV-Bereich liegt. Seit diesem Jahr kann zur Ansteue-

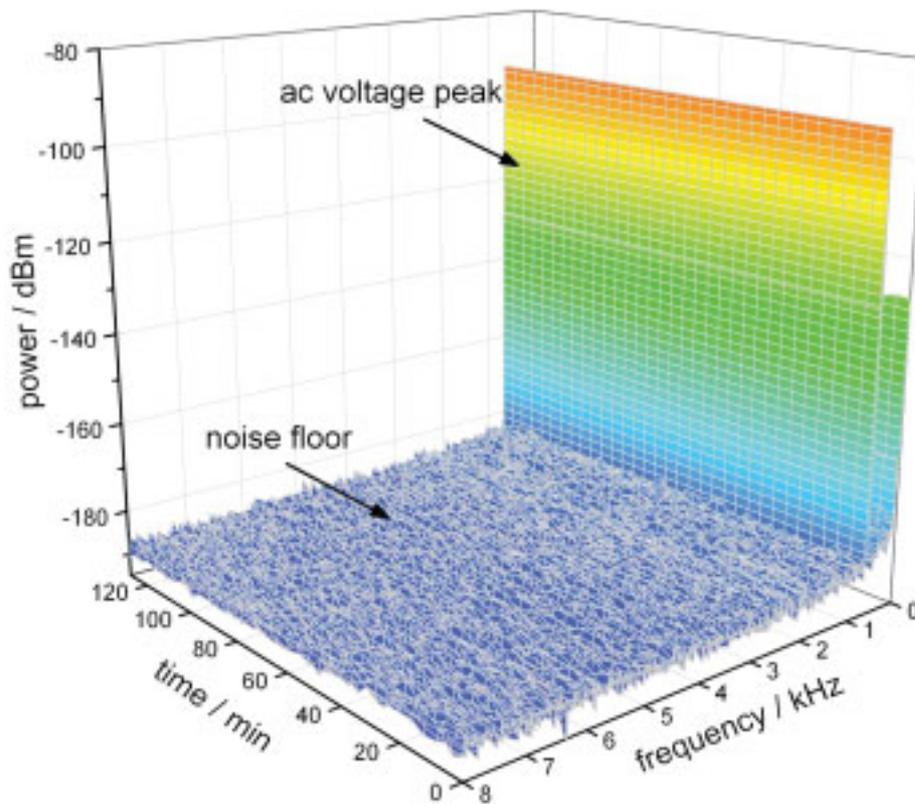


Bild 5: Frequenzspektrum einer mit einer impulsgetriebenen Josephson-Schaltung erzeugten Wellenform, gemessen über einen Zeitraum von mehr als zwei Stunden.

nung der Josephson-Synthesizer ein Puls-generator verwendet werden, der bipolare Ausgangsimpulse erzeugt. Dadurch wird die zeitliche Stabilität der Ausgangsspannung erheblich erhöht (Bild 5).

Im Bereich Stromstärke konnte das Dienstleistungsangebot bei der Kalibrierung kleiner Gleichstromstärken erweitert werden. Es ist nun möglich, für Stromstärken zwischen 100 pA und 1  $\mu$ A Kalibrierungen anzubieten, die im Rahmen des *CIPM Mutual Recognition Arrangement* international anerkannt werden. Dazu wurde eine Messeinrichtung aufgebaut, die die entsprechenden Ströme mittels einer stabilen Spannungsquelle und eines dem jeweiligen Bereich angepassten Hochohmwiderstands erzeugt.

### Elektrische Energiemesstechnik

Im Bereich der elektrischen Energiemesstechnik wurde im Berichtsjahr das Themenspektrum beträchtlich erweitert. Dazu wurden im Rahmen des EMRP-Programms *Energy* in Zusammenarbeit mit einer Vielzahl europäischer Partner Konzepte für die metrologische Absicherung der folgenden Gebiete erarbeitet: *Energieeffizienz elektronischer Schaltungen und Mikrowattmesstechnik, Hochstrom-Gleichübertragung und Intelligente Stromnetze (Smart*

*Grids)*. Die Abteilung ist an den Projektanträgen zu diesen Themen mit substantiellen Anteilen beteiligt und wird im Falle der Bewilligung der Projekte im kommenden Jahr die Arbeiten in diesen Gebieten aufnehmen. Die geplanten Arbeiten sollen die metrologische Basis für die Lösung aktueller Fragen der Energieversorgung, wie der optimierten Einbindung regenerativer Energiequellen in elektrische Versorgungsnetze, bereitstellen.

Der Ausbau der bereits etablierten Arbeitsgebiete wurde im Berichtsjahr konsequent fortgesetzt. Diese Arbeiten haben die Rückführung von Messungen der elektrischen Leistung und Energie, die rückgeführte Bestimmung von Netzqualitätskenngrößen sowie die Entwicklung von Traktionsenergiemesstechnik zum Ziel.

Zur Unterstützung der staatlich anerkannten Prüfstellen für Messgeräte für Elektrizität, die unter Aufsicht der Eichbehörden gewährleisten, dass die Verbraucher der Richtigkeit ihrer Elektrizitätszähler vertrauen können, wurde ein Messverfahren entwickelt, mit dem die Prüfstellen die Genauigkeitskontrollen von Trennstromwandlern in eigener Verantwortung und mit geringem Zeitaufwand durchführen können. Trennstromwandler

mussten nach der Einführung elektronischer Haushaltszähler von vielen Prüfstellen beschafft werden. Bisher mussten die Wandler zur Kontrolle in die PTB geschickt werden. Durch das neue Messverfahren wird der Zeit- und Kostenaufwand der Prüfstellen erheblich reduziert.

Netzqualitätskenngrößen beschreiben die Abweichung elektrischer Wechselgrößen von der Form einer perfekten Sinuswelle. Solche Abweichungen entstehen z. B. bei der elektrischen Energieerzeugung mit Hilfe regenerativer Energiequellen und können drastische Auswirkungen haben, die von der Erhöhung der Verluste bei der Übertragung elektrischer Energie bis zum Totalausfall des Versorgungsnetzes reichen. Im Rahmen eines *Joint Research Projects* des iMERA-plus-Programms wurden Algorithmen entwickelt, mit deren Hilfe die Verzerrung elektrischer Signale quantifiziert werden kann. Diese Algorithmen erlauben es, die Netzqualitätskenngrößen zu bestimmen und mathematisch gesicherte Aussagen über die Genauigkeit dieser Bestimmung zu machen.

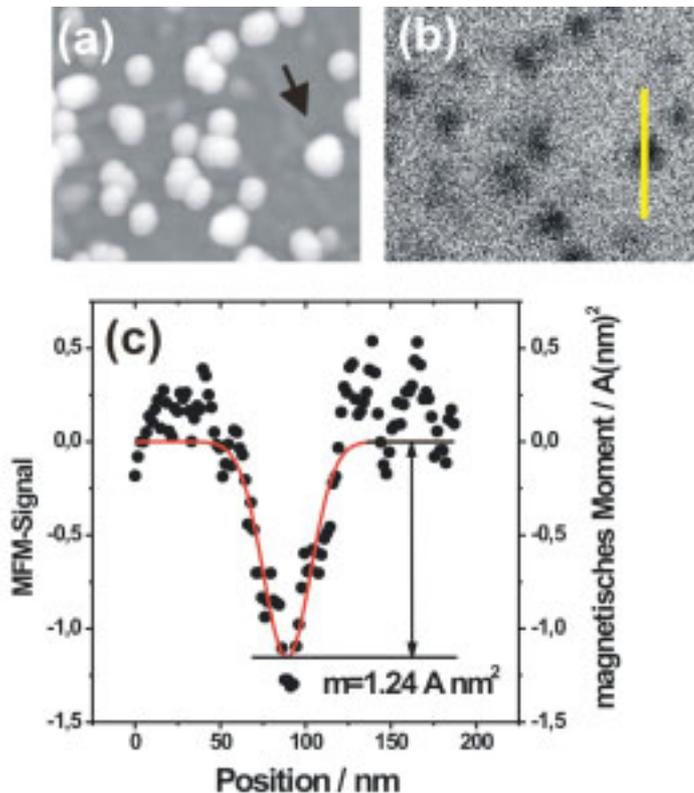
Die Traktionsenergiemesstechnik dient der metrologischen Absicherung der Nutzung von elektrischer Energie im Straßen- und Schienenverkehr. Zur Zeit konzentrieren sich die Arbeiten der Abteilung auf den Schienenverkehr. In einem Projekt mit der Technischen Universität Dresden und der DB Energie wird ein Energiemesssystem für Gleichstromfahrzeuge entwickelt, die im S-Bahn-Verkehr eingesetzt werden.

Bild 6: Rasterkraftmikroskopische (a) und magnetkraftmikroskopische (b) Aufnahme magnetischer Nanopartikel. Zur Bestimmung des magnetischen Momentes des mit einem Pfeil markierten Teilchens wird ein Schnitt durch dessen Magnetkraftmikroskopie-Abbildung entlang der gelben Linie ausgewertet (c).

### Metrologie für magnetische Nanostrukturen

Magnetische Nanostrukturen finden heute Anwendung in der Informations- und Kommunikationstechnik, der Sensorik und der Medizin. Um diese Anwendungen metrologisch abzusichern, entwickelt die Abteilung rückgeführte Messverfahren für die Feld- und Magnetisierungsverteilung nanomagnetischer Strukturen, für dynamische Magnetisierungsvorgänge in nanomagnetischen Speicherzellen (MRAM, Magnetic Random Access Memory) und für die magnetischen Kenngrößen von Nanopartikeln.

Im Berichtsjahr wurde erstmals die rückgeführte Messung des magnetischen Momentes eines einzelnen magnetischen Nanopartikels demonstriert. Solche Messungen bilden die Grundlage für die Qualitätssicherung beim Einsatz solcher Partikel in medizinischen Anwendungen und in der Bioanalytik. Das Messverfahren beruht auf der Magnetkraftmikroskopie (MFM, Magnetic Force Microscopy), bei der das Streufeld magnetischer Nanostrukturen über die Wechselwirkung mit einer magnetischen Spitze abgebildet wird. Für eindomänige sphärische Partikel ist das MFM-Signal proportional zum magnetischen Moment der Partikel. Der



Proportionalitätsfaktor stellt den Kalibrierfaktor der magnetischen Spitze dar. Dieser kann mit Hilfe einer Referenzprobe von magnetischen Nanopartikeln bestimmt werden, deren magnetische Momente mit SQUID-Magnetometrie rückführbar gemessen worden sind. Mit dem bekannten Kalibrierfaktor kann dann das magnetische Moment eines einzelnen Nanopartikels aus dem MFM-Signal bestimmt werden (Bild 6).

### Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie

Der Ausbau der Hochfrequenzmesstechnik zu höheren Frequenzen wurde im Berichtszeitraum konsequent fortgesetzt. Für die Rückführung der Leistungsmessung im Bereich 33 GHz bis 50 GHz steht jetzt ein neuer Mikrokalorimeter-Messplatz zur Verfügung. Mit dem Aufbau eines Kalorimetermessplatzes für die Leistungsmessung im Frequenzband 75 GHz bis 110 GHz wurde begonnen. Um kostengünstigere Leistungskalibrierungen anbieten zu können, wurde ein Außenvergleichsmessplatz aufgebaut, der bis 40 GHz den Anschluss von Kundennormalen an rückgeführte Leistungsmessgeräte der PTB erlaubt, ohne dass zeitaufwendige kalorimetrische Messungen durchgeführt werden müssen.

Für den Bereich der Antennen- und Feldmesstechnik wurde eine grundrenovierte Höchsthochfrequenz-Vollabsorberhalle in Betrieb genommen. Derzeit werden deren Eigenschaften mit speziellen Messverfahren charakterisiert. Danach steht in der PTB eine Laborumgebung zur Verfügung, in der unter nahezu idealen Bedingungen Antennen und Feldsensoren für den Personenschutz bis zu höchsten Frequenzen von 325 GHz kalibriert werden können. Ein dazu notwendiger Antennenscanner zur Manipulation der Antennen im Raum wird derzeit entwickelt. Die PTB unterstützt mit diesen messtechnischen Entwicklungen den Personenschutz gemäß dem Gesetz zur Regelung des Schutzes vor nichtionisierender Strahlung sowie der europäischen Richtlinie 2004/40/EC *Physical Agents Directive*.

Der zunehmende Bedarf an freier und unregulierter Bandbreite für kurzreichweitige Kommunikationssysteme führt dazu, dass die verwendeten Trägerfrequenzen zukünftig auf Werte von 300 GHz und darüber in den THz-Frequenzbereich ansteigen werden. Um diese Entwicklung metrologisch zu unterstützen,



Bild 7: Sende- und Empfangsmodul eines Messsystems zur Charakterisierung von Übertragungskanälen zukünftiger Terahertz-Kommunikationssysteme.

beteiligt sich die Abteilung am *Terahertz Communications Lab*, einer Initiative der Technischen Universität Braunschweig. Für grundlegende Untersuchungen zur THz-Kommunikation wurde ein bei der Trägerfrequenz 300 GHz arbeitendes Messsystem aufgebaut (Bild 7). Im Berichtsjahr konnte mit diesem System die Übertragung digitaler Signale einer Datenrate von 100 Mbit/s über 52 m erfolgreich demonstriert werden. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass neben gerichteter Signalübertragung auch eine Übertragung von Signalen mit Hilfe von Wandreflexionen möglich ist.

Zur weiteren Ausdehnung des messtechnisch zugänglichen Frequenzbereichs hat die Abteilung im Berichtsjahr ein neues THz-Optik-Labor eingerichtet. Das Herzstück bildet ein 30-fs-Laser, mit dessen Hilfe optoelektronische Messmethoden für elektromagnetische Signale mit Frequenzen bis zu 10 THz entwickelt werden sollen.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Extrem rauscharmer Vorverstärker für die AC-Quanten-Metrologie

Für den neu entwickelten Quantenstandard der Kapazität, der auf einem Wechselstrom-Quanten-Hall-Widerstand beruht, wurde ein extrem rauscharmer Vorverstärker entwickelt. (G. Ramm, FB 2.1, [guenther.ramm@ptb.de](mailto:guenther.ramm@ptb.de))

#### Kanalmessungen für zukünftige Terahertz-Kommunikationssysteme

In der PTB wurden mit einem 300-GHz-Messsystem erste Messungen der Ausbreitungseigenschaften von THz-Wellen in Innenräumen durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass gerichtete Signalübertragungen mit Hilfe von Wandreflexionen möglich sind. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, [thomas.kleine-ostmann@ptb.de](mailto:thomas.kleine-ostmann@ptb.de))

#### Einfluss einer dissipativen Umgebung auf diskreten Transport in hybriden Einzelladungstransistoren

Bei der Untersuchung des Einflusses einer dissipativen Umgebung auf die Funktionsweise einer diskreten Ladungspumpe auf Basis eines hybriden Normalleiter/Supraleiter-Einzelelektronentransistors wurde eine deutliche Qualitätssteigerung der Konstantstromstufen  $I = ef$  im unteren MHz-Frequenzbereich festgestellt. (S. Lotkhov, FB 2.4, [sergey.lotkhov@ptb.de](mailto:sergey.lotkhov@ptb.de))

#### Integration von SFS- $\pi$ -Kontakten in digitale Einzelflussquantenschaltungen

Mit der Supraleiter-Ferromagnet-Supraleiter (SFS)-Technologie können Josephson-Tunnelkontakte mit einer nicht-konventionellen Stromstärke-Phasenabhängigkeit hergestellt werden. Ein solches SFS-Josephsonelement mit invertierter Stromstärke-Phasenbeziehung wurde jetzt erstmals in digitale Einzelflussquantenschaltungen integriert. (D. Balachov, FB 2.4, [dmitri.balachov@ptb.de](mailto:dmitri.balachov@ptb.de))

#### Quantenverhalten eines dc-SQUID mit Kamelrücken-Potential

Die potentielle Energie eines dc-SQUID mit zwei Josephson-Kontakten kann die Form eines symmetrischen Kamelrückens annehmen, wenn der Querstrom etwa null ist und der Magnetfluss etwa ein halbes Flussquant beträgt. Aufgrund der Energiequantisierung in der zentralen Potentialmulde kann das SQUID als Josephson-Phasen-Qubit arbeiten. Die Schaltung zeigt durch Mikrowellen induzierte Rabi-Oszillationen und das Heraustunneln aus der zentralen Potentialmulde ermöglicht ein Auslesen des Qubit-Zustands. (R. Dolata, FB 2.4, [ralf.dolata@ptb.de](mailto:ralf.dolata@ptb.de))

#### Vereinfachter Messaufbau für das pulsgetriebene Josephson-AC-Spannungsnormal

Der Einsatz eines ternären Pulsgenerators vereinfacht den experimentellen Aufbau und den Betrieb eines pulsgetriebenen Josephson-AC-Spannungsnormal deutlich und verbessert außerdem die zeitliche Stabilität des Systems. Durch den großen Code-Speicher des benutzten Gerätes konnten erstmals AC-Signale mit geringen Frequenzen von nur 156 Hz erzeugt werden. (O. Kieler, FB 2.4, [oliver.kieler@ptb.de](mailto:oliver.kieler@ptb.de))

#### Größere und verbesserte AC-Spannungen durch modifizierte pulsgetriebene Josephson-Schaltungen

Um die Ausgangsspannung für den „Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer“ (JAWS) zu erhöhen, wurden ausgedehnte Josephson-Schaltungen mit einer größeren Zahl von Josephson-Kontakten entwickelt und eingesetzt. Außerdem wurden verbesserte Filter eingesetzt, wodurch Wellenformen mit einer Oberwellenunterdrückung bis zu -121 dBc bei erhöhten Spannungswerten erzeugt werden konnten. (O. Kieler, FB 2.4, [oliver.kieler@ptb.de](mailto:oliver.kieler@ptb.de))

### **Supraleitendes Qubit auf der Basis eines Josephson-Oszillators mit starker Anharmonizität**

Ein Hochfrequenz-SQUID mit identischen Werten der geometrischen Induktivität sowie der Josephson-Induktivität kann als Qubit mit starker Anharmonizität betrieben werden. Diese Art von Josephson-Qubit sollte weitgehend immun sein gegen externe Störungen, die zur Dekohärenz beitragen. Darüber hinaus ist ein dispersives Auslesen des Quantenzustandes möglich. (A. Zorin, FB 2.4, alexander.zorin@ptb.de)

### **Graphen kontrolliert wachsen lassen**

Weltweit wird intensiv nach einem kostengünstigen, gut kontrollierbaren Massenproduktionsverfahren für Graphen gesucht. Eine mögliche Methode, großflächig Graphen zu erzeugen, ist die Epitaxie, das kontrollierte Wachstum von Graphen im Vakuum. Erste Ergebnisse einer Forschungs Kooperation zwischen der Leibniz Universität Hannover und der PTB versprechen nun eine bessere Kontrolle des Wachstums einzelner Graphenschichten. (H. W. Schumacher, FB 2.5, hans.w.schumacher@ptb.de)

### **Spinpolarisierte Elektronen auf Bestellung**

Mit einer Einzelelektronenpumpe liefern PTB-Forscher „abgezählte“ Elektronen mit gewünschtem Spin. (B. Kästner, FB 2.5, bernd.kaestner@ptb.de)

### **Kohärente Kontrolle von ultrakurzen Strompulsen: Von Gleichstrom zu Wechselstrom**

Die Form optisch erzeugter ultrakurzer Strompulse in Halbleitern lässt sich bei Anregung mit zwei Laserpulsen gezielt einstellen. Durch Variation des Zeitabstandes der Laserpulse und durch eine den Pulsen aufgeprägte Frequenzvariation kann die Form der erzeugten Strompulse über einen großen Bereich von Gleich- bis hin zu Wechselstrompulsen variiert werden. Damit können auch die Eigenschaften der von den Strompulsen erzeugten Terahertz-Strahlung kontrolliert werden. (A. M. Racu, FB 2.5, ana.m.racu@ptb.de)

### **Symmetrieuntersuchungen an Halbleiterstrukturen mittels THz-Spektroskopie**

In der PTB wurde eine nichtinvasive Methode entwickelt, die Symmetrieuntersuchungen an Halbleiterstrukturen ermöglicht. Mit einem Femtosekundenlaser wird durch optische Anregung ein ultrakurzer Stromimpuls in einem Halbleiter induziert, der daraufhin elektromagnetische Strahlung im Terahertz-Frequenzbereich aussendet. Eine Analyse der Terahertz-Strahlung ermöglicht Rückschlüsse auf die Symmetrie des Halbleitermaterials. Die neuentwickelte Methode ist so empfindlich, dass sogar bei nominell symmetrischen GaAs-Quantenfilmen eine Asymmetrie nachgewiesen werden konnte. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

### **Bessere Einzelelektronenpumpen im Magnetfeld**

Mit dem Ziel, ein Quantenstromnormal zu entwickeln, werden in der PTB sogenannte Einzelelektronenpumpen untersucht, die pro Arbeitstakt ein einzelnes Elektron transportieren. Ausschlaggebend für deren Eignung ist dabei die Zuverlässigkeit, mit der wirklich *genau ein* Elektron pro Arbeitstakt geliefert wird. Durch Anlegen eines Magnetfeldes konnte diese Zuverlässigkeit – und damit die Unsicherheit der erzeugten Stromstärke – um mehr als den Faktor 100 verbessert werden. (C. Leicht, FB 2.5, christoph.leicht@ptb.de)

### **Rückführbare Messung des magnetischen Moments einzelner magnetischer Nanopartikel**

In der PTB wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem das magnetische Moment einzelner Nanopartikel quantitativ und rückführbar mit Hilfe eines Magnetkraftmikroskops gemessen werden kann. (S. Sievers, FB 2.5, sibylle.sievers@ptb.de)

### **Graphen und Galliumarsenid: Zwei perfekte Partner finden sich**

Die PTB hat erstmals Graphen auf Galliumarsenid sichtbar gemacht – damit ist die Kombination zweier einzigartiger Elektronikmaterialien gelungen. (F. J. Ahlers, FB 2.6, franz-josef.ahlers@ptb.de)

**Neuentwickelte Kryo-Stromkomparator-Messbrücke für Widerstandskalibrierungen**

Eine verbesserte Kryo-Stromkomparator-Messbrücke für Widerstandskalibrierungen wurde in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich 7.5 entwickelt. Der neue kompakte Aufbau zeichnet sich durch eine deutlich erhöhte Messgeschwindigkeit und Betriebsstabilität sowie durch eine einfachere, computergesteuerte Bedienung aus. (M. Götz, FB 2.6, martin.goetz@ptb.de)

**Der AC-Quanten-Hall-Widerstand als Quantenstandard der Kapazität**

Die Einheit der Kapazität, das Farad, kann jetzt durch den Quanten-Hall-Effekt genauer reproduziert werden als mit dem besten konventionellen Normal. Dies wurde möglich durch eine optimierte Wechselstrombrücke, in die zwei Quanten-Hall-Bauelemente in spezieller Anordnung integriert wurden. Dadurch kann auf Hilfsmessungen zur Korrektur einer Frequenzabhängigkeit verzichtet werden, und die Unsicherheit einer Kapazitätsbestimmung ist geringer als mit jedem anderen Normal. (J. Schurr, FB 2.6, juergen.schurr@ptb.de)

**Untersuchung des Mikrowellenverhaltens von Schaltungen für ein pulsgetriebenes Josephson-Normal für Wechselspannungen**

Die Funktion von pulsgetriebenen Josephson-Schaltungen für Wechselspannungen wird maßgeblich von ihrem Mikrowellenverhalten bestimmt. Messungen von Strom-Spannungskennlinien als Funktion der Mikrowellenfrequenz liefern nun Hinweise, warum bei einigen Schaltungen nur eine mangelhafte Oberwellenunterdrückung zu beobachten ist. (D. Schleußner, FB 2.6, detlef.schleussner@ptb.de)

**Neues Messverfahren für die Kalibrierung planarer Vielfach-Thermokonverter mit binären Josephson-Wellenformen**

Im Rahmen des von der EU geförderten Forschungsprojekts „JOSY“ und in Kooperation mit dem National Metrology Institute Australia (NMIA) wurde die Entwicklung eines neuen Verfahrens für die Kalibrierung von Thermokonvertern gestartet. Erste Messungen bei Frequenzen bis 100 Hz haben bereits vielversprechende Ergebnisse geliefert. (L. Palafox, FB 2.6, luis.palafox@ptb.de)

**Metrologie für die Wirtschaft****Schließung der Lücke bei der Kalibrierung von Gleichstromstärken**

Die Kalibrierung kleiner Gleichstromstärken zwischen 100 pA und 1  $\mu$ A konnte bisher nicht mit internationaler Anerkennung (CMC-Verweis) durchgeführt werden. Jetzt wurde ein Messplatz eingerichtet, mit dem diese Lücke im Leistungsangebot geschlossen wird. (B. Schumacher, FB 2.1, bernd.schumacher@ptb.de)

**Kalibrieren von Stromwandlern wird einfacher**

Die PTB berät in Fragen Elektrizitätszähler und stellt die Self-Service-Stromwandler-Kalibrierung auf der ZMP 2009 in Nürnberg vor. (E. Mohns, FB 2.3, enrico.mohns@ptb.de)

**Verbesserung der magnetischen Eigenschaften von  $\alpha$ -Fe/Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B-Nanokompositen durch Dotierung mit Titan**

Magnetische Materialien mit sehr hohem Energieprodukt und sehr hoher Koerzitivfeldstärke spielen bei der Entwicklung von Generatoren und Motoren eine Schlüsselrolle. In Zusammenarbeit des Fachbereichs 2.5 mit der China Jiliang Universität Zheijang wurden neue Legierungen auf Neodym-Eisen-Bor-Basis mit erhöhtem Energieprodukt und Koerzitivfeldstärke entwickelt und untersucht. (M. Albrecht, FB 2.5, martin.albrecht@ptb.de)

**Metrologie für die Gesellschaft****Feldexposition von Hautzellen zwischen 100 GHz und 2,52 THz in vitro**

Im Rahmen eines vom Bundesamt für Strahlenschutz geförderten Projektes werden Hautzelllinien mit Terahertz-Strahlung exponiert, um nach möglichen gentoxischen Effekten zu suchen. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

### **Ausbau einer Absorberhalle für Antennenmessungen bis 325 GHz**

Voraussetzung für die Kalibrierung von Antennen oder Feldsensoren ist eine reflexionsarme Umgebung mit vollständiger Entkopplung von der Außenwelt. Dies leistet eine geschirmte Messhalle mit Absorberauskleidung, in der weder externe Felder die Messungen stören noch selbst erzeugte Felder nach außen abgestrahlt werden. Eine entsprechende Absorberhalle wurde in der PTB in Betrieb genommen. (T. Schrader, FB 2.2, thorsten.schrader@ptb.de)

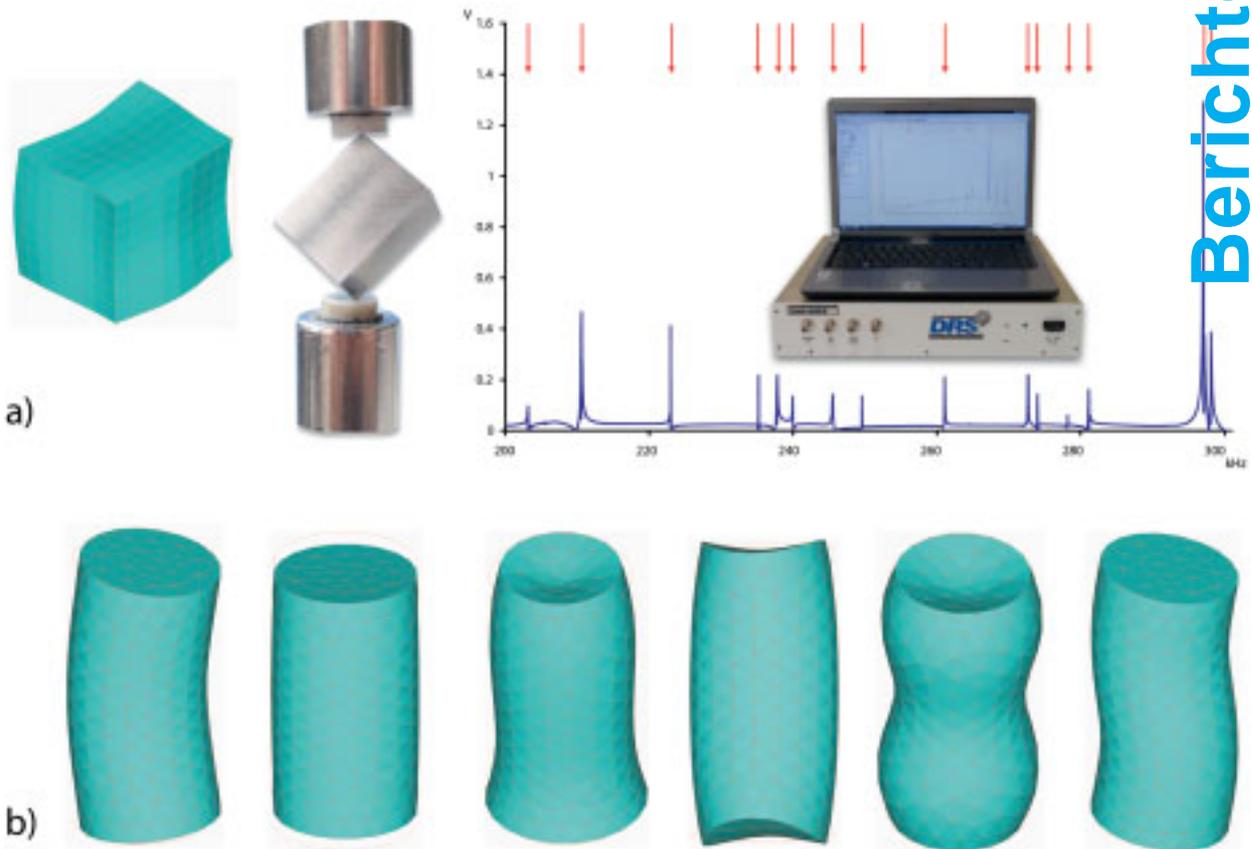
### **Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) von Messgeräten**

Im Rahmen ihrer Bauartzulassung werden insbesondere die Geräte im gesetzlichen Messwesen daraufhin geprüft, ob sie durch äußere elektromagnetische Felder gestört werden. Für Systeme, die z.B. vor Ort aus Komponenten aufgebaut werden, ist das nicht möglich, bei ihnen sind lediglich die Einzelkomponenten im Labor prüfbar. Für diesen Fall wurde in der PTB nun eine besondere Vor-Ort-EMV-Prüfeinrichtung entwickelt. Außerdem wurde speziell für Geräte im gesetzlichen Messwesen eine Elektronik entwickelt, die es erlaubt, eine äußere Einwirkung elektromagnetischer Störungen zu detektieren und somit den Missbrauch des Messgerätes zu verhindern. (T. Schrader, FB 2.2, thorsten.schrader@ptb.de)



# Chemische Physik und Explosionsschutz

Berichte der Abteilungen



# Chemische Explosions

## **Weltweit erstes international anerkanntes Primärnormal für die Messung von klinischen Proteinmarkern**

Immunchemische Detektionsverfahren haben heute den Nachweis von Biomolekülen wie Proteinen selbst in extrem kleinen Konzentrationsbereichen ermöglicht. Dies hat zur Entdeckung vieler Biomarker geführt, die als klinische Marker oft eine große Bedeutung z. B. bei der Früherkennung lebensbedrohlicher Erkrankungen haben können, Beispiele sind Troponin (Herzinfarkt) oder PSA (Prostatakrebs). Solche immunchemischen Nachweisverfahren basieren auf Reaktionen von Antigenen mit Antikörpern nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip. Problematisch ist daran, dass solche Reaktionen trotz hoher Spezifität sehr oft nicht eindeutig sind. Kreuzreaktionen mit anderen Molekülen treten auf. Dies resultiert in z. T. sehr unterschiedlichen Messergebnissen solcher Biomarker in Abhängigkeit vom Hersteller der Immunoassays und von den Analysenlaboratorien. Abweichungen um weit mehr als eine Zehnerpotenz werden beobachtet. Dies kann zu Fehldiagnosen führen, die nicht nur eine erhebliche Kostenbelastung für das Gesundheitswesen zur Folge haben, sondern auch erhebliche Gefahren und psychische Belastungen für die Patienten mit sich bringen.

Häufig sind diese klinischen Marker Makromoleküle wie Proteine, die molare Massen von mehr als  $10^7$  g/mol erreichen können und 1000-mal größer sind als „klassische“ Moleküle, für die bisher Normale zur Qualitätssicherung in der klinischen Chemie entwickelt wurden. In der PTB sind in den letzten Jahren Konzepte für Primärmessverfahren für klinische Proteinmarker auf der Basis der Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie (ID-MS) entwickelt worden. Die Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie (ID-MS) ist als wichtigstes Primärmessverfahren in der Chemie seit langem etabliert. Sie kann hochgenaue, quantitative Informationen über die Konzentration eines Analyten in seiner Matrix liefern. Ihr Einsatz wurde von vielen Seiten für die Analytik großer Moleküle aber als problematisch angesehen, da massenspektrometrische Verfahren gerade bei großen Molekülen technischen Grenzen unterliegen. Während mit der ID-MS kleine Moleküle ( $< ca. 1000$  g/mol) massenspektrometrisch identifiziert und quantifiziert werden können, ist die relative Massenauflösung für die Identifikation großer Biomoleküle bei weitem nicht ausreichend. Es sind deshalb völlig neue Ansätze notwendig, um Biomoleküle mit vergleichbarer Genauigkeit zu messen, wie es bisher in der klassischen Chemie üblich war.

Titelbild:

Bestimmung der elastischen Konstanten von Werkstoffen für Kolben-Zylinder-Druckmesssysteme mit Resonanz-Ultraschall-Spektroskopie

- Messung des Eigenfrequenzspektrums einer quaderförmigen Probe
- Schwingungsmoden einer zylindrischen Probe

# Physik und Schutz

Als erstes nationales Metrologieinstitut der Welt hat die PTB jetzt ein Referenzmessverfahren zur Messung von Proteinen in einer klinisch relevanten Matrix (Wachstumshormon in Blutserum) vorgestellt. Das in der Arbeitsgruppe *Organische Analytik* (3.12) entwickelte Verhältnis-Primärmessverfahren beruht auf der Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie und erbringt den Nachweis, dass auf diesem Weg eine Rückführung von Konzentrationsmessungen von großen Biomolekülen auf die SI-Einheiten im relevanten (extrem niedrigen) Konzentrationsbereich mit der notwendigen Genauigkeit möglich ist.

Der dabei verfolgte Lösungsansatz zur Quantifizierung komplexer Biomoleküle (Proteine) beruht auf der Quantifizierung seiner charakteristischen Proteolyseprodukte. Dabei werden die Zielmoleküle über geeignete Enzyme in kleinere Peptidbruchstücke zerlegt (z. B. durch tryptischen Verdau), die charakteristisch für das Ausgangsprotein sind und deren Anzahl in einem bekannten stöchiometrischen Verhältnis zu diesem Protein stehen (zumeist in einem 1:1-Verhältnis). Mit Hilfe der ID-MS kann die Peptidkonzentration bestimmt und daraus auf die Proteinkonzentration geschlossen werden.

Das vorgestellte Verfahren ist inzwischen als nationales Normal international anerkannt und als Messfähigkeit der PTB (CMC-Eintrag) in der Datenbank des BIPM registriert (siehe dazu auch „Nachrichten des Jahres“.)

## **Quasi-kontinuierliche Messung kleiner Massenströme von Fluiden**

Für die Bestimmung von Massenströmen werden die entsprechenden Fluidmassen und die zugehörigen Messzeiten ermittelt. Die Fluidmassen werden im allgemeinen durch Wägung des Fluidbehälters, in den das Fluid

hinein- oder aus dem es herausströmt, zu Beginn und am Ende der Messung bestimmt. Diese Vorgehensweise kann besonders bei längeren Messzeiten, wie sie bei der Bestimmung kleiner Massenströme im allgemeinen notwendig sind, zu großen Fehlern führen, da lediglich nach Stunden oder Tagen eine einzige Massendifferenz bestimmt wird. Mögliche Abweichungen von einer linearen Massenzu- oder -abnahme durch Instabilitäten des Massenstroms, evtl. mögliche Verdunstung des Fluids oder andere äußere Einflüsse werden bei dieser Messmethode nicht sichtbar. Deshalb wurde für die Herstellung von Gasgemischen mit sehr geringen Anteilen der interessierenden Komponente hier eine quasi-kontinuierliche Beobachtung der Masse- und Zeitdaten realisiert, mit der eine unkomplizierte Einschätzung der Qualität der Messung möglich ist.

An zwei verschiedenen Anwendungen wurde das Verfahren erfolgreich erprobt. Zum einen dient das Messsystem zur Herstellung von Kalibriergasen im Bereich des Immissions-schutzes. Das in Spuren beizumischende Gas strömt aus einem Behälter heraus, dessen Masse während der Messzeit mit Hilfe einer Mikrowaage kontinuierlich beobachtet wird. Anhand der fortlaufenden Darstellung der Residuen zwischen den Messwerten (Masse über Zeit) und der ständig neu ermittelten Regressionsgeraden durch die Messwerte kann relativ leicht festgestellt werden, ob der beobachtete Massenstrom (etwa 10 ng/s) und das Messsystem selbst während der Messung stabil waren.

Bei der zweiten Anwendung wird zum Aufbau eines neuen Atemalkoholnormal die gleiche Vorgehensweise auf die Messung von Flüssigkeitsmassenströmen umgesetzt. Die Flüssigkeiten Ethanol und Wasser werden mit Massenströmen zwischen 30 µg/s und

1300 µg/s bzw. zwischen 3 mg/s und 8 mg/s dosiert. Die Massenabnahmen der beiden Behälter, aus denen die Flüssigkeiten herausströmen, wird kontinuierlich gemessen und zusammen mit den Zeitdaten eine negative Steigung errechnet, woraus sich die Massenströme ergeben.

Neben dem großen Vorteil des Wissens um die Stabilität der Messung ermöglicht es dieses Verfahren außerdem, die Stabilisierungsphase des dynamischen Systems nach dem Beginn der Messung aus dem für die tatsächliche Auswertung relevanten Datenumfang herauszunehmen. Damit geht eine deutliche Verbesserung der Messunsicherheit für die jeweilige Anwendung einher, da Unsicherheitsbeiträge für die Stabilisierungsphase und für die Abweichung von der Linearität der Massenänderung entfallen.

### Online-Brennwertbestimmung von Biogas mit Mikro-Gaschromatographie

Zur Förderung der Biogaserzeugung und -nutzung hat die Bundesregierung einen Biogasanteil von 10 % in deutschen Erdgasnetzen als Ziel definiert. Die Messtechnik zur Abrechnung des Energieträgers Biogas unterliegt dabei, wie im geschäftlichen Verkehr erforderlich, dem Eichrecht. Neben der Menge (Volumen) ist der Brennwert mit zugelassenen Messgeräten zu bestimmen. Gegenwärtig gibt es jedoch keine eichfähigen Brennwertmessgeräte für Biogase. Hilfsweise werden daher Geräte, die für Erdgas entwickelt wurden, eingesetzt. Im geschäftlichen Verkehr ist

deshalb eine aufwendige und kostenintensive Grenzwertüberwachung durch eine zusätzliche Messung von Wasserstoff und Sauerstoff vorgeschrieben.

In einem durch die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) geförderten Kooperationsprojekt wurde mit den Partnern SLS Micro Technologie und UNION Instruments der Prototyp eines neuartigen Prozessmessgerätes für die Brennwertbestimmung von Biogasen mit Hilfe eines Mikro-Gaschromatographen entwickelt (siehe Bild 1).

Neben der Probenaufschaltung und der Trägergasdruckregelung ist der nur 16 cm × 9 cm große und vollständig in MEMS-Technik gefertigte Mikro-Chromatograph das Herzstück des Systems. Im Gegensatz zu anderen Gaschromatographen ist die mit Molekularsieb gepackte 55-cm-Trennsäule durch anodisches Bonding auf einem keramischen Heizelement realisiert (siehe Bild 2).

Diese Technologie ermöglicht sehr viel schnellere Temperaturveränderungen von bis zu 10 °C/s als bei herkömmlichen Gaschromatographen, sodass die Trennaufgabe mit nur einer Trennsäule gelingt. Das typischerweise störende Wasser wird durch das schnelle Aufheizen auf 300 °C am Ende jedes Messzyklus eliminiert und Kohlenstoffdioxid kann erstmalig als Peak eluiert und quantifiziert werden. Auf diese Weise gelingt die Trennung und Quantifizierung aller relevanten Komponenten des Biogases. Mit den bekannten

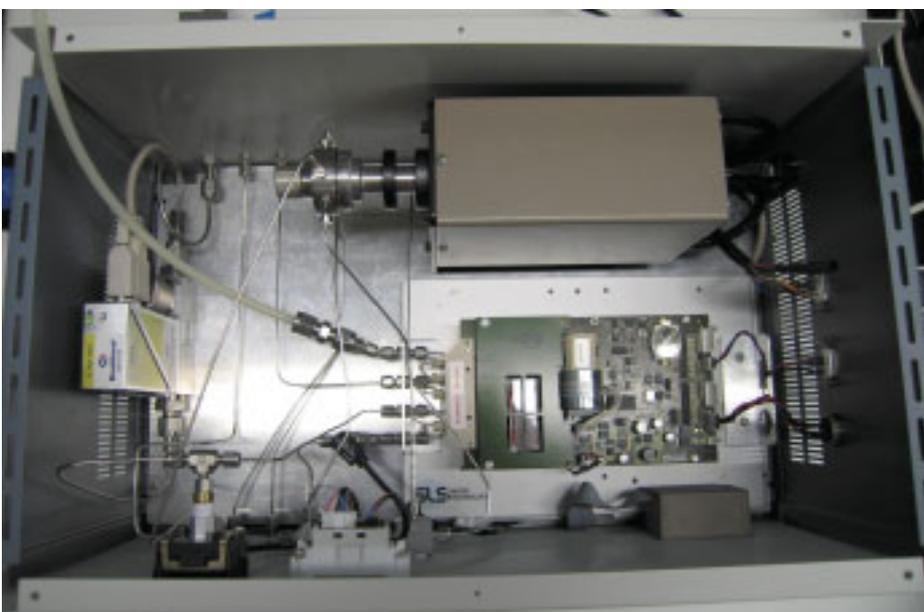


Bild 1: Laborprototyp eines Biogas-Mikro-Gaschromatographen

Bild 2: Trennsäulenchip des Mikro-Gaschromatographen für Biogas



Brennwerten der Komponenten können dann aus der Gasanalyse Gemischbrennwerte nach DIN EN ISO 6976 berechnet werden.

Gegenwärtig wird der Laborprototyp verschiedenen Dauer- und Belastungstests unterzogen, um Erfahrungen für den Feldeinsatz zu gewinnen. In einem zweiten Entwicklungsschritt wird künftig zusätzlich die gleichzeitige Analyse von Schwefelwasserstoff und Wasser angestrebt. Dazu wird derzeit eine Trennsäulenschaltung aufgebaut.

### **Internationale Zusammenarbeit bei der Metrologie für biogene Energieträger**

Die Nutzung erneuerbarer Energieträger erlangt zunehmend Bedeutung für die Reduzierung der Treibhausgasemission bei gleichzeitiger Sicherstellung der Energieversorgung. Für biogene Energieträger, insbesondere für den Einsatz als Kraftfahrzeugtreibstoff, sind international harmonisierte Normen zur Charakterisierung der Eigenschaften sowie Prüfverfahren auf der Basis rückgeführter Messungen unabdingbar. Auf einer ersten europäischen Tagung zu Fragen der Metrologie für biogene Energieträger „BioFuels Met 2008“, die von der PTB zusammen mit dem französischen nationalen Metrologieinstitut LNE organisiert wurde, diskutierten 70 Wissenschaftler aus den Bereichen Metrologie, anwendungsorientierte Forschung und Normung die Notwendigkeiten metrologischer Forschung und Entwicklung im Hinblick auf die Produktion und die Verwendung biogener Treibstoffe. Die Liste der Themen umfasste die Messung des Energiegehaltes, der chemisch-physikalischen Stoffeigenschaften, die Messung gesundheits- und prozessschädlicher Verunreinigungen, der Schadstoffemission sowie sicherheitstechnische Aspekte.

Für die Festlegung von Grenzwerten und gesetzlichen Regelungen sowie deren Überwachung sind praxiserprobte Verfahren auf der Basis rückgeführter Messungen erforderlich. Das Programm und die Beiträge dieser Tagung sind im Internet auf den Webseiten des PTB-Fachbereichs 3.3 zugänglich.

Basierend auf den Diskussionen und Ergebnissen der Tagung wurde zwischenzeitlich eine Kooperationsvereinbarung zwischen der PTB, dem französischen und dem brasilianischen nationalen Metrologieinstitut (LNE und INMETRO) zur gemeinsamen Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Metrologie an Bioenergieträgern geschlossen.

### **Entwicklung und Betrieb eines Referenzkalorimeters zur Messung des Brennwertes von Gasen**

Für Abrechnungszwecke in der Gaswirtschaft ist es essentiell, den Brennwert von Erdgasen und damit den Energiegehalt genau zu kennen. In der Regel werden gegenwärtig Brennwerte auf der Basis von Analysen der Gaszusammensetzung mittels Gaschromatographen gemäß der Norm DIN/EN/ISO 6976 berechnet. Die in dieser Norm angegebenen Brennwerte für reine Gase basieren auf Messungen, die in den 30er und 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts durchgeführt wurden und für die eine Analyse der Messunsicherheiten entsprechend den heute international akzeptierten Verfahren nicht möglich ist. Die Unsicherheiten der in ISO 6976 angegebenen Brennwerte können nur grob abgeschätzt werden. Für Methan ist ein Wert von 0,11 % festgesetzt (zweifache Standardabweichung).

Vor diesem Hintergrund wurde in der PTB parallel zum Aufbau eines neuen Normal-Gaskalorimeters im Rahmen eines Projektes gemeinsam mit einer Gruppe europäischer Gasversorgungsunternehmen (Groupe Européenne de Recherches Gazières, GERG) sowie mit dem französischen nationalen Metrologieinstitut (LNE) ein Referenz-Gaskalorimeter entwickelt. Dieses Referenz-Gaskalorimeter soll nach Projektabschluss betrieben und u. a. zur Herstellung von Kalibriergasen mit kleiner Unsicherheit des Brennwertes verwendet werden. Der prinzipielle Aufbau des Referenz-Kalorimeters ist an die 1931 von F. D. Rossini beschriebene Variante eines Verbrennungskalorimeters angelehnt. Dabei wird eine durch Wägung bestimmte Portion Gas in einem Isoperibolkalorimeter verbrannt, was zu einem Temperaturanstieg im Kalorimeter führt. Zusätzlich wird durch elektrische Kalibrierung die Wärmekapazität des Systems bestimmt. Aus den Messgrößen Masse des Brenngases, Temperaturanstieg und Wärmekapazität kann der Brennwert (Energiegehalt pro Masse) von Gasen berechnet werden.

Bei der Entwicklung des Referenzkalorimeters wurde besonders Wert darauf gelegt, verschiedene, wesentliche Versuchsführungen, die in der Literatur für ähnliche Experimente mit Verbrennungskalorimetern beschrieben sind, mit dem Referenzkalorimeter realisieren zu können. Damit wird ein für die Unsicherheitsanalyse hoher Grad an Zuverlässigkeit bei der Berücksichtigung systemati-

scher Messabweichungen erreicht. Dies ist im Hinblick auf eine erwartete internationale Neufestlegung von Brennwerten reiner Gase mit möglichst kleiner Messunsicherheit von großer Bedeutung.

Für Methan wurde mit dem neu entwickelten Referenz-Gaskalorimeter ein Brennwert von 890,578 kJ/mol gemessen, was in sehr guter Übereinstimmung mit dem in DIN/EN/ISO 6976 festgelegten Wert von 890,63 kJ/mol ist. Allerdings liegt die Streuung der Messwerte mit 0,023 % (zweifache Standardabweichung) klar unter den Werten von 0,149 % bzw. 0,092 % für die Messreihen, auf denen der gegenwärtig in DIN/EN/ISO 6976 angegebene Wert beruht. Außerdem bestätigen drei unabhängige Analysen der Messunsicherheit (PTB, BAM und LNE), dass das Ziel einer Gesamtmessunsicherheit für den Brennwert von 0,05 % erreicht wird (95 % Vertrauensintervall).

Das Referenz-Gaskalorimeter wurde zum Jahresende 2009 an die GERG-Partner übergeben.

### Druckmessung zur Neubestimmung der Boltzmann-Konstante

Um die Temperatureinheit Kelvin, die bislang durch die Temperatur des Tripelpunkts des Wassers und damit durch eine Stoffeigenschaft definiert ist, auf eine Naturkonstante zurückführen zu können, werden zurzeit in mehreren nationalen Metrologieinstituten



Bild 3: Referenz-Gaskalorimeter-Messplatz



Bild 4: Kolben-Zylinder-Systeme für Absolutdruckmessungen mit einer Unsicherheit von 1 ppm

Experimente zur Neubestimmung der Boltzmann-Konstante durchgeführt. Die in der PTB verwendete Methode basiert auf der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie, bei der die Boltzmann-Konstante aus einer gleichzeitigen Messung der dielektrischen Konstante und des Drucks eines temperierten Gases abgeleitet wird. Um die angestrebte relative Standardunsicherheit der Boltzmann-Konstante von  $2 \cdot 10^{-6}$  zu erreichen, muss der Druck des Gases im Bereich bis 7 MPa mit einer relativen Standardunsicherheit von  $1 \cdot 10^{-6}$  gemessen werden. Diese Messunsi-

cherheit, die für Druckmessungen in diesem Druckbereich bisher nicht erreicht wurde, kann entsprechend dem Ergebnis einer Machbarkeitsstudie nur durch ein Ensemble von speziellen Kolbenmanometern (siehe Bild 4) erreicht werden, wobei die wirksame Querschnittsfläche und der Druckverformungskoeffizient der Kolben-Zylinder-Systeme die wichtigsten Unsicherheitsquellen sind. Um die Wiederholbarkeit und die Ansprechempfindlichkeit der Kolbenmanometer zu verbessern und sie von äußeren Luftdruckschwankungen unabhängig zu machen,



Bild 5: Kolbenmanometer zur Druckmessung für eine Neubestimmung der Boltzmann-Konstante

wurden die Kolbenmanometer als Absolutdruckmessgeräte konzipiert und in der Kooperation mit der Firma DH Instruments, USA, entwickelt.

Die Kolbenmanometer sind mit ferngesteuerten Kolben-Rotationsantrieben und Auflagevorrichtungen für die Gewichte ausgestattet. Die geometrische Vermessung der Kolben-Zylinder-Systeme, die aus der Bestimmung der Durchmesser, der Geradheits- und der Rundheitsabweichungen der Kolben und der Zylinderbohrungen besteht, wurde in der Arbeitsgruppe *Geometrische Normale* der PTB durchgeführt. Mit Hilfe eines speziell entwickelten mathematischen Verfahrens wurden aus den gemessenen Durchmessern und den Formabweichungen 3D-Daten generiert, welche die Geometrie des Kolbens und der Zylinderbohrung und damit des freien Spaltes zwischen dem Kolben und Zylinder beschreiben.

Zur Berechnung der bei Druckmessungen wirksamen Querschnittsfläche aus den dimensionellen Daten muss die Gasströmung im Kolben-Zylinder-Spalt unter Berücksichtigung der realen Geometrie modelliert werden, um die auf den Kolben wirkenden normalen und tangentialen viskosen Kräfte zu bestimmen. Für Absolutdruckmessungen muss zudem der Übergang von viskoser Strömung zu Molekularströmung berücksichtigt werden. Mit Hilfe dieser Methoden konnten die wirksamen Querschnittsflächen mit einer relativen Standardunsicherheit von kleiner als  $8 \cdot 10^{-7}$  bestimmt werden.

Die Berechnung des Druckverformungskoeffizienten der Kolben-Zylinder-Systeme wird mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt, mit der die radialen elastischen Verformungen des Kolbens und des Zylinders entlang des Spaltes bestimmt werden, wobei die hydrodynamisch berechnete Druckverteilung im Spalt als eine der Randbedingungen gilt. Diese gekoppelte Modellierung eines strukturmechanischen und hydrodynamischen Problems stellt eine sehr anspruchsvolle Aufgabe dar. Besonders wichtig ist dabei die Kenntnis der elastischen Konstanten des Werkstoffes der Kolben-Zylinder-Systeme, die nicht aus Literaturdaten, sondern durch Messung am jeweils verwendeten Werkstoff bestimmt werden müssen. Durch Einsatz einer Resonanz-Ultraschall-Spektroskopie-Methode konnten der Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl des Werkstoffes der Kolben-Zylinder-Systeme mit einer relativen Standardunsicherheit kleiner als 0,5 % bestimmt werden.

Die ersten Druckvergleichsmessungen zwischen den unterschiedlichen Kolben-Zylinder-Systemen haben gezeigt, dass experimentelle Standardabweichungen von deutlich unterhalb  $10^{-6}$  möglich sind. Die experimentell ermittelten Verhältnisse der Querschnittsflächen stimmen innerhalb von  $1 \cdot 10^{-6}$  mit den Verhältnissen der auf den dimensionellen Daten basierten Querschnittsflächen überein.

Damit sind die Voraussetzungen für eine Gesamtmessunsicherheit von  $1 \cdot 10^{-6}$  für die Absolutdruckmessung nunmehr gegeben.

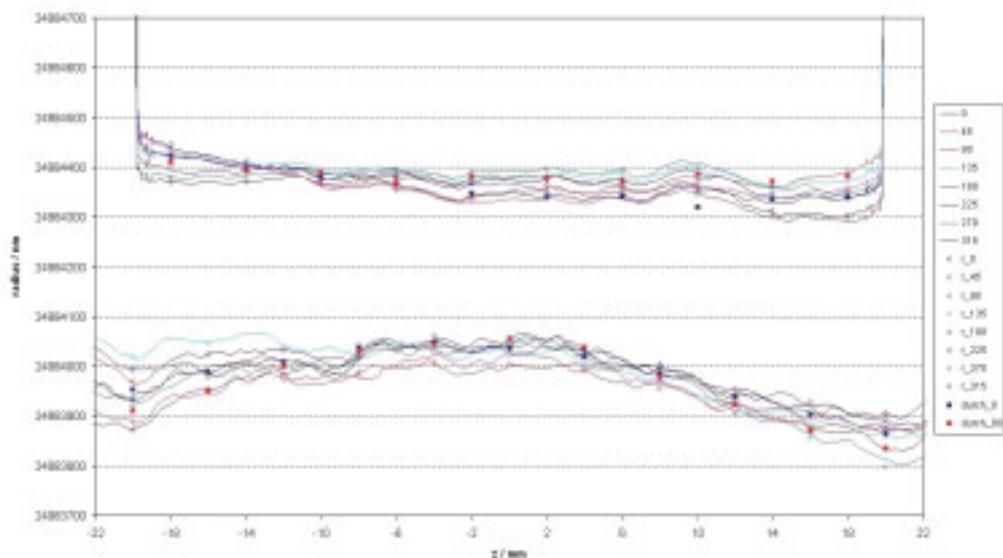


Bild 6: Geometrie des freien Spaltes zwischen Kolben und Zylinder (stark vergrößert)

# In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

## Grundlagen der Metrologie

### Messplatz für Elementspeziesanalytik eingerichtet

Ein neuer Messplatz ermöglicht den Einstieg in die Analytik von Metallproteinen. Erste Ziele: primäre Messverfahren für Selen- und Eisenproteine in Humanserum für die klinische Chemie. (D. Schiel, FB 3.1, [detlef.schiel@ptb.de](mailto:detlef.schiel@ptb.de))

### Zuverlässige Bestimmung der Ionenaktivität für diagnostische Zwecke in der klinischen Chemie

In einem gemeinsamen Projekt der drei europäischen Metrologieinstitute METAS (schweizerisches Bundesamt für Metrologie), SMU (Slovakisches Institut für Metrologie) sowie der PTB soll ein Verfahren entwickelt werden, mit dem die Ionenaktivität insbesondere für klinisch-chemische Zwecke mit geringer Unsicherheit rückgeführt auf das SI-System bestimmt werden kann. (P. Spitzer, FB 3.1, [petra.spitzer@ptb.de](mailto:petra.spitzer@ptb.de))

### Dichteunterschied von zwei Kugeln aus Isotopen-angereichertem Silicium

In der Arbeitsgruppe *Thermisches Zustandsverhalten und Dichte* der PTB wurde die Dichtedifferenz  $\Delta\rho$  von zwei 1-kg-Kugeln mit bisher unerreichter Genauigkeit gemessen:  $\Delta\rho = 2(1) \cdot 10^{-8} \rho$ . Hiermit konnte die hervorragende Homogenität des Kristalls aus hoch-Isotopen-angereichertem Silicium  $^{28}\text{Si}$  nachgewiesen werden, der für die Bestimmung der Avogadro-Konstante benutzt wird. (H. Bettin, FB 3.2, [horst.bettin@ptb.de](mailto:horst.bettin@ptb.de))

### 7-MPa-Absolutdruck-Kolbenmanometer für die Neubestimmung der Boltzmann-Konstante

Bei der Neubestimmung der Boltzmann-Konstante mit Hilfe der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie müssen Absolutdrücke in Helium bis 7 MPa mit einer relativen Standardunsicherheit von  $1 \cdot 10^{-6}$  gemessen werden. Für solche hochpräzisen Druckmessungen wurden spezielle Kolbenmanometer entwickelt. (W. Sabuga, FB 3.3, [wladimir.sabuga@ptb.de](mailto:wladimir.sabuga@ptb.de))

## Metrologie für die Wirtschaft

### Europäische Normen für Alkohol-Interlocks im Test

Erklärtes Ziel der Europäischen Kommission ist es, die Zahl der Verkehrsunfälle in Verbindung mit Alkohol zu reduzieren. Ein effektiver Ansatz dafür ist, Trunkenheitsfahrten von vorneherein zu verhindern. Dies kann über atemalkoholgesteuerte Wegfahrsperrn (Alkohol-Interlocks) erreicht werden, die bereits seit den neunziger Jahren in den USA, Kanada und Australien zum Einsatz kommen. Unter Mitwirkung der PTB wurde innerhalb der letzten Jahre eine EN-Normenreihe für Alkohol-Interlocks entwickelt (EN 50436, part 1-4: „Alcohol-interlocks – Test methods and performance requirements“). Diese Normenreihe beschreibt Anforderungen an eine für den europäischen Raum neue Anwendungstechnik. Die PTB hat im Rahmen einer Kooperation mit der Industrie ausführlich überprüft, inwieweit die normativen Vorgaben für praktische Tests realisierbar sind. Die gewonnenen Erkenntnisse sind sehr wertvoll für das Normungsgremium und fließen in künftige Revisionen ein. (R. Klüß, FB 3.2, [regina.kluess@ptb.de](mailto:regina.kluess@ptb.de))

### Dynamisch-gravimetrische Herstellung von Kalibriergasgemischen für Atemalkoholmessgeräte

Für die Kalibrierung beweissicherer Atemalkoholmessgeräte hält die PTB das nationale Normal. Die Herstellung der Kalibriergasgemische erfolgt über die Sättigung eines Luftstromes. Die Ethanolkonzentration im Gasstrom wird über Verteilungskoeffizienten berechnet, die der OIML R126 entnommen wurden. Für die Herstellung der Kalibriergasgemische wurde ein neuer Gasgenerator entwickelt und aufgebaut, der nach dem dynamisch-gravimetrischen Prinzip arbeitet. Die Massenkonzentration von Ethanol im Gasstrom kann damit fundamental auf die Masse und die Zeit zurückgeführt werden. Aus den Messergebnissen konnten neue Verteilungskoeffizienten für das Stoffsystem Luft-Ethanol-Wasser bestimmt werden. (S. Pratzler, FB 3.2, [sonja.pratzler@ptb.de](mailto:sonja.pratzler@ptb.de))

### **Referenz-Gaskalorimeter für die europäische Gaswirtschaft**

Mit Projektpartnern aus Europa wurde ein Gaskalorimeter entwickelt und der Brennwert von Methan erstmalig nach GUM mit einer Messunsicherheit von unter 0.05 % bestimmt. In Zukunft wird das Referenz-Gaskalorimeter von der E.ON Ruhrgas AG betrieben. (J. Rauch, FB 3.3, juergen.rauch@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Brennwertmessgerät für Biogas zum Einsatz im geschäftlichen Verkehr**

Mit den Projektpartnern SLS Micro Technologie und UNION Instruments wurde der Prototyp eines neuartigen Prozessmessgerätes für die Brennwertbestimmung von aufbereiteten Biogasen mit Hilfe eines Mikro-Gaschromatographen entwickelt. Im Gegensatz zu anderen Prozess-Messgeräten werden neben Methan, Kohlenstoffdioxid und Stickstoff auch Sauerstoff und erstmals Wasserstoff bestimmt. Aus der Analyse der Stoffmengenanteile wird anschließend der Brennwert berechnet. Die Projektpartner beabsichtigen, den Prototyp zu einem eichfähigen Messgerät weiterzuentwickeln. (B. Anders, FB 3.3, bert.anders@ptb.de)

#### **Neues Update der Datenbank CHEMSAFE**

Die Datenbank CHEMSAFE wurde um die sicherheitstechnischen Kenngrößen von 24 neu aufgenommenen brennbaren Flüssigkeiten erweitert. Ebenfalls im aktuellen Update enthalten sind die Daten von 21 Gemischen. (W. Möller, FB 3.4, wolfgang.moeller@ptb.de)

#### **Europäische Normung auf dem Gebiet „Kenngrößen des Explosionsschutzes“**

Die Norm „Bestimmung der Explosionspunkte von Flüssigkeiten“ wurde fertiggestellt. Die Aufgabe der Working Group 1 des CEN/Technical Committee 305, Bestimmungsverfahren für sicherheitstechnische Kenngrößen zu erarbeiten, wurde für den Bereich der Gase und Dämpfe damit erfüllt. Insgesamt stehen für diesen Bereich nun sechs europäische Normen zur Verfügung. (E. Brandes, FB 3.4, elisabeth.brandes@ptb.de)

### **Inbetriebnahme des Brennstoffzellen-Versuchsstandes**

Zur Durchführung einer Zündgefahrenbeurteilung von Polymer-elektrolytmembran-Brennstoffzellen werden Testanordnungen hinsichtlich wirksamer Zündquellen untersucht. Der Versuchstand ermöglicht Experimente während des Brennstoffzellenbetriebs. Zur Simulation von Fehlerszenarien können Wasserstoff/Luft-Gemische in Versuchsreaktoren eingeleitet werden, um beispielsweise das Temperaturverhalten bei Auftritt exothermer Gemischumsetzungen zu untersuchen. Aus den Ergebnissen der Experimente wird zur Zeit eine Datengrundlage zur Einschätzung der Zündgefahr hinsichtlich auftretender interner Brenngasübertritte geschaffen. (T. Horn, FB 3.6, thomas.horn@ptb.de)

#### **Schutzgerät für frequenzumrichter gespeiste Antriebe**

Basierend auf den Ergebnissen umfangreicher Untersuchungen erfolgte zusammen mit einem Industriepartner die Entwicklung eines Motorschutzgerätes für frequenzumrichter gespeiste Antriebe. Durch diesen Ansatz wird es möglich sein, künftig frequenzumrichter gespeiste Antriebe in explosionsgefährdeten Bereichen ohne spezielle Anforderungen an die Schutzfunktion des Frequenzumrichters und ohne zusätzliche Kaltleiterüberwachung des Motors einzusetzen. (C. Lehrmann, FB 3.7, christian.lehrmann@ptb.de)

#### **Entzündung von Wasserstoff/Luftgemischen durch Streamerentladungen**

Bei elektrischen Geräten mit kurzfristigen hochfrequenten Überspannungen infolge von Schaltvorgängen muss die Zündfähigkeit von Streamerentladungen an den spannungsführenden Teilen betrachtet werden. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen soll ein detaillierteres Verständnis des Entzündungs- und Verbrennungsprozesses erzielt werden. (T. Langer, FB 3.7, tim.langer@ptb.de)

### **Temperaturen und Funkenentstehung bei Trockenreibung zwischen metallischen Reibpartnern**

Bei Fehlfunktionen von explosionsgeschützten mechanischen Geräten kann eine reibende Berührung von sich gegeneinander bewegendenden Teilen nicht ausgeschlossen werden.

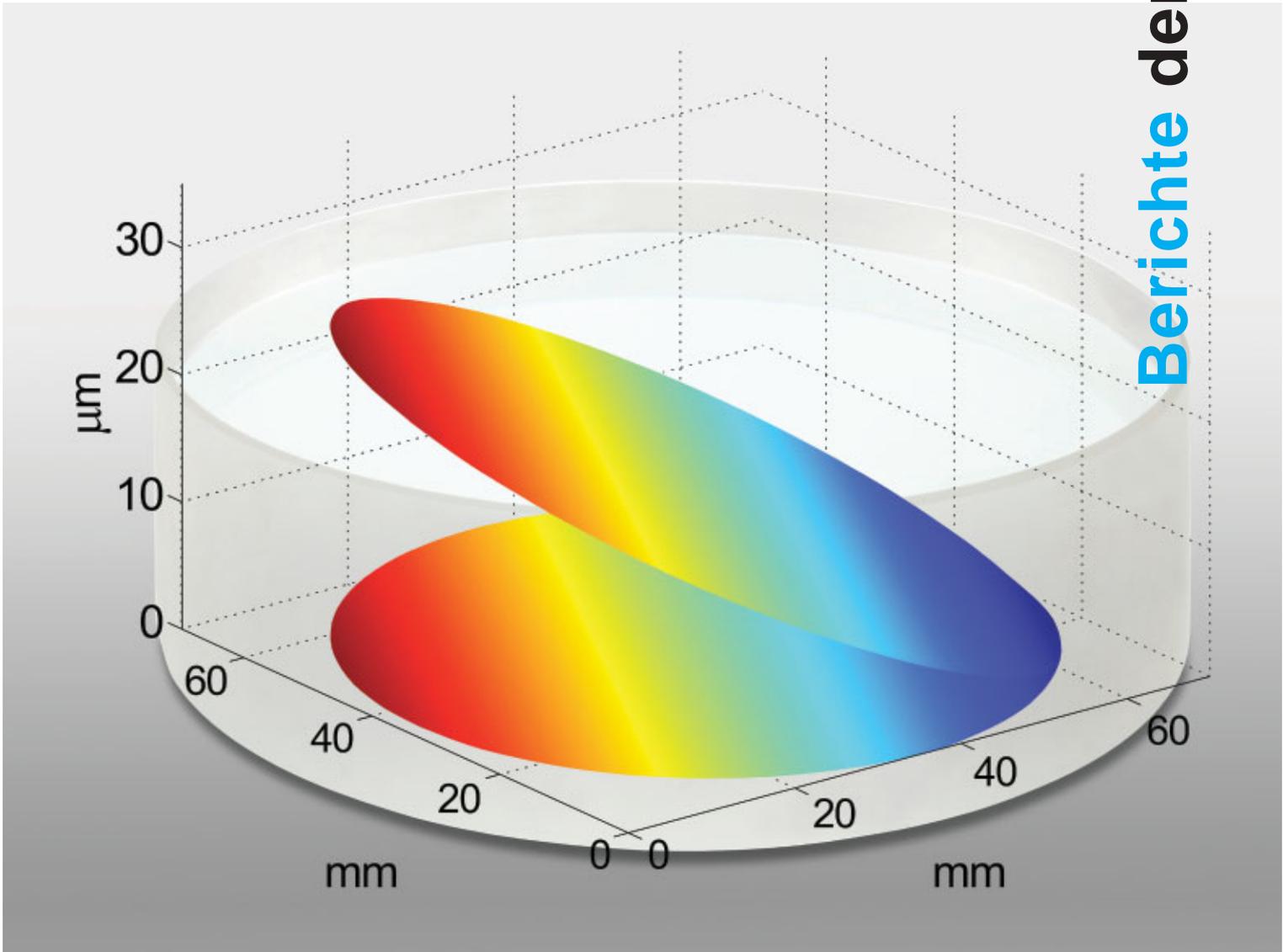
Erreicht die Kontaktzone eine hinreichend hohe Temperatur, können die abgetragenen Partikel mit dem Luftsauerstoff verbrennen. Sowohl die hohen Oberflächentemperaturen als auch die mechanischen Funken sind dabei mögliche potenzielle Zündquelle für explosionsfähige Atmosphären. (F. Welzel, FB 3.7, felix.welzel@ptb.de)

### **Nur noch Katzen besitzen ein Katzenfell**

Reibversuche mit Katzenfell gehören zu den etablierten Methoden, um die elektrostatische Aufladung von Kunststoffprodukten unter kritischsten Bedingungen zu beurteilen. Seit dem 1.1.2009 gilt in der EU ein Handelsverbot für Hunde- und Katzenfelle. Als geeignetes Ersatzmaterial für die Reibversuche erwies sich Filz aus Schafwolle. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)



# Optik



# Optik

Das Arbeits- und Forschungsfeld „Optik“ mit seinen vielfältigen Ausprägungen stellt gegenwärtig Schlüsseltechnologien für die unterschiedlichsten Bereiche in Industrie und Gesellschaft bereit. Es bietet beispielsweise maßgeblich technologische Lösungen für die großen Herausforderungen der Gegenwart in den Feldern Energie, Umwelt oder Gesundheit. Die Abteilung *Optik* der PTB mit ihren Aufgabefeldern *Länge und dimensionelle Metrologie, Radiometrie und Photometrie* und *Zeit und Frequenz* konzentriert ihre Forschungs-, Entwicklungs- und Dienstleistungsaufgaben auf die Metrologie in diesen Bereichen. Sie organisiert ihre Arbeit in den fünf Fachbereichen *Photometrie und angewandte Radiometrie, Bild- und Wellenoptik, Längeneinheit und Quantenoptik, Zeit und Frequenz* und *Optische Technologien*. Während die Abteilung *Optik* der PTB die Aufgaben bei *Zeit und Frequenz* vollständig abdeckt, werden die Aufgaben in der *Radiometrie und Photometrie* mit der Abteilung *Temperatur und Synchrotronstrahlung* gemeinsam bearbeitet, im Bereich *Länge und dimensionelle Messtechnik* mit der Abteilung *Fertigungsmesstechnik*. Daneben ist die Abteilung *Optik* der PTB am *Center for Quantum Engineering and Space-Time Research (QUEST)*, dem Exzellenzcluster an der Leibniz Universität Hannover, maßgeblich beteiligt. Im Folgenden werden wichtige Ergebnisse und besondere Entwicklungen des vergangenen Jahres aus den fünf Fachbereichen und dem *QUEST-Institut an der PTB* vorgestellt.

## Photometrie und angewandte Radiometrie

Forschungsschwerpunkte im Fachbereich *Photometrie und angewandte Radiometrie* sind gegenwärtig die Photometrie neuartiger Lichtquellen, die Spektroradiometrie von Strahlern im Spektralbereich von 200 nm bis 2500 nm und die Metrologie von Solarzellen. Daneben realisiert der Fachbereich neben der photometrischen Basiseinheit „Candela“ unterschiedliche optische Einheiten und Messgrößen der verschiedenen untereinander eng verknüpften radiometrischen und photometrischen Einheiten im Wellenlängenbereich oberhalb von 200 nm und gibt sie mit angemessen kleiner Unsicherheit weiter.

Eine der großen Herausforderungen der Metrologie in *Radiometrie und Photometrie* liegt gegenwärtig in der Entwicklung einer angepassten Messtechnik für den Ersatz klassischer Glühlampen durch energie-sparende neuartige Lichtquellen. Die sich für die PTB ergebenden Aufgaben sind dabei sehr unterschiedlich. Zum einen sind neue Messtechniken zu entwickeln, die den spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Quellen wie Leuchtdioden (LEDs), organische Leuchtdioden (OLEDs) oder Entladungslampen angepasst sind. Zum anderen muss die Entwicklung in sehr enger Abstimmung mit der nationalen und internationalen Industrie durchgeführt und von der PTB auch in der Normung begleitet werden, damit weltweit gleiches Messen garantiert wird. Insbesondere auf dem Gebiet von LEDs und OLEDs sind die Angabe der erzielten Lichtausbeute, des Alterungsverhaltens oder der Farbwiedergabe starke Argumente für den wirtschaftlichen Erfolg eines bestimmten Produkts, sodass durch genaue Angaben der photometrischen Größen Wettbewerbsverzerrungen vermieden werden können.

### Titelbild:

Interferometrisch gemessener Keilwinkel einer optischen Platte. Die Reflexe der beiden Oberflächen werden mittels wellenlängenschiebender Kavitätsanalyse aufgelöst.



Bild 1: Flächenstrahlernormal für OLEDs auf Basis eines Leuchtdioden-Panels.

Da es bisher noch keine allgemein akzeptierten OLED-Normale gab, mit denen die Industrie ihre Messsysteme zur Bestimmung des Lichtstroms oder der Leuchtdichte vergleichen konnte, wurde in der PTB ein Strahlernormal entwickelt (Bild 1). Es zeichnet sich einerseits durch eine an die OLED-Flächenstrahler angepasste große Abstrahlfläche von 26 cm x 26 cm aus. Die zur Beleuchtung eingesetzten 90 weißen Hochleistungsleuchtdioden führen im Vergleich zu OLEDs zu einer verbesserten zeitlichen Stabilität, die bei weniger als 0,2 % Abnahme der Lichtstärke pro Stunde durch Alterung eine sehr gute Wiedereinschaltreproduzierbarkeit besitzt.

Organische Leuchtdioden besitzen eine Lichtstärkeverteilung, die signifikant von der eines idealen sogenannten lambertschen Strahlers abweicht, der in der Praxis sehr häufig herangezogen wird, um die Lichtstärkeverteilung aus der Leuchtdichte in der Hauptausstrahlungsrichtung zu berechnen. Messungen des Lichtstärkeverteilungskörpers an verschiedenen OLEDs mit einem Robotergoniphotometer in der PTB haben gezeigt, dass bei diesem Verfahren Abwei-

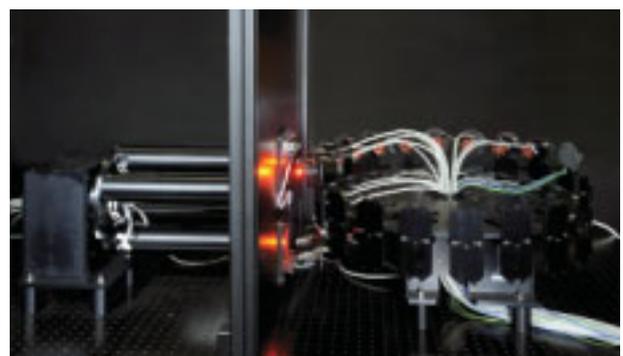
chungen bis zu 80 % auftreten können. Großflächige organische Leuchtdioden sollen zukünftig auch zur Raumbelichtung eingesetzt werden. Im Rahmen eines von der Europäischen Union geförderten Forschungsprojekts OLED100 entwickelt die PTB schnelle Messverfahren, mit denen bereits in der Produktion die Homogenität der Lichtemission bestimmt werden kann. Diese Messtechnikentwicklung wird im Interesse der deutschen und europäischen Firmen von der PTB aktiv in der Normung begleitet und bildet die Basis für Kalibrierungen, wie sie zum Beispiel für Leuchtdiodennormale bereits verfügbar ist (Bild 2).

### Bild- und Wellenoptik

Im Fachbereich *Bild- und Wellenoptik* gibt es gegenwärtig zwei große Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte. Der erste nutzt die höchstauflösende Mikroskopie zur rückführbaren Bestimmung von dimensionellen Messgrößen immer kleinerer Strukturen im Mikrometer- und Submikrometer-Bereich mit licht- und elektronenoptischen Methoden. Im zweiten werden neue Methoden und Verfahren entwickelt, um die Form optisch glatter Oberflächen und optischer Wellenfronten mit Unsicherheiten in der Größenordnung von Nanometern und Sub-Nanometern zu bestimmen.

Eine besondere Herausforderung für die quantitative Bestimmung dimensioneller Messgrößen stellen Nanopartikel dar, deren

Bild 2: Apparatur zur spektralen Alterungsbestimmung von Hochleistungsleuchtdioden bezüglich photometrischer und colorimetrischer Größen, z.B. Lichtstärke und Farbort. Links: Revolvertisch mit vier Farbmessköpfen. Rechts: Karusselltisch mit einer Kapazität von bis zu 40 Leuchtdioden.



Größe zwischen einem Nanometer und einigen hundert Nanometern liegt. Ihre technologischen, aber auch gesundheitsrelevanten Eigenschaften hängen oft in hohem Maße von ihrer Größe ab. Zur Auflösung und quantitativen Bestimmung der Strukturen ist die Wellenlänge von sichtbarem Licht im Gegensatz zur Wellenlänge der Elektronen in einem Elektronenmikroskop zu groß. Um mit dem Rasterelektronenmikroskop quantitative Messungen durchführen zu können, muss der Prozess der Bildentstehung im Detail verstanden werden, wozu insbesondere die Wechselwirkung der Elektronen mit den Nanopartikeln zu berücksichtigen ist. In der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* der PTB wurde dazu ein Simulationsprogramm entwickelt, bei dem die Größe der Nanopartikel aus einem Vergleich der gemessenen rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in Durchstrahlung und der Simulation abgeleitet werden kann (Bild 3). Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts *Traceable Characterization of Nanoparticles* wurden jetzt Nanopartikel aus Gold, Latex und Silica mit Größen zwischen 15 und 160 nm vermessen. Im Ergebnis können mit diesem Verfahren Nanopartikel der wichtigsten Materialklassen mit Durchmessern ab etwa 10 nm quantitativ vermessen werden, wobei das Verfahren gegenüber Größenänderungen von weniger als 1 nm empfindlich ist.

Für anspruchsvollste Anwendungen von Laserspiegeln in Höchstleistungslasersystemen, Optiken an Synchrotronstrahlungsquellen oder Röntgenlasern ist heute bereits eine Messunsicherheit von deutlich unter einem Nanometer auch für ausgedehnte Spiegel erforderlich. Zur Rückführung der hochgenauen Messung der Ebenheit von optischen Planflächen wurde ein Ebenheitsreferenzsystem konzipiert, welches das in der PTB entwickelte „Extended Shear Angle Difference“-Verfahren (ESAD) nutzt, das auf der geradlinigen Lichtausbreitung beruht. Prüflinge mit einer Größe von bis zu einem Meter und einer Masse bis zu 120 kg können die angestrebte Messunsicherheit von 0,1 nm nur dann gewährleisten, wenn sie in der Stellung kalibriert werden, in der sie auch später eingesetzt werden.

Daher wird die neue Messeinrichtung für liegende und stehende Prüflinge (Bild 4) separat realisiert. Um das Konzept und die erreichbare Unsicherheit zu überprüfen, wurde mit der PTB Arbeitsgruppe *Datenanalyse und Messunsicherheit* zuerst ein realistisches Modell der Messeinrichtung aufgestellt, das die Fehlermöglichkeiten bei der Messung durch Fehler der mechanischen Führungen, Temperatureinflüsse und die anderen relevanten Parameter einschließt. Die Ergebnisse zeigten, dass eine Messunsicherheit von unter einem Nanometer erreichbar sein wird, sodass das Messsystem gegenwärtig realisiert wird.

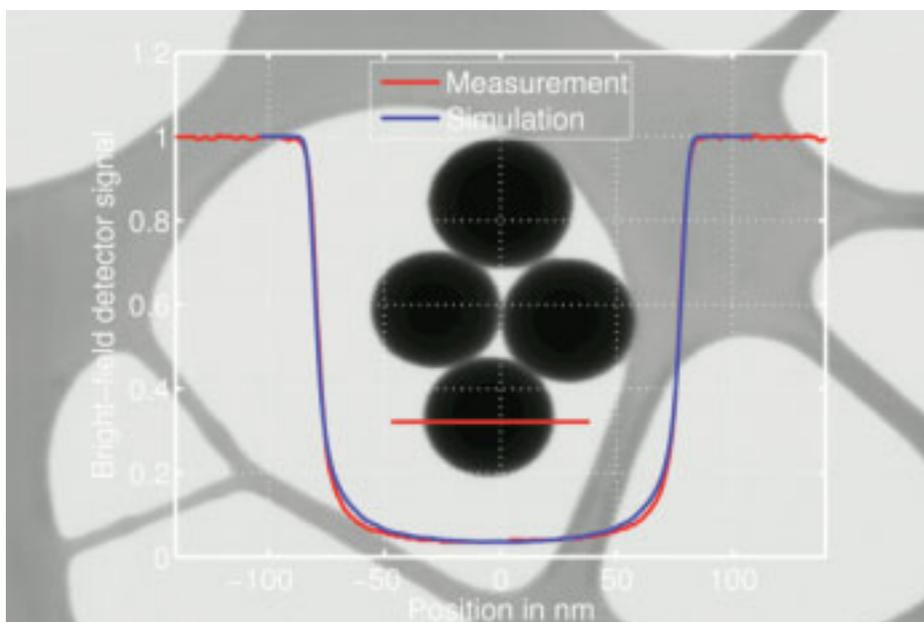


Bild 3: Hellfeldaufnahme von 160 nm großen Silica-Partikeln auf Kohle-Loch-Film. Der rote Strich markiert die Stelle, an der das gezeigte Signalprofil (Messung: rote Kurve; Simulation: blaue Kurve) gemessen wurde.

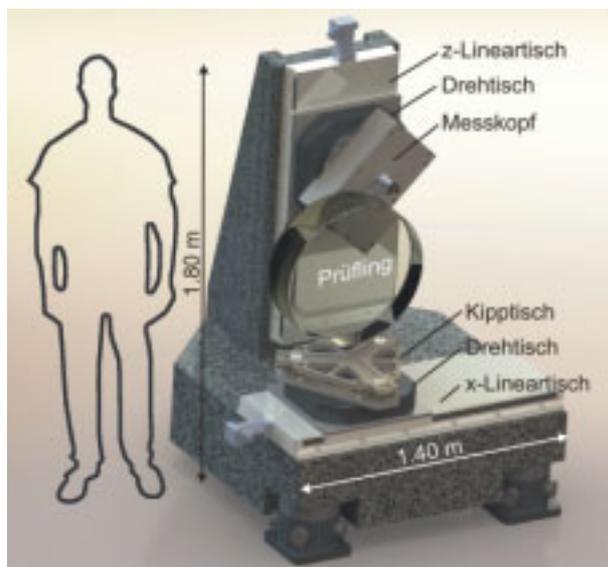


Bild 4: Konzept einer neuen Einrichtung zur Messung der Ebenheit von senkrecht stehenden großflächigen Normalen.

## Quantenoptik und Längeneinheit

Primäre Aufgabe des Fachbereichs *Quantenoptik und Längeneinheit* ist die Realisierung und Weitergabe der Längeneinheit „Meter“, die über die Naturkonstante der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum direkt aus der Definition der Sekunde dargestellt wird. Der Fachbereich entwickelt und nutzt dazu quanten- und röntgenoptische Verfahren und arbeitet dabei eng mit dem Fachbereich *Zeit und Frequenz* der PTB und dem QUEST-Institut in der PTB zusammen.

Gegenwärtige Schwerpunkte im Fachbereich *Quantenoptik und Längeneinheit* betreffen die Entwicklung einer optischen Atomuhr mit Neutralatomen (auch in einer transportablen Version), die Weitergabe von optischen Frequenzen über kommerzielle optische Datenetze sowie die Koordinierung des internationalen Avogadroprojekts.

In diesem Projekt (s. Jahresbericht 2008) wurde auf den Siliciumkugeln, die zur Neubestimmung der Avogadrokonstante dienen, am METAS (Schweiz) eine Kontamination durch die Metalle Nickel und Kupfer gefunden. In der PTB wurden Untersuchungen durchgeführt, die zeigen, wie diese Kontaminationen vermieden und die Metalle schonend von der Siliciumoberfläche entfernt werden können.

Optische Atomuhren sind Uhren, bei denen ein optischer Übergang mit möglichst kleiner Linienbreite in Atomen, Ionen oder Molekülen durch Laserstrahlung angeregt wird. Die gegenüber Caesiumatomuhren, die mit Mikrowellenanregung arbeiten, um etwa fünf Größenordnungen höhere Frequenz der anregenden Strahlung in den optischen Atomuhren erlaubt prinzipiell eine kleinere Unsicherheit und eine höhere Stabilität. Gegenwärtig gibt es verschiedene Konzepte für optische Atomuhren, die alle ihre Vorteile für verschiedene Anwendungen haben. Das Konzept der Einzelionenuhr, bei der ein einzelnes Ion durch ein elektrisches Wechselfeld im Zentrum einer sogenannten Ionenfalle gehalten wird, erlaubt den Bau sehr kompakter Uhren. Eine optische Gitteruhr, in der bis zu einer Million neutrale Strontiumatome in einem Lichtgitter gespeichert werden, hat den Vorteil einer prinzipiell wesentlich höheren Frequenzstabilität. Der Einfluss der Stöße der Strontium-88-Atome in dieser Uhr konnte im vergangenen Jahr aufgeklärt werden, sodass jetzt auf dieser Basis auch eine transportable Uhr entwickelt werden kann. Eine andere hinsichtlich ihrer Genauigkeit gegenwärtig äußerst vielversprechende optische Uhr nutzt Methoden der Quantenlogik mit wenigen Ionen und wird im QUEST-Institut an der PTB aufgebaut.

Alle diese Uhren benötigen zukünftig Laser, die bei einer optischen Frequenz von fast einem Petahertz eine Linienbreite von deutlich weniger als einem Hertz besitzen, entsprechend einer relativen Linienbreite von unterhalb  $10^{-15}$ . Das Unterschreiten dieser Grenze stellt eine Herausforderung dar, da in diesem Bereich die thermischen Anregungen in den optischen Resonatoren, die zur Stabilisierung der Uhrenlaser benutzt werden, deren Stabilität begrenzen. In diesem Bereich ist jetzt ein Durchbruch gelungen, bei dem mit einer zum Patent angemeldeten Methode eine Kombination verschiedener Materialien verwendet werden kann, die ein verringertes thermisches Rauschen bei Raumtemperatur aufweisen.

Die Erfahrungen und technologischen Fortschritte, die bei der Entwicklung der optischen Uhren erreicht werden, gewinnen immer stärkere Bedeutung weit über den

engeren Bereich von Zeit und Frequenz hinaus. Ein Beispiel dafür stellt die weltweit erste Erzeugung eines Bose-Einstein-Kondensats mit Erdalkalielelementen in der PTB dar, dessen Realisierung nur durch die am früheren optischen Frequenznormal mit Calciumatomen der PTB gewonnenen Erkenntnisse ermöglicht wurde. Weitergehend bieten die begonnenen Grundlagenuntersuchungen an diesem Bose-Einstein-Kondensat wieder Möglichkeiten für ganz neue Anwendungen in der Präzisionsmetrologie.

Bei der Weitergabe höchstgenauer optischer Frequenzen über das Glasfasernetz der Telekommunikation (s. Jahresbericht der PTB 2008) wurden im vergangenen Jahr zwei bedeutende Durchbrüche erzielt: Ein ultrastabiler Laser an der Leibniz Universität Hannover, der auf einen schmalen optischen Übergang in Magnesium stabilisiert wird und damit das Potential für eine optische Uhr hat, wurde über eine Faserstrecke mit Hilfe der optischen Uhren in der PTB charakterisiert. Damit ist die prinzipielle Eignung auch für routinemäßige Kalibrierungen auf höchstem Niveau gezeigt. Gegenwärtig wird eine solche optische Verbindung auch zwischen dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching und der PTB eingerichtet, bei der allerdings das optische Signal mehrfach so verstärkt werden muss, dass die Information über die optische Phase erhalten bleibt. Dies konnte erstmals gemeinsam mit Forschern aus dem MPQ auf einer längeren Teilstrecke der 900 km langen Verbindung gezeigt werden.

## Zeit und Frequenz

Die Hauptaufgaben des Fachbereichs *Zeit und Frequenz* sind die Realisierung und Weitergabe der Einheit der Zeit, der Sekunde, sowie die Verbreitung der gesetzlichen Zeit in der Bundesrepublik Deutschland. Dazu entwickelt die PTB ihre Uhren und Methoden der Zeitverteilung kontinuierlich weiter und trägt damit maßgeblich zur koordinierten Weltzeitskala (UTC) bei. Im vergangenen Jahr wurden sowohl bei den primären Uhren als auch bei der Weitergabe wesentliche Fortschritte erzielt:

Erstmals trug die neue Caesium-Fontänenuhr CSF2 der PTB (s. Jahresbericht 2008) als primäre Uhr zur Steuerung von UTC bei, nachdem ihre Unsicherheit evaluiert worden war. Mit ihren jetzt vier primären Uhren bei weltweit nur etwa einem Dutzend in dieser Form beitragenden Uhren kommt der PTB dabei ein sehr großes Gewicht zu. Parallel dazu werden die Fontänenuhren der PTB kontinuierlich weiterentwickelt. Um die extrem gute Langzeitstabilität der Caesiumfontänenuhren (hypothetisch ginge CSF2 in 40 Millionen Jahren höchstens um eine Sekunde falsch) auch bei kurzen Zeiten von Minuten bis zu Stunden besser auszunutzen zu können, werden weniger genaue, aber kurzzeitstabilere „Schwungräder“ wie z. B. Wasserstoffmaser (Bild 5) mit ihrer Frequenz für längere Zeiten an die der primären Uhren angekoppelt.



Bild 5: Blick auf die Wasserstoffmaser und kommerziellen Caesiumatomuhren der PTB in einem neuen Raum mit verbesserten Umgebungsbedingungen.

Als Ergebnis der Forschung an optischen Atomuhren ist die Frequenzstabilität von Lasern jetzt so gut, dass diese in Verbindung mit der optischen Frequenzkammtechnologie auch als „Schwungräder“ für die Caesiumatomuhren genutzt werden können. In der PTB wurde gezeigt, dass ein solches optisch stabilisiertes Mikrowellensignal die Frequenzstabilität der Caesiumfontänenuhren bis zur sogenannten Quantenrauschgrenze verbessern kann, die durch die Anzahl der abgefragten Atome in der Uhr gegeben ist. Mit dieser jetzt erreichbaren Frequenzstabilität der primären Uhren ist die Voraussetzung geschaffen, deren Genauigkeit weiter zu verbessern.

Der Beginn der Aussendung von Zeitsignalen über den Langwellensender DCF77 in Mainflingen jährte sich am 1. Januar 2009 zum fünfzigsten Mal, was mit einem Kolloquium in der PTB begangen wurde. Die Zeitverbreitung über DCF 77 ist eine Erfolgsgeschichte: Zeitdienstsysteme bei der Bahn, im Bereich der Telekommunikation und der Informationstechnologie, bei Rundfunk- und Fernsehanstalten werden ebenso von DCF77 gesteuert wie Tarifschaltuhren bei Energieversorgungsunternehmen und Uhren in Ampelanlagen. Die häufigsten Nutzer sind allerdings Privatpersonen. Da die für die Zeitsignale verwendete Langwelle auch in geschlossenen Gebäuden genutzt werden kann, werden sich auch in Zukunft die Zeitüber-

tragung über Satelliten (GPS, Galileo) und DCF 77 gegenseitig ergänzen. Der Aufbau des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo wird von der PTB in allen Bereichen, in denen dafür die genaue Zeit erforderlich ist, unterstützt. So wurden im Jahr 2009 für die sogenannte Precise Timing Facility – eine Kombination von Atomuhren im Bodensegment von Galileo – von der PTB beigesteuerten Systeme fertiggestellt und abgenommen (Bild 6).

### Optische Technologien

Der Fachbereich *Optische Technologien* forscht, entwickelt und kalibriert auf den Gebieten der Messtechnik zur Reflexion und Transmission makroskopischer und mikroskopischer Materialien und der Laserradiometrie. Spezielle Forschungsgebiete betreffen die Charakterisierung von photonischen und nicht-linearen Elementen sowie Einzelphotonenquellen und die chemisch-medizinische Bildgebung.

Durch den breiten Einsatz von neuartigen Beschichtungen wie Effektlackierungen, bei denen die Farbe des reflektierten Lichtes vom Winkel abhängt, unter dem die Oberfläche betrachtet wird (Bild 7), ergeben sich neue Herausforderungen für die Messtechnik der optischen Reflexion. Die PTB baut dafür den Schwerpunkt der optischen „Appearance“ aus, bei dem eine quantitative Beschreibung des visuellen Eindrucks unter beliebigen Beleuchtungsbedingungen angestrebt wird.



Bild 6: Bei seinem Besuch in der PTB informierte sich Bundesminister zu Guttenberg über die Rolle der PTB beim Aufbau von Galileo.

Bild 7: Erläuterung des Exponates „Auto mit Effektlackierung“ beim Tag der offenen Tür der PTB

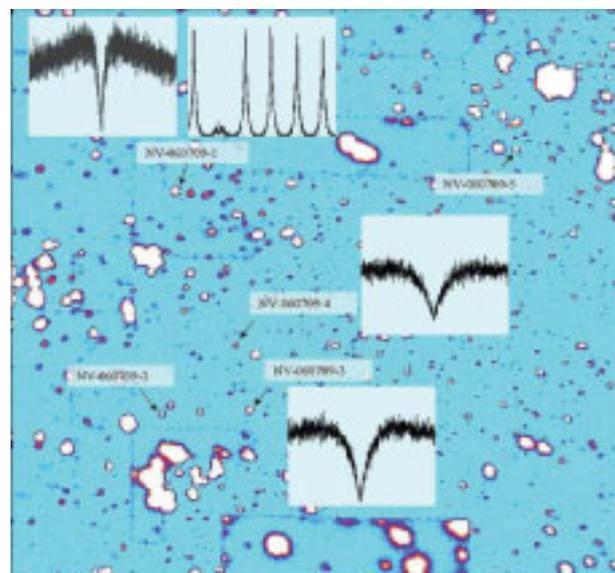


Für die quantitative Bestimmung der Reflexionseigenschaften ist in der PTB ein Strahler mit verbesserter Homogenität entwickelt worden, der weitere Anwendungen für radiometrische und photometrische Messungen besitzt.

Für die Quantenkommunikation, die Quantenkryptographie und die damit verbundene Metrologie werden effiziente, kompakte und kontrollierbare Einzelphotonenquellen benötigt. Die PTB charakterisiert und bewertet mit verschiedenen Partnern aus Universitäten und Forschungszentren in einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt EPHQUAM Einzelphotonenquellen hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit für Quantenkryptographieanwendungen. In einer Einzelphotonenquelle der Fa. Quantum Communication Victoria, die auf der laserinduzierten Emission von Stickstofffehlstellenzentren in nanokristallinem Diamant basiert, wurden die jeweiligen Zentren charakterisiert (Bild 8). Da sie auf einfache Weise wieder aufgefunden werden können und auch zeitlich hinreichend stabil sind, steht jetzt eine reproduzierbare Einzelphotonenquelle zur Verfügung. Sie wurde benutzt, um mit einer aus der optischen Nachrichtentechnik übertragenen Methode fasergekoppelte Einzelphotonendetektoren mit einer relativen Unsicherheit von 1 % zu kalibrieren.

In den *optischen Technologien* kommt der Steuerung von Licht durch Licht eine hohe Bedeutung zu, da sich auf dieser Basis ultraschnelle rein-optische Schalter herstellen lassen, die für die steigenden Bandbreiten der optischen Telekommunikation erforderlich sind. Da diese optischen Schalter möglichst verlustarm sein müssen, wurde in der PTB jetzt im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekts ein neues Messverfahren entwickelt, mit dem optische Materialien nicht nur hinsichtlich ihrer Nichtlinearität, sondern auch bezüglich

Bild 8: Diamant-Nanokristallite auf einem Siliciumsubstrat als Einzelphotonenquellen mit den jeweiligen Korrelationsfunktionen  $g^2$ , deren minimale Zählrate im Zentrum der Kurve ein Maß für die jeweilige Güte der Fehlstellenzentren darstellt.



der damit verknüpften Absorption quantitativ charakterisiert werden können.

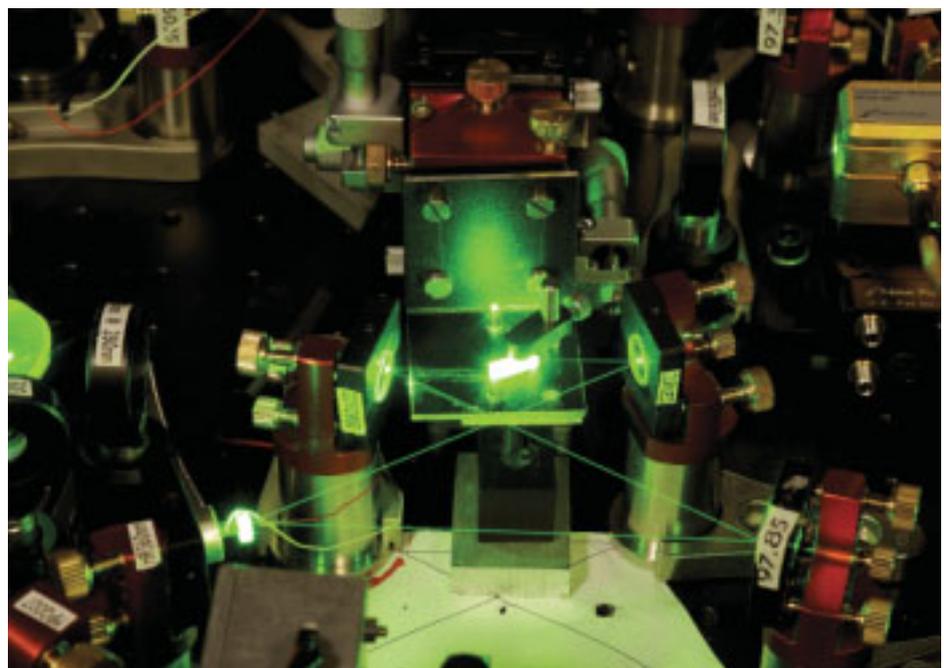
### Das QUEST-Institut an der PTB

Im Rahmen des Exzellenzclusters QUEST („Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research“) wurde das QUEST-Institut an der PTB eingerichtet. Das neue Institut wird gemeinsam unterstützt durch die Leibniz Universität im Rahmen von QUEST und durch die PTB unter dem Schirm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und kann daher auf die Ressourcen beider Institutionen zurückgreifen. Das neue Institut arbeitet eng mit den PTB-Fachbereichen *Zeit und Frequenz*, *Quantenoptik und Längeneinheit* und *Optische Technologien* zusammen. Das neue Institut wurde im Max-von-Laue-Bau auf dem Campus der PTB Braunschweig eingerichtet und nahm zu Beginn des Jahres 2009 seine Arbeit auf. Das Institut umfasst drei Forschergruppen, die durch die DFG für die Dauer von QUEST gefördert werden. Sie bestehen aus einer Professur für „Experimentelle Quantenmetrologie“, die den Kern des neuen Instituts bildet, einer unabhängigen Nachwuchsforschergruppe zu „Quantensensoren mit kalten Atomen und Ionen“ und einem Forschungsprojekt „Sub-Hertz-Laser und neuartige optische Resonatoren“. Die geplanten Hauptforschungsstränge in den drei Gruppen sollen im Folgenden vorgestellt werden.

Die Forschung der QUEST-Professur „Experimentelle Quantenmetrologie“ konzentriert sich auf neuartige Technologien für die Präzisionsspektroskopie z. B. zur Steigerung der Genauigkeit von optischen Uhren und zur Klärung grundlegender physikalischer Fragestellungen, wie der nach einer zeitlichen Änderung von Naturkonstanten. Zwei dieser neuartigen Technologien sind die direkte Frequenzkammspektroskopie und die Quantenlogikspektroskopie. Bei der direkten Frequenzkammspektroskopie wird das breitbandige, kammartige Spektrum eines optischen Frequenzkamms direkt zur Anregung der atomaren und molekularen Spektrallinien verwendet. Die Vorteile der Methode liegen in der großen spektralen Breite des Frequenzkamms von mehreren hundert Nanometern sowie in seiner absoluten Frequenzgenauigkeit durch Referenzierung auf die in der PTB realisierte Sekunde im internationalen System der Einheiten.

Die Quantenlogikspektroskopie ist eine der ersten Anwendungen von Methoden, die für den Bau von Quantencomputern entwickelt wurden. Eines der in diesem Gebiet am weitesten entwickelten Systeme basiert auf gefangenen Ionen. Mit Hilfe dieser Methoden kann ein sogenanntes Logik-Ion mit experimentell bequemen Eigenschaften genutzt werden, um ein anderes Ion mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften zu manipulieren, zu kontrollieren und abzufragen. Ein besonderer Vorteil dieser Technologie ergibt sich dabei dadurch,

Bild 9: Optischer Resonator zur Frequenzverdopplung von sichtbarem Licht ins UV mit Hilfe eines nicht-linearen Kristalls.



dass das zu untersuchende Ion keine optischen Übergänge besitzen muss, die für die Laserkühlung und den Nachweis der Anregung geeignet sind. Im Ergebnis können und sollen nun ganz neue Klassen von Atomen und Molekülen untersucht werden, die bisher spektroskopisch gar nicht oder nur schwer zugänglich waren.

Derzeit werden am Institut zwei Projekte zur Präzisionsspektroskopie an gefangenen Ionen aufgebaut. Ziel im ersten Projekt ist es, ein universelles Spektroskopieexperiment aufzubauen (Bild 9), mit dem man z. B. Metallionen mit komplizierter Niveaustuktur spektroskopieren kann, um durch einen Vergleich mit Quasar-Absorptionsspektren Informationen über eine mögliche zeitliche Änderung von fundamentalen Konstanten in der Physik zu gewinnen. Hierfür wird ein optischer Frequenzkamm zur Spektroskopie und Quantenlogik für die Kühlung des Spektroskopie-Ions und zur effizienten Detektion des Signals verwendet. In diesem Projekt konnten im vergangenen Jahr die ersten Schritte zur Quantenlogik-Manipulation demonstriert werden.

Im zweiten Projekt soll ebenfalls die Quantenlogikspektroskopie ausgenutzt werden, um eine optische Atomuhr auf der Basis eines extrem schmalen Übergangs in einem einzelnen Aluminiumion zu entwickeln mit der Aussicht, damit die weltbeste Atomuhr zu realisieren. Dazu wird es notwendig sein, die Technologien für superstabile Laser aufzunehmen, die bereits in der PTB entwickelt wurden. Dieses Projekt wurde Mitte des Jahres begonnen und befindet sich derzeit in der Planungsphase.

Die Nachwuchsforschergruppe *Quantensensoren mit kalten Atomen und Ionen* nimmt sich der Entwicklung optischer Frequenznormale basierend auf lasergekühlten Ionenkristallen und atominterferometrischen Sensoren an.

Zukünftige Frequenznormale mit einer erwarteten relativen Unsicherheit bis herunter zu  $10^{-18}$  stellen hochempfindliche Sensoren für die Bestimmung von Gravitationspotentialen und Relativbewegungen dar. Höhenunterschiede im Gravitationspotential der Erde könnten dann allein durch die Gravitations-

rotverschiebung der allgemeinen Relativitätstheorie mit einer Genauigkeit von 1 cm bestimmt werden.

Gegenwärtig verhindert bei optischen Ionenuhren die erreichte Frequenzstabilität das Ziel, die Genauigkeit optischer Uhren auf dieser Skala zu überprüfen und verbessern zu können, sowie signifikante Messungen mit der angestrebten relativen Frequenzauflösung von  $10^{-18}$  innerhalb von realistischen Zeitskalen durchführen zu können. Auf dem gegenwärtigen Stand wäre eine Messzeit von über zehn Tagen erforderlich, um das angestrebte Niveau von  $10^{-18}$  zu erreichen. Dagegen böte die gleichzeitige parallele Abfrage von vielen Ionen die Möglichkeit, ein wesentlich besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erreichen. In diesem Forschungsprojekt werden daher neue optische Frequenznormale auf der Basis von lasergekühlten und in komplexen Fallenstrukturen gespeicherten Ionenkristallen entwickelt.

Seit März 2009 wird dazu ein neues Experiment für die Präzisions-Spektroskopie von gespeicherten Ionen aufgebaut. In Zusammenarbeit mit mehreren PTB-internen Arbeitsgruppen sowie industriellen Partnern werden neue hochpräzise Fallenstrukturen auf Chip-Basis entwickelt, in denen die Dynamik der gespeicherten Ionen genauestens kontrolliert werden kann.

Im Forschungsprojekt *Sub-Hertz-Laser und neuartige optische Resonatoren*, das im Fachbereich *Quantenoptik und Längeneinheit* angesiedelt ist, wird ein verwandter Aspekt bearbeitet: Für eine weitere Verbesserung der optischen Uhren ist zusätzlich zu beachten, dass deren Kurzzeitstabilität durch die Frequenzstabilität der Laser begrenzt wird, die zur Abfrage des atomaren Übergangs – als „Pendel“ der Atomuhr – Verwendung finden. Laser mit höchstmöglicher Frequenzstabilität sind auch unverzichtbar bei der höchstauflösenden Spektroskopie, in Atominterferometern, bei fundamentalen Tests der Physik und für interferometrische Messungen in zukünftigen Raumfahrtmissionen wie dem Gravitationswelleninterferometer LISA (Laser Interferometer for Space Applications).



Bild 10: Resonator aus einkristallinen Silicium, bei dem auf den Endflächen des Abstandshalters optisch beschichtete Siliciumspiegel aufgebracht sind.

Um die beste Frequenzstabilität zu erreichen, wird die Frequenz des Lasers üblicherweise auf eine schmale Resonanzlinie eines optischen Resonators stabilisiert. Die Frequenzstabilität des an den Resonator angekoppelten Lasers wird durch die Stabilität der Resonatorlänge bestimmt. Bis vor kurzem wurden in vielen Experimenten die am meisten störenden Längenänderungen durch niederfrequente seismische und akustische Schwingungen verursacht, die den Resonator deformieren und seine Länge ändern. Dieses Problem ist in einer weltweiten Anstrengung durch verschiedene Forschergruppen – unter anderen der PTB – angegangen und gelöst worden, indem spezielle Befestigungsmethoden entwickelt wurden, die sehr unempfindlich gegenüber Vibrationen sind. Gegenwärtig ist die Frequenzstabilität der besten Laser letztendlich durch thermische Längenfluktuationen der Resonatoren begrenzt, welche durch die thermische Bewegung der Moleküle des Resonatormaterials angeregt werden. Dieses thermische Rauschen stellt ein ernsthaftes Problem für die zukünftige Entwicklung ultrastabiler Laser dar. Das Forschungsprojekt konzentriert sich daher mit hoher Priorität darauf, das thermische Rauschen zu unterdrücken, um eine Laserlinienbreite im Bereich von etwa 100 mHz zu erreichen.

Die Stärke des thermischen Rauschens hängt entscheidend vom für den Bau des Resonators verwendeten Material ab. Für dieses Projekt fiel die Wahl auf monokristallines Silicium. Dieses weist im Vergleich zu den konventionell verwendeten Gläsern eine hohe

mechanische Güte auf. Des Weiteren ist das Material bei einer Temperatur von 120 K stabil gegenüber thermischen Längenausdehnungen. Ein solcher Silicium-Resonator wurde in diesem Jahr fertig gestellt (Bild 10) und steht nun für quantitative Untersuchungen zur Verfügung.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Filterstrahler zur Charakterisierung von Array-Spektroradiometern

Durch die Kombination eines Quarz-Halogenstrahlers mit verschiedenen Spektralfiltern ist es möglich, eine schnelle Charakterisierung von Array-Spektroradiometern bezüglich ihres Fehlstrahlungsverhaltens und spektralen Bandpasses durchzuführen. Zu diesem Zweck wurde ein Filterstrahler mit bis zu acht unterschiedlichen Spektralfiltern entwickelt. Der Strahler wird für jede Filterkombination spektral kalibriert, sodass das Fehlstrahlungsverhalten von Array-Spektroradiometern direkt ermittelt werden kann. (S. Pape, FB 4.1, [sven.pape@ptb.de](mailto:sven.pape@ptb.de))

#### Erarbeitung referenzfreier Geradheitsmessverfahren

Gemeinsam mit den PTB-Arbeitsgruppen *Datenanalyse und Messunsicherheit* und *Längenteilungen* wurde mit der vom BMBF geförderten (CDuR32) Entwicklung neuer, referenzfreier Geradheitsmessverfahren für den Nanometer-Komparator der PTB begonnen. Der Einfluss hoher Ortsfrequenzen der Referenzspiegel wurde anhand von virtuellen Experimenten unter Verwendung hochauflösender Messungen von Spiegelproben untersucht. Als Ergebnis konnte gezeigt werden, dass Geradheitsmessungen mit Messunsicherheiten unterhalb von einem Nanometer zu erwarten sind. (A. Wiegmann, FB 4.2, C. Weichert, FB 5.2, M. Walzel, FB 8.4, [axel.wiegmann@ptb.de](mailto:axel.wiegmann@ptb.de))

#### Nanopartikelmessung mit der Rasterelektronenmikroskopie

Mittels eines Transmissionsdetektors in einem Rasterelektronenmikroskop wurden sowohl Hellfeld- als auch Dunkelfeldbilder von Nanopartikeln aufgenommen. Durch einen Vergleich der gemessenen Signalprofile mit simulierten Profilen lässt sich die Größe der Nanopartikel bestimmen. Es konnte gezeigt werden, dass das Verfahren sensitiv gegenüber Größenänderungen von weniger als 1 nm ist. (T. Klein, E. Buhr, FB 4.2, C.G. Frase, FB 5.2, [tobias.klein@ptb.de](mailto:tobias.klein@ptb.de))

#### Echtzeitmessungen an einem ultrastabilen Laser in Hannover über eine 73 km lange Glasfaserverbindung

Durch Übertragung einer optischen Frequenz über eine stabilisierte Faser Verbindung von 73 km Länge ist es erstmalig gelungen, einen Uhrenlaser in der PTB mit einem Laser in der Leibniz Universität in Hannover zu vergleichen. In Echtzeit wurde der Laser in Hannover charakterisiert und optimiert, sodass sich eine Obergrenze für die Instabilität von  $5 \cdot 10^{-15}$  für Messzeiten zwischen 0,1 s und 40 s ergab. (G. Grosche, FB 4.3, [gesine.grosche@ptb.de](mailto:gesine.grosche@ptb.de))

#### Eine optische Verbindung zur Übertragung hochstabiler optischer Referenzfrequenzen zwischen der PTB und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching

In Zusammenarbeit mit dem *Max-Planck-Institut für Quantenoptik* in Garching (MPQ) bei München entsteht eine über 900 km lange Glasfaserverbindung zur Übertragung hochstabiler optischer Referenzfrequenzen. Das südliche Teilstück vom MPQ bis zum Rechenzentrum der Universität Erlangen wurde kürzlich in Betrieb genommen. Erste Messungen zeigen eine relative Frequenzinstabilität von  $4,2 \cdot 10^{-14}$  bei einer Sekunde Mittelungszeit. (H. Schnatz, FB 4.3, [harald.schnatz@ptb.de](mailto:harald.schnatz@ptb.de))

#### Kompensation der effektiven Längenausdehnung eines optischen Referenzresonators

Die Frequenzstabilität von Lasern, die in optischen Atomuhren eingesetzt werden, lässt sich durch Verwendung von Referenz-Resonatoren deutlich verbessern, bei denen Quarzglas-Spiegel auf einen Abstandshalter aus Ultra-Low-Expansion (ULE)-Glas aufgebracht sind. Solche Resonatoren weisen bei Raumtemperatur jedoch einen großen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (CTE) auf. In einem zum Patent angemeldeten Verfahren wird ein zusätzlicher ULE-Ring auf die Rückseite des jeweiligen Spiegels optisch kontaktiert, wodurch sich der CTE des gesamten Resonators deutlich verkleinern lässt.

(T. Legero, FB 4.3, [thomas.legero@ptb.de](mailto:thomas.legero@ptb.de))

### Erstes Bose-Einstein-Kondensat mit Calciumatomen

In der PTB ist es 2009 weltweit zum ersten Mal gelungen, mit Calcium ein Bose-Einstein-Kondensat eines Erdalkalielements herzustellen. Bisher war das fast ausschließlich mit Alkali-Atomen möglich. Dem gegenüber bieten Erdalkali-Atome völlig neue Möglichkeiten für Präzisionsmessungen, da sie sehr schmale Übergänge im optischen Spektralbereich besitzen, die mit Lasern angeregt werden können. (S. Kraft, FB 4.3, sebastian.kraft@ptb.de)

### Einfluss der Stöße bosonischer Strontiumatome in optischen Gitteruhren

Optische Uhren erreichen eine Genauigkeit und Stabilität, die den heutigen primären Atomuhren bereits überlegen ist. Allerdings sind diese Uhren noch sehr aufwendige Laboraufbauten und noch nicht für spezielle Anwendungen, z. B. im Weltraum, geeignet. In einem Experiment in der PTB konnte nun gezeigt werden, dass auch mit einer deutlich vereinfachten optischen Gitteruhr, die mit dem bosonischen Strontiumisotop  $^{88}\text{Sr}$  betrieben wird, der Einfluss der Stöße so klein gehalten werden kann, dass eine relative Unsicherheit unter  $10^{-16}$  erreichbar ist. (Ch. Lisdat, FB 4.3, Christian.Lisdat@ptb.de)

### Metallkontamination auf Siliciumkugeln

Auf 1-kg-Siliciumkugeln, die als Dichtestandard und zur Neubestimmung der Avogadrokonstante dienen, wurde am METAS (Schweiz) eine Kontamination durch die Metalle Nickel und Kupfer mit einer Masse von ca. 75  $\mu\text{g}$  gefunden. Diese aus dem Polierprozess stammende Kontamination wurde mit der Röntgenphotoelektronenspektroskopie und Röntgenfluoreszenzanalyse untersucht. In der PTB wurden Untersuchungen durchgeführt, die zeigen, wie diese Kontaminationen vermieden und die Metalle schonend von der Siliciumoberfläche entfernt werden können. (U. Kuetgens, FB 4.3, Ulrich.Kuetgens@ptb.de)

### Ray-Tracing-Simulation zur Abschätzung des Bias der Messung im PTB-Kugelinterferometer

Für das internationale Avogadro-Projekt ist die interferometrische Bestimmung des mittleren Durchmessers von Silicium-Kugeln von entscheidender Bedeutung. Mit Hilfe von Optik-Simulationsrechnungen musste die Diskrepanz in den Angaben für den in PTB und NMIJ bestimmten mittleren Durchmesser aufgeklärt werden. Hierfür wurde zunächst eine Ray-Tracing-Simulation des in der PTB verwendeten Kugelinterferometers durchgeführt. Damit konnte gezeigt werden, dass die Formabweichungen der Referenzflächen hierbei einen Beitrag von besser als 0,3 nm bei Kugeldurchmessern von ca. 94 mm liefern. (B. Andreas, FB 4.3, birk.andreas@ptb.de)

### Diskrepanz bei Ausgleichsrechnungen aufgeklärt

Seit 1998 besteht eine Diskrepanz von  $1 \cdot 10^{-6}$  in den CODATA-Ausgleichsrechnungen zwischen dem Wert der am Einkristall aus natürlichem Silicium gemessenen Avogadrokonstante und dem von Fundamentalkonstanten abgeleiteten Wert. Dazu wurde die molare Masse  $M(\text{Si})$  für Silicium natürlicher Isotopenzusammensetzung neu bestimmt. Für die Kalibrierung der massenspektrometrischen Untersuchungen am Referenzmaterial WASO17.2 aus dem Jahre 1988 konnten 2008 erstmals neue synthetische Mischungen aus hochangereicherten Siliciumisotopen  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$  und  $^{30}\text{Si}$  hergestellt werden, die in chemisch sehr reiner kristalliner Form vorlagen. Die Neubestimmung der molaren Masse des Kristalls am Institut für Referenzmaterialien und -messungen (IRMM) ergaben einen gegenüber früheren Messungen um  $1,3 \cdot 10^{-6}$  höheren Wert für  $M(\text{Si})$ . (P. Becker, FB 4.3, peter.becker@ptb.de)

### Verbesserung einer Caesium-Fontänenuhr durch Verwendung eines optisch stabilisierten Mikrowellensignals

In einem Demonstrationsexperiment konnte gezeigt werden, dass in einer Fontänenuhr die Frequenzinstabilität signifikant reduziert werden kann, wenn das für den Betrieb der Fontäne erforderliche Mikrowellensignal mit Hilfe eines rauscharmen Lasers und eines optischen Frequenzkamms stabilisiert wird. (S. Weyers, B. Lipphardt, FB 4.4, stefan.weyers@ptb.de)

### Neue primäre Caesium-Fontänenuhr PTB-CSF2

Durch die erste vollständige Evaluierung der systematischen Unsicherheitsbeiträge der Caesium-Fontänenuhr CSF2 mit  $8 \cdot 10^{-16}$  stehen der PTB nun mit den beiden Fontänenuhren CSF1 und CSF2 zwei primäre Caesium-Uhren der neuesten Generation zur Verfügung. Erste CSF2-Messungen des Skalenmaßes Sekunde der internationalen Atomzeit TAI sind an das Bureau International des Poids et Mesures zur Steuerung der Atomzeitskala TAI übermittelt worden. (V. Gerginov, FB 4.4, vladislav.gerginov@ptb.de)

### Laseranregung des S-F-Oktupolübergangs im Yb<sup>+</sup>-Ion

Der äußerst schmalbandige elektrische Oktupolübergang vom S-Grundzustand zum ersten angeregten F-Zustand des Yb<sup>+</sup>-Ions wurde erstmals mit einem Diodenlaser spektroskopiert und hierbei eine Linienbreite im Bereich von 10 Hz beobachtet. Damit stehen mit dem für eine optische Atomuhr verwendeten Quadrupolübergang im gleichen Ion zwei äußerst schmalbandige Übergänge zur Verfügung, die u. a. zur Untersuchung einer möglichen zeitlichen Veränderung von Fundamentalkonstanten genutzt werden sollen. (E. Peik, FB 4.4, ekkehard.peik@ptb.de)

### Internationaler Vergleich zur gerichteten Transmission (CCPR-K6) abgeschlossen

Der Schlüsselvergleich CCPR-K6 bezüglich regulärer spektraler Transmission im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 1100 nm an neutralen Graufiltern mit Transmissionswerten von ca. 90 % bis 0,1 % wurde abgeschlossen. Die Übereinstimmung der Ergebnisse der beteiligten 15 Partner entspricht in vielen Bereichen den Erwartungen. Einige Filter zeigten jedoch zeitliche Variationen, die die erzielbare Unsicherheit dominierten. Deshalb soll im kommenden Vergleich (Beginn 2010) besondere Sorgfalt auf die Auswahl stabiler Kalibrierartefakte gelegt werden. Der vollständige Bericht kann unter <http://kcdb.bipm.org> eingesehen werden. (A. Schirmacher, FB 4.5, alfred.schirmacher@ptb.de)

### Internationaler Vergleich in der Laserradiometrie abgeschlossen

Ein internationaler Vergleich (EUROMET.PR-S2) der europäischen regionalen Metrologieorganisation EURAMET bezüglich der Strahlungsleistung von Hochleistungslasern wurde abgeschlossen. In diesem Vergleich, in dem die PTB als Pilotlabor agierte, wurden zwei Laserleistungsmessgeräte als Transferempfänger bei insgesamt 5 Messgrößen kalibriert und die Ergebnisse anschließend verglichen. Insgesamt 9 europäische und außereuropäische Teilnehmer waren beteiligt. Der ausführliche Bericht dieses Vergleiches und eine detaillierte Auflistung aller Ergebnisse werden in der „key-comparison database“ des BIPM hinterlegt werden. (S. Kück, FB 4.5, stefan.kueck@ptb.de)

### Homogener Strahler für radiometrische und photometrische Anwendungen

Eine Vielzahl von Anwendungen im Bereich Radiometrie und Photometrie erfordern ein gleichförmiges Beleuchtungssystem mit einem in hohem Maße lambertschen Profil der Strahldichte und Leuchtdichte. Beispiele für solche Einsatzgebiete sind die Kalibrierung von Radiometern und Photometern sowie Testeinrichtungen für elektronische Bildgebungssysteme. Als spezielle Lichtquelle für gonioreflektometrische Messungen wurde ein sogenannter homogener Kugelstrahler weiterentwickelt und bezüglich des emittierten Strahlprofils charakterisiert. Der Kugelstrahler mit einem Durchmesser von 150 mm ist mit einer internen 400-W-Quarz-Halogenlampe bestückt und liefert nun eine konstante Strahldichte im Bereich der Strahlerapertur mit mittleren Abweichungen von nur 0,2 %. (A. Höpe, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

### **Kalibrierung von Faser-gekoppelten Einzelphotonendetektoren**

Im Rahmen der Aktivitäten in den EU- und BMBF-Projekten qu-Candela und EPHQUAM wurde für die relative Kalibrierung der Quanteneffizienz von Faser-gekoppelten Einzelphotonendetektoren (sog. Silicium-Avalanche-Photodioden) eine Methode aus der optischen Nachrichtentechnik implementiert. Dazu wird die Strahlung einer Einzelphotonenquelle genutzt, die auf der Laser-induzierten Emission von Stickstoff-Fehlstellen-Zentren in nanokristallinem Diamant basiert. Die derzeit erreichten Standardmessunsicherheiten betragen ca. 1 %. (S. Kück, FB 4.5, stefan.kueck@ptb.de)

### **Licht schaltet Licht, und dies möglichst verlustarm – Vektorielle Messung optischer Nichtlinearitäten**

Mittels phasensensitiv heterodyn-detektierter Vierwellenmischung lassen sich erstmalig beide Quadraturkomponenten der schnellen optischen Nichtlinearität in photonischen Bauelementen wie rein-optischen Schaltern charakterisieren und auf bekannte Kerr-Nichtlinearitäten von Referenzmaterialien zurückführen. (A. Sherman, FB 4.5, anatoly.sherman@ptb.de)

### **Untersuchungen des Rauschverhaltens leistungsskalierbarer Faserlaser**

Das Phasenrauschverhalten leistungsskalierbarer Ytterbium-Faserlaser wurde in einer Zusammenarbeit mit dem Laser Zentrum Hannover und RP Photonics untersucht. Ein zentrales Ergebnis ist, dass durch Differenzfrequenzerzeugung resultierende THz-Frequenzkämme trotz eines – verglichen mit anderen Lasertypen – hohen Quantenrauschens hinreichend rauscharm sind, um sie in metrologischen Anwendungen einzusetzen. (E. Benkler, FB 4.5, erik.benkler@ptb.de)

## **Metrologie für die Wirtschaft**

### **Goniophotometrische Bestimmung des Lichtstromes organischer Leuchtdioden (OLEDs)**

Der Lichtstrom ist eine der wichtigsten photometrischen Größen zur Beurteilung der Effizienz moderner Lichtquellen. In der PTB wurden dafür mehrere in der Literatur dargestellte Messverfahren zur Bestimmung des Lichtstromes organischer Leuchtdioden (OLEDs) verglichen. Bei den ausführlichen Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass als einzige zuverlässige Messmethode die Goniophotometrie einzusetzen ist. (T. Gerloff, FB 4.1, thorsten.gerloff@ptb.de)

### **Bestimmung der Homogenität organischer Leuchtdioden (OLEDs)**

Es gibt eine europäische Initiative, künftig großflächige organische Leuchtdioden (OLEDs) zur Raumbelichtung einzusetzen. Eine gleichmäßige Oberflächenhelligkeit ist dafür ein wichtiges Qualitätsmerkmal für großflächige OLEDs. In der PTB wurde ein neues Messverfahren zur Beschreibung einer repräsentativen Kennzahl für die Homogenität entwickelt, welches von der Industrie bereits während des Herstellungsprozesses von OLED verwendet werden kann. (T. Gerloff, FB 4.1, thorsten.gerloff@ptb.de)

### **LED-Panel als photometrisches Flächenstrahlernormal für OLED-Lichtquellen**

Organische Leuchtdioden (OLEDs) sind moderne Lichtquellen, die auf Nanotechnologie basieren und einen Markteintritt in den nächsten drei Jahren anstreben. In der PTB wurde ein großflächiges Strahlernormal auf Basis anorganischer Hochleistungs-LEDs entwickelt. Dieses sogenannte LED-Panel kann jetzt von der Industrie für die Justierung von Messsystemen zur Bestimmung wichtiger photometrischer Größen von OLEDs eingesetzt werden. (T. Gerloff, FB 4.1, thorsten.gerloff@ptb.de)

### **Neuer Messplatz für Hochleistungs-LEDs**

Im Rahmen eines „MNPQ-Transfer“-Projektes des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie wurde eine neue Apparatur zur Alterungsbestimmung der photometrischen und colorimetrischen Größen von Hochleistungs-LEDs in Betrieb genommen. LEDs sollen im Dauertest über einen Zeitraum von zwei bis drei Jahren beobachtet werden, um ihr spektrales Alterungsverhalten zu untersuchen und damit ihre Einsatzmöglichkeit speziell für moderne medizinische Beleuchtungstechnik bewerten zu können. Darüber hinaus dient die Apparatur der Validierung existierender theoretischer Alterungsmodelle und der Selektion von LED-Transfernormalen. (M. López, FB 4.1, marco.lopez@ptb.de)

### **Planflächenmessung mit hoher lateraler Auflösung und hohem Dynamikumfang**

Konventionelle, vollflächig messende Interferometer sind in ihrer lateralen Auflösung durch den verwendeten CCD-Sensor auf etwa 1000 Messpunkte pro Prüflingsdurchmesser beschränkt. Das ursprünglich für die Asphärenmesstechnik entwickelte Traceable Multiple Sensor-Verfahren erlaubt es, Profilschnitte von Planflächen mit einer Länge von bis zu 700 mm mit einem Messpunktabstand von 20 µm zu messen. Vergleichsmessungen mit einem kalibrierten vollflächig messenden Interferometer ergaben für einen nahezu ebenen Prüfling mit 150 mm Durchmesser eine RMS-Differenz von 3,1 nm. Die laterale Auflösung konnte gegenüber der Messung mit dem Interferometer um den Faktor 15 gesteigert werden. (A. Wiegmann, FB 4.2, axel.wiegmann@ptb.de)

### **Neue Kalibriermöglichkeit für optische Keilplatten**

In der Optik werden bei bestimmten Anwendungen Keilplatten mit kleinen Winkeln zwischen den beiden ebenen Endflächen benötigt, z. B. als Referenzobjekte für die Zentrierprüfung. Die Kalibrierung dieser optischen Größe ist nun in der PTB möglich. Dazu wird ein Interferometer genutzt, das über ein Wellenlängen-schiebendes Verfahren einzelne Kavitäten in einem komplexen System optischer Flächen selektieren kann. Keilplatten mit Winkeln von Winkelsekunden bis hin zu einigen Winkelminuten können mit dem Verfahren gemessen werden. (M. Schulz, H. Reinsch, FB 4.2, michael.schulz@ptb.de)

### **Neuartiges Konzept zur Speckle-Unterdrückung für ein 193-nm-Mikroskop entwickelt und erfolgreich getestet**

Der Einsatz von Lasern als Lichtquelle für abbildende Systeme wird im allgemeinen durch die Kohärenz der Laserstrahlung beeinträchtigt, welche zu unerwünschten „Speckle“-Mustern im Bild führen kann. Für das in der PTB im Aufbau befindliche 193-nm-Mikroskop wurde ein neuartiges faserbasiertes Verfahren zur Unterdrückung von Speckle-Effekten für gepulste 193-nm-Laserstrahlung entwickelt. Durch geschickte Ausnutzung der Modendispersion in Kombination mit der begrenzten zeitlichen Kohärenz der Laserstrahlung wird die räumliche Kohärenz effizient unterdrückt. Mit Hilfe eines Testaufbaus konnten erste hochaufgelöste und specklefreie Mikroskopbilder aufgenommen werden. Die Homogenität der Beleuchtung sowohl in der Eintrittspupille als auch in der Objektebene des Mikroskops war ebenfalls sehr gut (Inhomogenität < 1,4 % rms). (Z. Li, FB 4.2, zhi.li@ptb.de)

### **Messung von diffraktiven Optiken mit dem Scatterometer für das tiefe UV**

Im Deep UV-Scatterometer wurde der Dynamikbereich bei der Messung der gebeugten bzw. gestreuten Strahlung durch ein neues Detektionssystem signifikant erhöht und eine deutlich höhere Winkelauflösung erzielt. Damit ist jetzt das Fernfeld von optisch funktionalen Oberflächen, wie z. B. diffraktiven optischen Elementen, mit einer hohen Auflösung und Dynamik messbar. Dies stellt eine wesentliche Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten des in der PTB entwickelten DUV-Scatterometers dar. Zudem können jetzt auch schwache höhere Beugungsordnungen von optischen Gittern gemessen werden, die detailliertere Informationen beispielsweise über Kantenprofile der Gitterstrukturen liefern. (M. Wurm, FB 4.2, matthias.wurm@ptb.de)

### **Farbkoordinaten von gedruckten Effektpigmenten in Multi-Reflexionsgeometrien**

In einer Kooperation mit dem Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der Technischen Universität Darmstadt wurden winkelahängige Farbkoordinaten von gedruckten Effektpigmenten für 14 verschiedene Reflexionsgeometrien bestimmt. Dabei wurden am Roboter-Gonioreflektometer der PTB auch Messungen in sogenannten Off-Axis-Reflexionsgeometrien durchgeführt. Hierbei liegen die Richtungsvektoren der einfallenden Strahlung, der reflektierten Strahlung und der Probennormale nicht in einer Ebene. Durch das allgemeine Interesse der Industrie am Erscheinungsbild von Oberflächen („visual appearance“) bekommen Reflexionsdaten in solchen Geometrien eine zunehmend starke Relevanz. Für kommerzielle Mehrwinkel-Spektralphotometer bedeutet dies, dass insbesondere die Rückführung für bestimmte Winkelpaare noch zu überprüfen ist. (A. Höpe, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

### **Bilateraler Vergleich des spektralen Strahldichtefaktors in Multigeometrie-konfigurationen**

Mit dem Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der Technischen Universität Darmstadt wurde ein bilateraler Vergleich des spektralen Strahldichtefaktors in 10 verschiedenen bidirektionalen ebenen Reflexionsgeometrien durchgeführt. Verglichen wurden die Reflexionswerte für einen Spectralon-Reflexionsstandard im Wellenlängenbereich 380 nm bis 780 nm zwischen einem kommerziellen Multiwinkel-Zweistrahlspektrophotometer und dem roboterbasierten Gonioreflektometer der PTB. Es ergaben sich Abweichungen zwischen dem PTB-Referenzgerät und dem kommerziellen Gerät im Bereich von 0,2 % bis zu 385 %. Die extreme Abweichung von 385 % ergab sich für eine Reflexionsgeometrie mit einem Einfallswinkel von 65° zur Probennormalen, bei Messung der Reflexion unter 80°. Die erzielten Ergebnisse zeigen an, dass derzeit noch erhebliche Schwierigkeiten bestehen bei der Rückführung von kommerziellen Geräten für Geometrien, die von den empfohlenen Reflexionsgeometrien 45 : 0 und 0 : 45 der internationalen Beleuchtungskommission CIE abweichen. (A. Höpe, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

## **Metrologie für die Gesellschaft**

### **Zeitübertragung**

#### **Alternative kostengünstige Kalibrierung von Zeitvergleichseinrichtungen**

In Zusammenhang mit den Zeitinstituten ROA (Spanien), METAS (Schweiz) und NIM (China) wurde die Kalibrierung von Zeitvergleichseinrichtungen mittels reisender GPS-Empfänger untersucht. Es wurde eine vergleichbare Kalibrierunsicherheit erreicht wie bisher nur mit der aufwendigeren und teureren Zweiweg-Satelliten-Zeit- und Frequenzübertragung. (T. Feldmann, FB 4.4, thorsten.feldmann@ptb.de)

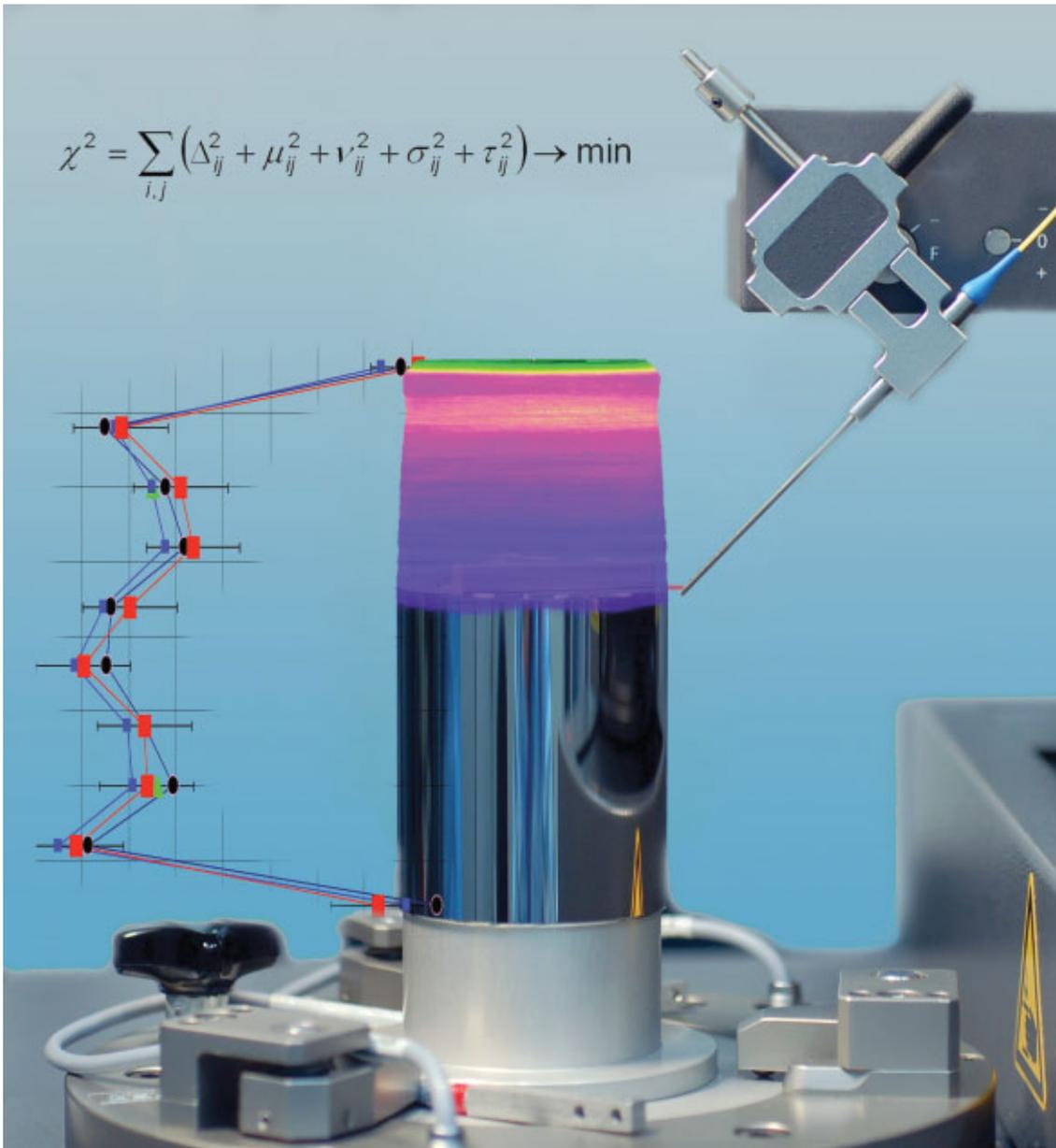
### **Internationale Angelegenheiten**

#### **Internationale Vergleichsmessungen der Gitterkonstante abgeschlossen**

Die PTB hat zusammen mit drei anderen nationalen Metrologieinstituten (METAS, NRC, ITRI) Messungen der mittleren Gitterkonstanten an eindimensionalen Gittern mit Gitterkonstanten von 700 nm bzw. 4000 nm durchgeführt. Alle Institute nutzten das Prinzip der Laserdiffraktometrie. Die Messwerte der vier Institute stimmten im Rahmen der jeweils angegebenen Messunsicherheiten überein. Die von der PTB ermittelten Messwerte wichen um nur 1 pm (700 nm Gitter) bzw. 6 pm (4000 nm Gitter) von dem internationalen Mittelwert ab. Der vollständige Endbericht ist unter der folgenden Internet-Adresse erhältlich: [http://www.bipm.org/utis/common/pdf/final\\_reports/L/S5/SIM.L-S5.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/pdf/final_reports/L/S5/SIM.L-S5.pdf) (E. Buhr, FB 4.2, egbert.buhr@ptb.de)



# Fertigungs- messtechnik



**Berichte der Abteilungen**

**Abteilung**

**5**

# Fertigungs

## Prozesse der strategischen Arbeitsplanung der Abteilung

Mit der Bezeichnung der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* ist auch deren generelle programmatische Ausrichtung zutreffend umschrieben. Die Aktivitäten der Abteilung dienen primär den Zielen, sowohl aktuelle Anforderungen an die messtechnische Rückführung dimensioneller Messgrößen in der industriellen Fertigung zu erfüllen als auch durch frühzeitige Bearbeitung grundlegender Forschungsthemen Entwicklungen rechtzeitig abschließen zu können, um den künftigen Bedarf an messtechnischen Dienstleistungen abzudecken. Für die wichtige strategische Aufgabe der Ermittlung des künftigen Bedarfes an messtechnischer Rückführung von primär, aber nicht ausschließlich, dimensionellen Messgrößen in Industrie und Wissenschaft nutzt die Abteilung verschiedene Instrumente, auf die im Folgenden eingegangen wird.

In einigen Industrie-Bereichen werden die Anforderungen an die Messtechnik auf Basis der prognostizierten Verbesserungen in den Herstellprozessen abgeleitet und in Technologie-Roadmaps beschrieben. Das bekannteste Beispiel hierfür ist die „International Technology Roadmap for Semiconductors“ (ITRS), in der die aktuellen und künftigen fertigungs-

und messtechnischen Anforderungen aufgrund der fortschreitenden Miniaturisierung der kritischen Strukturabmessungen in CMOS-Halbleiter-Bauelementen beschrieben und laufend aktualisiert werden, auch über die zurzeit in der Entwicklung befindlichen Wafer-Strukturbreiten von 32 nm hinaus.

Auch im Bereich der Mikro- und Nanotechnologien gibt es verschiedene Aktivitäten zur Beschreibung künftiger Entwicklungstendenzen und der daraus resultierenden Anforderungen an die Messtechnik. So sind Mitarbeiter der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* in dem im 7. Rahmenprogramm der EU geförderten Projekt „Co-Nanomet“ aktiv, welches das Ziel verfolgt, den künftigen Bedarf an Messtechnik und Rückführung auf die SI-Einheiten in fünf exemplarischen Themenbereichen der Nanotechnologie zu ermitteln und zu dokumentieren. Im Rahmen des Projektes wurde im November 2009 ein „European Nanometrology Workshop“ in der PTB durchgeführt.

Im Rahmen des VDI beteiligen sich zudem Mitarbeiter der Abteilung an der Ausarbeitung einer Roadmap mit dem Titel „Fertigungsmesstechnik 2020“, die über die rein dimensionellen Messgrößen hinausgeht. Eine Artikelserie hierzu ist 2009 in der Zeitschrift „Qualität und Zuverlässigkeit“ erschienen.

In Vorbereitung des European Metrology Research Programme (EMRP) wurden in den technischen Komitees von EURAMET ebenfalls Roadmaps erarbeitet, in denen Entwicklungstendenzen in den jeweiligen Fachgebieten und die daraus resultierenden Anforderungen an die Messtechnik analysiert und dokumentiert wurden. Das Arbeitsprogramm des EMRP und die bereits gestarteten gemeinsamen Entwicklungsprojekte der Metrologieinstitute in Europa stützen sich auf diese Roadmaps ab.

### Titelbild:

Formmessung an einem Druckkolben für das Boltzmannprojekt. Zur Antastung wird ein Laserinterferometer verwendet. Die Position des eigentlich infraroten und damit unsichtbaren Laserstrahls wird durch eine rote Linie angedeutet. Oben sind teiltransparent 3D-Formmessdaten eines optischen Scans eingeblendet. Auf der linken Seite des Kolbens sind die mit verschiedenen Geräten gemessenen Durchmesserwerte für verschiedene Z-Messpositionen dargestellt. Sie symbolisieren zusammen mit der eingeblendeten Formel den Datenfusionsprozess, der für die Kalibrierung von Drucknormalen angewendet wird.

# messtechnik

Neben den Roadmap-Aktivitäten nutzt die Abteilung noch weitere wichtige Instrumente zur Diskussion künftiger Aufgabenbereiche. Ohne Gewichtung der Reihenfolge zählen hierzu die direkten Kontakte mit Kunden und Partnern in Industrie, Wissenschaft und Gesellschaft, die aktive Mitarbeit in Normungs- und Richtlinien-Gremien, die Diskussionen auf Fachkonferenzen und -messen, die Mitarbeit in internationalen Gremien der Metrologie, die Fachgespräche mit Mitgliedern des Helmholtz-Kuratoriums sowie die PTB-intern und mit dem BMWi erfolgten Abstimmungen im Rahmen der strategischen Arbeitsplanung der PTB.

Als ein Beispiel für die rechtzeitige Aufnahme von Arbeitsgebieten der Abteilung zur Abdeckung eines sich entwickelnden Bedarfs sind im Folgenden exemplarisch Entwicklungen von Messverfahren und Messgeräten dargestellt, die zur präzisen Charakterisierung von funktionalen Oberflächen angewandt werden.

## **Oberflächenmesstechnik: Form – Welligkeit – Rauheit**

Die Funktion technischer Systeme hängt oftmals in entscheidender Weise von den Oberflächeneigenschaften der System-Komponenten ab. Für die Sicherstellung von bestimmten Funktionen, wie z. B. die Lackierbarkeit von Blechoberflächen, das Ölhaltevermögen von Zylinderlaufbahnen in Verbrennungsmotoren oder das Reibverhalten in Getrieben müssen die dafür spezifizierten Oberflächenkenngrößen – auf verschiedenen Längenskalen – gemessen werden.

Weitere Beispiele für funktionskritische Oberflächeneigenschaften findet man in der EUV-Lithographie sowie bei den strahlformenden Komponenten von Synchrotron-Speicherringen. Für die in diesen Bereichen eingesetzten Substrate gelten sehr enge Spezifikationen für die Form-, Welligkeits- und Rauheits-Kenngrößen der Oberflächen. Die besondere

Bedeutung der Oberflächenthematik zeigt sich auch darin, dass Mitarbeiter der Abteilung sich im Kompetenzzentrum „Ultra-präzise Oberflächenbearbeitung“ (CC UPOB e.V.) engagieren. Im Folgenden wird exemplarisch gezeigt, wie sich die Abteilung bei verschiedenen Aufgabenstellungen im Bereich der Oberflächencharakterisierung einbringt.

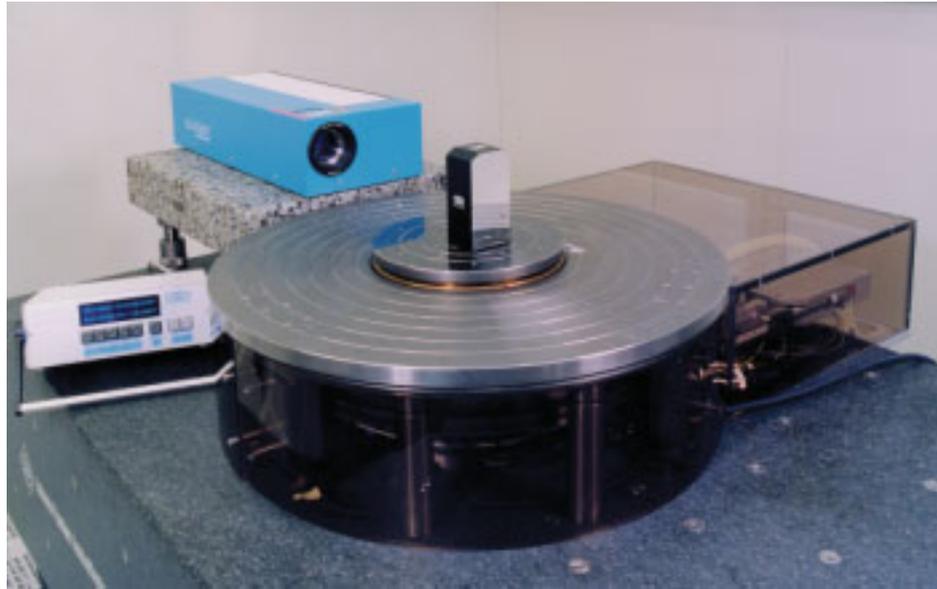
## **Präzisions-Formmessung auf Basis der Winkeldeflektometrie**

Im Verlauf der letzten zehn Jahre haben deflektometrische Verfahren zur präzisen Messung der Topographie optischer Funktionsflächen rasant an Bedeutung gewonnen. Diese basieren auf der Messung lokaler Flächenneigungswinkel mit Autokollimatoren, optisch antastenden Winkelmesssystemen, und ermöglichen insbesondere die Charakterisierung von Flächen, welche messtechnisch besonders herausfordernd sind.

Letztendlich stützt sich die deflektometrische Formmessung auf die geradlinige Lichtausbreitung des vom Autokollimator ausgehenden Messstrahls und die Rückführung der Messgröße ‚Winkel‘. Die Rückführung der Winkelmessung – durch die Kalibrierung des Autokollimators – auf nationale Normale, wie dem Winkelprimärnormal WMT 220 der PTB, nimmt daher eine zentrale Stellung ein. Von der PTB kalibrierte Autokollimatoren sind weltweit im Einsatz und die hochgenaue Charakterisierung der Winkelabweichungen dieser Geräte unter variablen Messbedingungen ist eines der aktuellen Forschungsthemen innerhalb der Abteilung.

Ein besonders wichtiges und messtechnisch herausforderndes Anwendungsgebiet von Autokollimatoren ist die deflektometrische Formmessung von Optiken zur Strahlformung in Beamlines von Synchrotron-Strahlquellen und Freie-Elektronen-Lasern.

Bild 1: Messaufbau zur Kalibrierung von Auto-kollimatoren mit dem Winkelprimärnormal WMT 220 im Reinraumzentrum der PTB.



Die zu messenden Funktionsflächen sind hierbei oft groß dimensioniert, stark gekrümmt, asphärisch und nicht rotations-symmetrisch, mit von Generation zu Generation der Synchrotrone wachsenden Anforderungen an die Messunsicherheit und damit auch an die Charakterisierung der in den Deflektometern verwendeten Autokollimatoren. So benötigen die Optiken zur Strahlfokussierung in Freie-Elektronen-Lasern Flächenneigungsfehler kleiner 0,01 arcsec rms (0,05  $\mu$ rad rms), welche Formabweichungen kleiner 0,5 nm rms entsprechen. Bei der Fertigung dieser optischen Funktionsflächen ist derzeit deren Formmessung der limitierende Faktor.

Im Rahmen langjähriger Forschungszusammenarbeiten mit anderen NMIs, Messgeräte-

herstellern sowie mit Messtechniklaboren von Synchrotron-Strahlungsquellen hat die PTB zu erheblichen Verbesserungen der winkelmetrologischen Basis der dort eingesetzten deflektometrischen Formmesstechnik beigetragen. Insbesondere wurden Fehlereinflüsse auf die Winkelmessung mit Autokollimatoren, welche durch die spezifischen Messbedingungen in Deflektometern auftreten, detailliert untersucht. Dies betrifft beispielsweise die veränderliche optische Weglänge des Autokollimatormessstrahls, welche durch das Abtasten der Prüflingsoberfläche mit einem verschiebbaren Strahlumlenker verursacht wird und die um bis zu 1,5 m variieren kann.

Laufende Aktivitäten betreffen unter anderem die Optimierung der Leistungsfähigkeit von

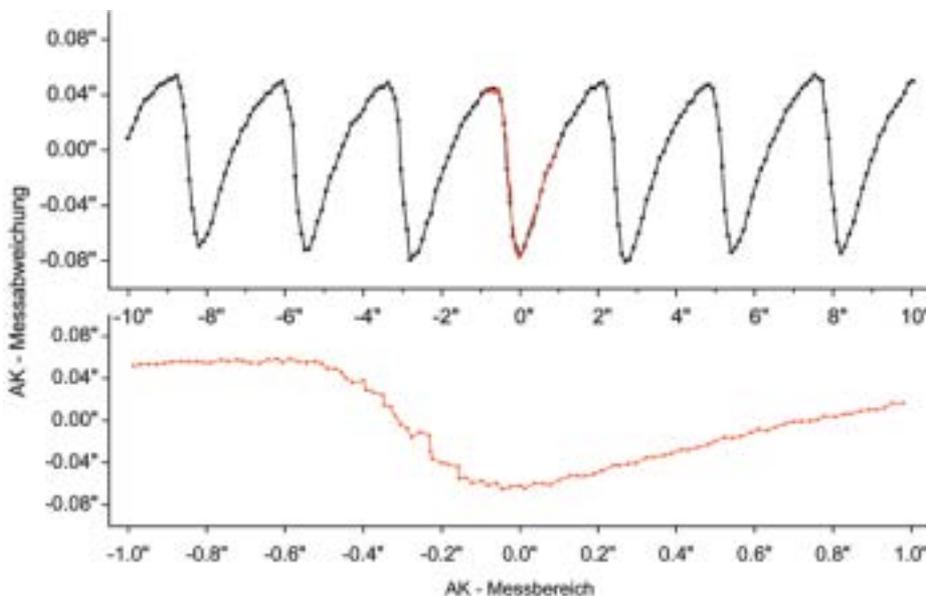


Bild 2: Typische Winkelabweichungen eines Autokollimators (Messapertur 2,5 mm) mit einer Periode von 2,8 arcsec (13,6  $\mu$ rad), die dem Pixelabstand der im Gerät verwendeten CCD entspricht. Schwarz (Rot): Messbereich 10 arcsec (1 arcsec), Schrittweite 0,1 arcsec (0,02 arcsec).

Autokollimatoren bei kleinen Messaperturen durch den Einsatz phasenschiebender Messmarken und die hochgenaue Kalibrierung von Autokollimatoren in einem Raumwinkelbereich.

Grundlage für die Präzisions-Kalibrierung von Autokollimatoren ist die Anwendung des Winkelprimärnormals der PTB. Die Standardunsicherheit der Kalibrierung des WMT 220 konnte durch die Weiterentwicklung und den Vergleich von Selbst- und Kreuzkalibrierverfahren auf  $u = 0,001$  arcsec ( $u = 5$  nrad) reduziert werden (Bilder 1 und 2).

### Entwicklung mathematischer Filterverfahren zur Bestimmung von Oberflächenkenngrößen auf verschiedenen Längenskalen

Innerhalb des internationalen Normungsgremiums ISO/TC 213 *Geometrical Product Specification and -verification* werden grundlegende Filterverfahren zur Gewinnung von Oberflächen- bzw. Profilinformatoren in der Arbeitsgruppe ISO/TC 213/WG 15 diskutiert. Hier wurde die Serie ISO/TS 16610 erarbeitet, die zurzeit 12 verabschiedete Dokumente umfasst, in denen moderne Filtermethoden untersucht werden, die über die bekannten Mittellinienfilter hinaus gehen: Splines, Wavelets, robuste Filterung, morphologische Filter, optimale Abtastverfahren (gegebenenfalls auch nicht äquidistant) sowie Erkennung und gegebenenfalls Beseitigung von Ausreißern.

Es sei hier exemplarisch ein Fall aufgezeigt, der demonstriert, warum es notwendig war, über die Filterung von Oberflächenprofilen erneut nachzudenken und bessere Filterverfahren zu entwickeln.

Das Gauß-Filter nach DIN EN ISO 11562:1998 ist derzeit praktisch das einzige genormte Mittellinienfilter. Es stellte sich allerdings sehr bald heraus, dass bei einer unbedachten Anwendung dieses Filters neue Probleme auftreten können. Das zeigte sich insbesondere in der Formmessung, wo die Trennung der Formabweichungen von der Welligkeit und der Rauheit ein nicht zufriedenstellend gelöstes Problem ist.

Aber auch bei der Filterung in der Rauheitsmessung gab es Gründe, über eine Verbesserung nachzudenken. Bei glatten Oberflächen

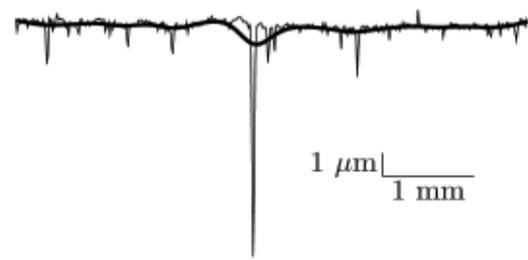


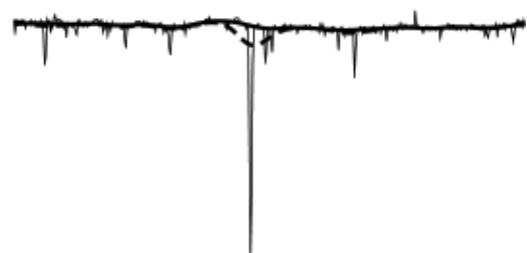
Bild 3: Anwendung des Gauß-Filters nach DIN EN ISO 11562 auf ein Profil mit einer porigen Oberfläche: Mittellinie (dick), ungefiltertes Profil (dünn).

von stark porigem Material mit relativ tiefen Poren (z. B. Keramik) oder bei gehonten Oberflächen zeigte sich das Gauß-Filter als ungeeignet. Bild 3 verdeutlicht die Problematik.

Die Mittellinie wird in unerwünschter Weise zu den tiefen Tälern des Profils hingezogen. Um die Nachteile des Gauß-Filters zu überwinden, wurde das Spline-Filter entwickelt. Zu den Splines gehören sehr unterschiedliche Funktionen, die bekanntesten sind die Polynom-Splines dritten Grades (kubische Splines). Es gibt zwei Arten von Spline-Filtern, nicht robuste und robuste, letztere sind gegen Ausreißer resistent. Bild 4 zeigt die Anwendung des robusten Spline-Filters auf das oben gezeigte Profil einer porigen Oberfläche im Vergleich zur Anwendung des Gauß-Filters. Wie man sieht, werden die Poren nun sehr gut unterdrückt.

Neben den linearen Filtern, wie dem Gauß-Filter, dem Spline-Filter oder dem Wavelet-Filter findet man in der ISO/TS 16610 auch die morphologischen Filter. Morphologische Filter sind im Zusammenhang mit Formfiltern noch weitgehend unbekannt. Sie lassen sich nicht durch die üblichen Verfahren der Fou-

Bild 4: Vergleich der Mittellinien, berechnet mit dem robusten Spline-Filter (durchgezogen) und dem Gauß-Filter (gestrichelt) für das Profil einer porigen Oberfläche bei gleicher Grenzwellenlänge der Filter.



rier-Transformation beschreiben, sondern basieren auf mengentheoretischen Überlegungen. Morphologische Filter ergeben als Ergebnis keine Mittellinie, sondern eine Einhüllende.

Zunehmend wichtig für die Analyse der Oberflächentextur ist das morphologische Skalenraum-Verfahren, das zur Multiskalenanalyse der Wavelet-Transformation analog ist. Die Eigenschaft des morphologischen Skalenraum-Verfahrens, lokale Störungen im Oberflächenprofil aufzufinden, macht es zur Detektion von Singularitäten (Ausreißer) und Diskontinuitäten (Sprünge) innerhalb von Datensätzen geeignet, wobei auch deren Position sehr einfach festgestellt werden kann.

Die genannten Profilfilter lassen sich auch problemlos für die Flächenfilterung erweitern. Die Reihe ISO/TS 16610 wird also in der nächsten Zeit noch durch weitere Teile ergänzt werden. Die Notwendigkeit dazu zeigt sich in der wachsenden Erkenntnis, dass moderne industrielle Prüfverfahren zur Charakterisierung technischer Oberflächen nicht mehr auf Profilmessungen allein beruhen können.

## Entwicklungen in der Rauheitsmesstechnik

Im Fachbereich *Oberflächenmesstechnik* wurde ein hoch auflösendes, flächenhaft messendes Tastschnittgerät (high-resolution topographic scanner (HRTS)) entwickelt. Das Gerät besteht aus einem luftgelagerten x-y-Tisch und einer Messbrücke, an der verschiedene Sensoren befestigt werden können.

Das Herzstück der Apparatur bildet ein luftgelagerter mechanischer Taster LUPO, dessen Taststift eine präzise, lineare Bewegung ausführt. Das Feld eines Magneten hält den ca. 1 g schweren Taststift in der Schwebe, wobei durch konstruktive Maßnahmen Rotationsbewegungen des Stiftes vermieden werden. Der Taster hat einen nominellen Messbereich von  $\pm 50 \mu\text{m}$  bei einer Auflösung von 0,1 nm. Ein zusätzliches induktives Messsystem im Tastkopf „registriert“ die Auslenkungen der Tastnadel. Die Antastkraft der Diamantspitze an der Tastnadel wird über einen integrierten Tauchspulantrieb unabhängig von der Auslenkung des Taststiftes auf einen konstanten Wert geregelt. Damit können statische Antastkräfte im Bereich zwischen  $600 \mu\text{N}$  und  $100 \mu\text{N}$  eingestellt werden.

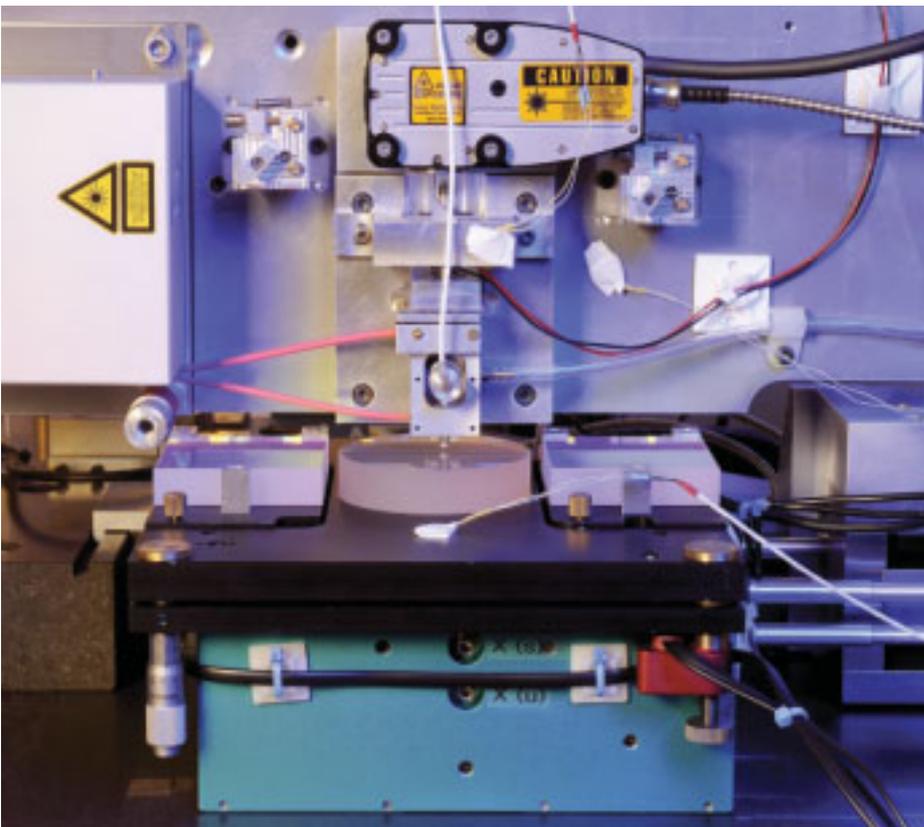
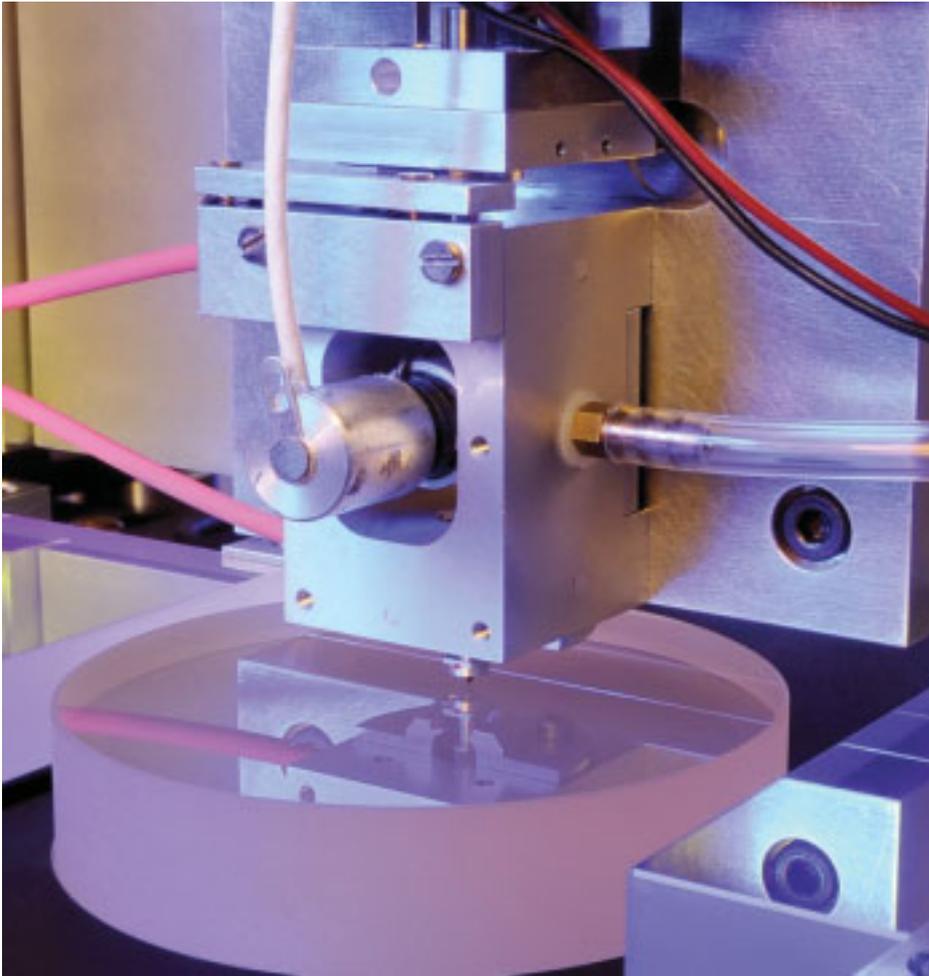


Bild 5: Hoch auflösender flächenhafter Topographie-Messplatz (HRTS) mit luftgelagerten x-y-Tisch (Rasterbereich 70 mm × 70 mm) sowie luftgelagertem Tastsystem LUPO.

Bild 6: Foto des luftgelagerten Tastsystems



Zur direkten Rückführung kann die Bewegung des Taststiftes mit einem integrierten Laser-Interferometer gemessen werden.

Durch den linearen rotationssymmetrischen Aufbau des Tasters ist das Gerät in der Lage, Profile in beliebigen Bewegungsrichtungen aufzunehmen. Die Tastspitze soll dazu isotrop den Änderungen der Oberfläche in der z-Richtung folgen. Bei einer Messung werden neben der z-Auslenkung auch die x- und y-Koordinaten bestimmt.

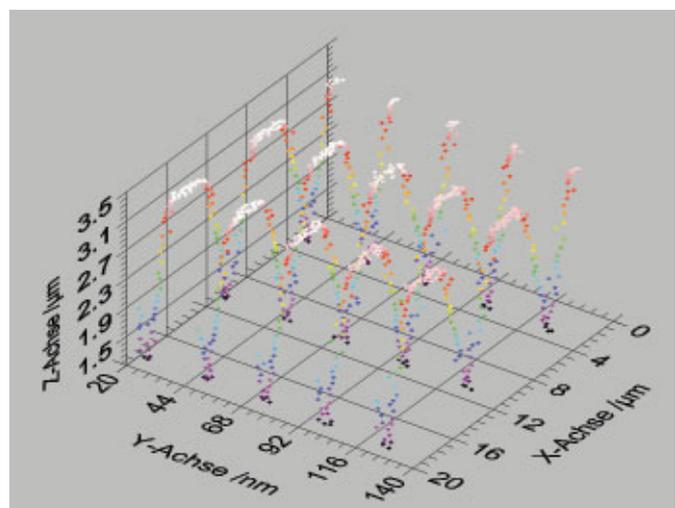
In ersten Untersuchungen zur Charakterisierung des Tasters sowie der Führungs-

Bild 7: Abweichungen der Tastspitze in x-, y- und z-Richtung von einer idealen Geraden beim Abtasten eines Dreiecksgitters mit 8  $\mu\text{m}$  Periodenlänge. Abweichungen in der z-Richtung sind farblich markiert.

(x-, y-Richtung 25 nm/Gitter).

Die einzelne Profillinie erscheint nicht mehr als 2D-Linie sondern in Form einer 3D-Punkt- wolke, wie in der Koordinatenmesstechnik.

eigenschaften des x-y-Tisches wurde ein Präzisionsliniengitter mit dreieckförmigem Profil so gemessen, dass die Profilschnittlinien schräg zum Gitter verlaufen. Eine Analyse der Messergebnisse bestätigt qualitativ, dass die gemessenen Positionen von Probendetails laterale Abweichungen von maximal 20 nm zeigen. Darin sind die Abweichungen der luftgelagerten Spitze von der z-Linearbewegung eingeschlossen.



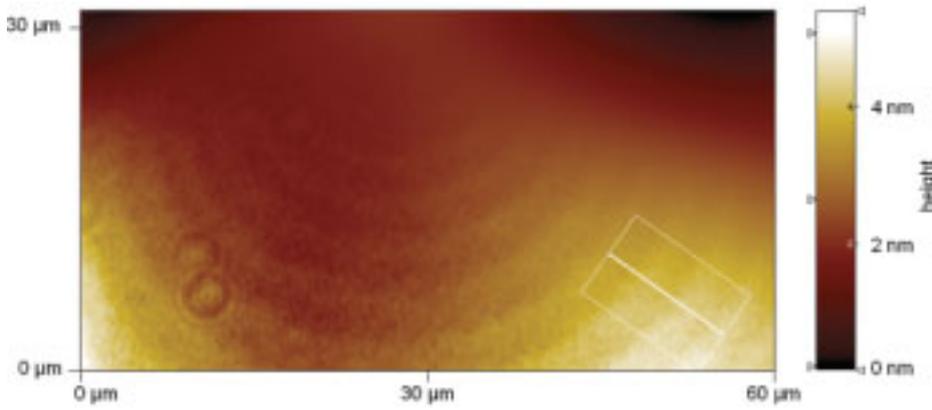


Bild 8a: Topographische Aufnahme eines Teilbereiches einer kristallinen Siliciumoberfläche mit dem Interferenzmikroskop Micromap.

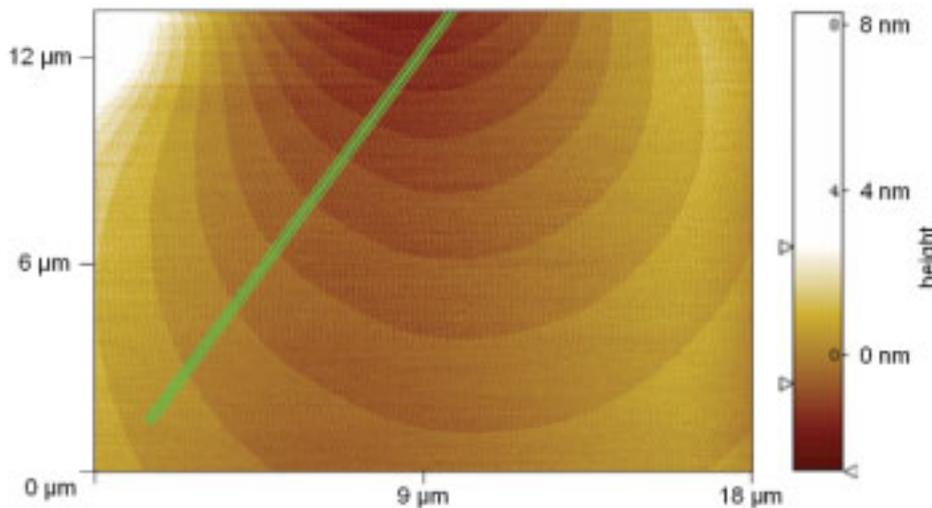


Bild 8b: Rastersondenmikroskopische Aufnahme an etwa der gleichen Stelle auf der Probe wie in Bild 8a

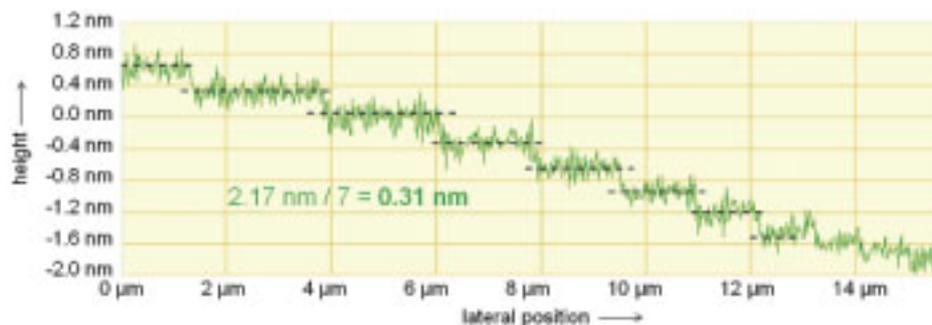


Bild 8c: Profilschnitt aus den 3D-Daten des Rastersondenmikroskops.

Ein Beispiel für die erreichbare hohe z-Auflösung berührungsloser, optischer Oberflächenmessverfahren ist in Bild 7 gezeigt. Hier sind interferenzmikroskopische (50x-Objektiv) Messergebnisse der Oberfläche einer speziell behandelten kristallinen Silicium-Probe dargestellt, die Terrassen mit monoatomaren Stufen zeigt. Solche Messungen dienen als Beispiel, wie eine vertikale Auflösung in den ISO-Normen 25178-60x zur flächenhaften Rauheitsmessung definiert

werden kann. Die Höhe der monoatomaren Si-Stufen konnte durch Messungen mit einem AFM zu 0,31 nm bestätigt werden (Bild 8).



Bild 9: Foto des „Nano Knight Award“, verliehen an Dr. Günter Wilkening.

### **„Nano Knight“-Auszeichnung**

Der bisherige Leiter der Abteilung *Fertigungsmesstechnik*, Dr. Günter Wilkening, ist zum Ende Februar 2009 aus der PTB ausgeschieden. Sowohl als Abteilungsleiter als auch als vormaliger Leiter des Fachbereiches *Mikro- und Nanometrologie* ist Dr. Wilkening ein innerhalb und außerhalb der PTB hoch geschätzter und ausgewiesener Fachexperte. Als besondere Anerkennung seiner Verdienste in der europäischen Forschung im Bereich der Mikro- und Nanometrologie wurde er anlässlich der Fachkonferenz „Nanoscale 2008“ in Turin mit dem erstmals verliehenen „Nano-Knight Award“ ausgezeichnet. Herzlichen Glückwunsch und alles Gute auch weiterhin!

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Bestimmung der Federkonstanten von AFM-Cantilevern mit einem MEMS-Nanokraftaktor

Ein mikroelektromechanischer Nanokraftaktor wurde für die Kalibrierung der Biegesteifigkeit von AFM-Cantilevern entwickelt. Dieser wurde an zwei unterschiedlich steifen kommerziellen Cantilevern erfolgreich erprobt. (S. Gao, FB 5.1, [sai.gao@ptb.de](mailto:sai.gao@ptb.de))

#### Siliciumätztechnik zur Herstellung der Pendel für die Nanokraftmesseinrichtung

Die Herausforderung an das Fertigungsverfahren bestand darin, definierte Löcher in der Pendelscheibe aus Si-Wafermaterial zu erzeugen, die zum einen genau in der Mitte des Pendels platziert sind und zum anderen ein selbst zentrierendes Widerlager für die kugelförmigen Aufhängungen der Pendel an 10 µm dünnen Drähten bilden. (S. Bütetfisch, FB 5.1, [sebastian.buetefisch@ptb.de](mailto:sebastian.buetefisch@ptb.de))

#### Kalibrierung der Nanokraftmesseinrichtung mit Kräften kleiner 1 nN mittels Neigung

Eine Methode zur Kalibrierung der Nanokraftmesseinrichtung der PTB im Sub-Nanowatt-Bereich wurde erfolgreich erprobt, die auf einer Neigung der kompletten Messeinrichtung sowie elektrostatischer Kompensation der Neigung in einem der beiden Messkanäle der Messeinrichtung beruht. (V. Nesterov, FB 5.1, [vladimir.nesterov@ptb.de](mailto:vladimir.nesterov@ptb.de))

#### Untersuchung der Unsicherheitseinflüsse der Geradheitsmessung am Nanometerkomparator mittels Simulation

Der Nanometerkomparator wird um eine Geradheitsmessoption an Strichteilungen erweitert, die sich auf das TMS-Verfahren abstützt. Simulationen haben ergeben, dass sich hiermit Messunsicherheiten im Sub-Nanometerbereich erzielen lassen. (C. Weichert, J. Flügge, FB 5.2, [christoph.weichert@ptb.de](mailto:christoph.weichert@ptb.de), [jens.fluegge@ptb.de](mailto:jens.fluegge@ptb.de))

#### Neubestimmung des Unsicherheitsbeitrages der Probenlagerung bei der Messung von Strichmaßstäben

Strichmaßstäbe spielen bei der Weitergabe der Längeneinheit eine wichtige Rolle. Der begrenzende Einfluss der Maßstabslagerung auf die erzielbare Unsicherheit der Längenmaßweitergabe mittels Präzisions-Strichmaßstäben wurde untersucht. (R. Köning, FB 5.2, [rainer.koenig@ptb.de](mailto:rainer.koenig@ptb.de))

#### Monte-Carlo-Simulation MCSEM zur hochgenauen Messung von Nanopartikeln im REM eingesetzt

Das Transmissions-Elektronensignal von Nanopartikeln wurde mit MCSEM, einem modularen Programm zur Simulation der komplexen Bildentstehung in REM, berechnet und mit Messergebnissen verglichen. Dies ermöglicht eine Bestimmung der Partikelgrößen mit einer Sensitivität im Nanometer-Bereich. (C.G. Frase, FB 5.2, [carl.g.frase@ptb.de](mailto:carl.g.frase@ptb.de))

#### Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten für hoch angereichertes <sup>28</sup>Si

Für Messungen im Rahmen des Avogadro-Experiments an Verkörperungen aus hoch angereichertem Silicium ist die genaue Kenntnis des Temperaturexpansionskoeffizienten (coefficient of thermal expansion (CTE)) notwendig. Messungen an <sup>28</sup>Si-Kugeln wurden mit dem Kugelinterferometer der PTB bei Temperaturen zwischen 17 °C und 30 °C durchgeführt. Der experimentell bestimmte CTE konnte mit theoretischen Vorhersagen in Relation gebracht werden, die eine Differenz zum CTE von natürlichen Silicium vorhersagten. (G. Bartl, A. Nicolaus, FB 5.4, [guido.bartl@ptb.de](mailto:guido.bartl@ptb.de), [arnold.nicolaus@ptb.de](mailto:arnold.nicolaus@ptb.de))

### **Interferometrische Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten an Probekörpern mit optisch nicht-kooperativen Oberflächen**

Für die Charakterisierung von Probekörpern im Rahmen des MICROSCOPE Projektes war es u.a. notwendig, deren thermischen Ausdehnungskoeffizienten genau zu messen. Aufgrund der gegebenen, optisch nicht-kooperativen Oberflächen wurde eine Methode entwickelt, die die Probekörper in einen optischen Aufbau einbezieht. (R. Schödel, FB 5.4, rene.schoedel@ptb.de)

### **Fertigung des neuen Kugelinterferometers abgeschlossen**

Für die genaue Messung des Volumens von Silicium-Einkristallkugeln im Rahmen des Avogadro-Projekts bei angestrebten Messunsicherheiten von  $1 \cdot 10^{-8}$  war zur Integration verbesserter Objektive sowie zur Reduzierung thermischer Einflüsse der Neubau eines Kugelinterferometers notwendig. (H. Drösemeyer, FB 5.5, holger.droesemeyer@ptb.de)

### **Selbstkalibrierung von Teilkreisen auf Basis eines Primfaktor-Algorithmus**

Bei der Selbstkalibrierung von Winkel-Teilkreisen lässt sich im Falle speziell gewählter Anordnungen von Abtastköpfen zur Auslesung des Teilkreis-Phasengitters ein analytisch vorteilhafter Primfaktor-Algorithmus zur Anwendung bringen. Er ist auch für die Kreuzkalibrierung zweier Teilkreise anwendbar und erlaubt hierbei eine erhebliche Verringerung des Kalibrieraufwandes. (R. Probst, FB 5.2, H. Bosse, 5, harald.bosse@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Struktur der neuen Referenzsoftware für die Rauheitsmesstechnik**

Ein neues IT-Konzept für die Referenzsoftware zur Berechnung von Rauheitskenngrößen wurde auf der Basis der anwendungsorientierten Middleware CORBA realisiert, die es ermöglicht, eine Erweiterung der Software auch um externe Module einfach durchzuführen. Damit ist ein tragfähiges, flexibles und zukunftsfähiges Programmgerüst geschaffen worden. (L. Jung-Albrecht, FB 5.1, lena.jung-albrecht@ptb.de)

### **Hochgenaue Kalibrierung von Kugelplatten für Mikro-Koordinatenmessgeräte**

Ein neues Normal für die Prüfung von taktilen Mikro-Koordinatenmessgeräten wird in der PTB mit Messunsicherheiten im Bereich von 100 nm kalibriert. Die Halbkugelplatte aus Zerodur hat neun angeschobene Halbkugeln aus Siliciumnitrid, die insgesamt 36 Abstände von 13 mm bis 100 mm verkörpern. (M. Neugebauer, FB 5.3, michael.neugebauer@ptb.de)

### **Mikroverzahnungsmesstechnik – Bedarf und Möglichkeiten**

Innerhalb einer von der PTB durchgeführten Studie wurden eine Bedarfsabfrage für den Bereich der Mikroverzahnungsmesstechnik in der Industrie durchgeführt sowie die messtechnischen Möglichkeiten aufgezeigt. Die Studie gibt Empfehlungen für weitere Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet. Innerhalb eines Folgevorhabens soll nun die Rückführung von Mikroverzahnungsmessungen realisiert werden. (K. Rost, FB 5.3, kerstin.rost@ptb.de)

### **Absolutinterferometer mit 20 m Reichweite**

In einem mit zwei stabilisierten Diodenlasern betriebenen, weiterentwickelten Hybrid Aufbau wurde auf Distanzen bis zu 20 m eine relative Messunsicherheit von kleiner als  $10^{-6}$  erreicht. (F. Pollinger, K. Meiners-Hagen, A. Abou-Zeid, FB 5.4, florian.pollinger@ptb.de, karl.meiners-hagen@ptb.de, ahmed.abou-zeid@ptb.de)

### **Femtosekundenlaser-basiertes Längenmesssystem**

Bei der Detektion von Femtosekundenlaserpulsen mit einer Photodiode entsteht ein Frequenzkamm im Mikrowellenbereich, der hochgenaue Abstandsmessungen über längere Distanzen ermöglicht. Ein auf diesem Prinzip basierendes System wurde für Längenmessungen bis zu 100 m erfolgreich getestet. (R. Doloca, K. Meiners-Hagen, A. Abou-Zeid, FB 5.4, nicolae.r.doloca@ptb.de, karl.meiners-hagen@ptb.de, ahmed.abou-zeid@ptb.de)

### **193-nm-Transmissionsmikroskop für hochgenaue quantitative Linienbreitenmessungen im Aufbau**

Das in enger Kooperation mit dem Fachbereich *Bild- und Wellenoptik* entwickelte Mikroskop soll bei einer Beleuchtungswellenlänge von 193 nm eine hochgenaue „at-wavelength“-Charakterisierung von Photomasken ermöglichen. Nach Abschluss der konstruktiven Arbeiten und nach Fertigung eines Großteils der Mikroskop-Komponenten erfolgt zur Zeit der Aufbau im Reinraumzentrum der PTB. (F. Pilarski, FB 5.5, frank.pilarski@ptb.de)

### **Bestimmung des effektiven Kontaktradius rauer Mikrokugeln**

Ein neues Verfahren zur experimentellen Bestimmung des effektiven Kontaktradius rauer Mikrokugeln ist entwickelt worden. Die im Experiment an Rubinkugeln mit einem Durchmesser von 200  $\mu\text{m}$  gewonnenen Ergebnisse zeigen ab einer Normalkraft von ca. 300 mN gute Übereinstimmung mit den theoretischen Ergebnissen der Hertz'schen Gleichungen und statistisch basierten Modellen für raue Oberflächen. (R. Meeß, FB 5.5, rudolf.meess@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Konstruktion und Fertigung einer Leuchten-Positioniervorrichtung**

Zur Beschleunigung und Erleichterung der Arbeitsabläufe bei Eigensicherheitsprüfungen wurde in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich *System- und Eigensicherheit* eine neue Anlage zur Positionierung von z. B. Langfeldleuchten und diverser Industrie-Leuchten konstruiert und gefertigt. (M. Müller, FB 5.5, michael.mueller@ptb.de)

#### **Konstruktion und Fertigung einer Referenzzelle für die Messung der Leitfähigkeit von Reinstwasser**

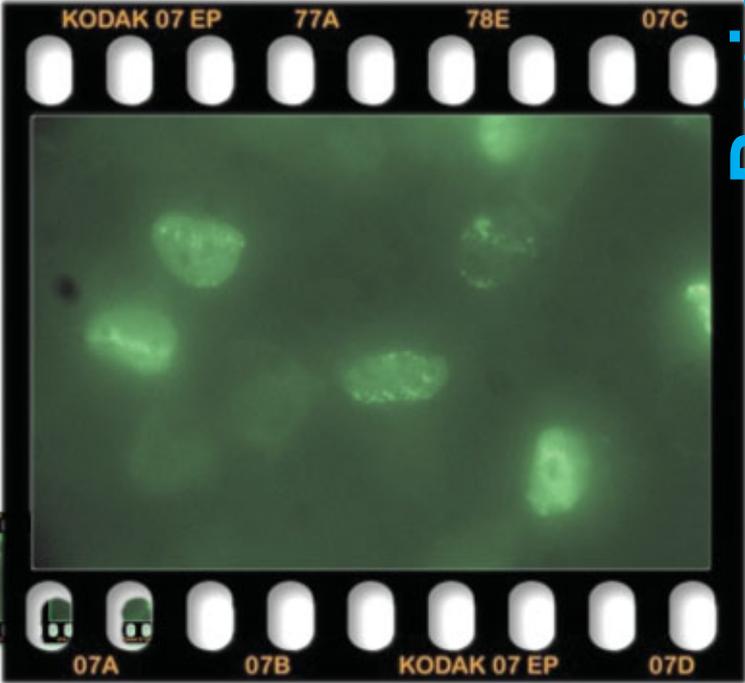
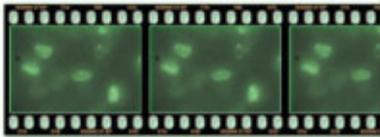
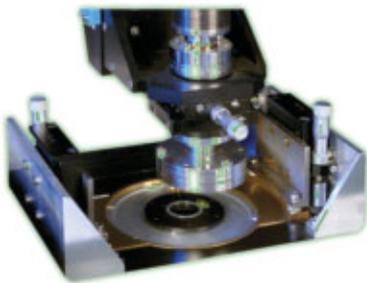
Für die Kalibrierung von Leitfähigkeits-Messzellen, die in verschiedenen Reinstwasseranwendungen eingesetzt werden, wird in der Arbeitsgruppe *Elektrochemie* ein Referenz-Messplatz im Leitfähigkeits-Bereich von 5,5  $\mu\text{S}/\text{m}$  aufgebaut. Hierfür wurde eine spezielle Referenzzelle konstruiert und realisiert. (E. Luiken, FB 5.5, enno.luiken@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

#### **Internationaler Ringvergleich von 1D-Gittern (300 nm, 700 nm) und Stufenhöhennormalen (7 nm bis 2 $\mu\text{m}$ )**

Die Messergebnisse von drei europäischen und einem asiatischen Metrologieinstitut zeigten eine sehr gute Übereinstimmung. Die mittels Rastersondenmikroskopen bestimmten Messwerte wiesen Abweichungen vom Referenzwert auf, die größtenteils im Sub-Nanometerbereich lagen. (G. Dai, H.-U. Danzebrink, FB 5.2, gaoliang.dai@ptb.de, hans-ulrich.danzebrink@ptb.de)

# Ionisierende Strahlung



Berichte der Abteilungen

# Ionisierende

Die sich im Laufe der Zeit wandelnden metrologischen Herausforderungen bei der Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten für die Messgrößen der ionisierenden Strahlung – Aktivität, Teilchenfluenz, Luftkerma, Energie- und Äquivalentdosis – führten im vergangenen Jahr auch zu Änderungen in der Organisationsstruktur der Abteilung. So wurde der Fachbereich 6.6 *Grundlagen der Dosimetrie* fachlich neu aufgestellt. Der bislang in diesem Fachbereich angesiedelte Bereich der Darstellung und Weitergabe der Messgröße Luftkerma und der Bauartzulassung von Diagnostikdosimetern wurde mit dem thematisch verwandten Aufgabenfeld der Dosimetrie für die Strahlentherapie in Fachbereich 6.2 zusammengelegt. Im Gegenzug wurde das Aufgabenportfolio des Fachbereichs 6.6 auf die Vorlaufforschung für zukünftige dosimetrische Messgrößen mit biologischer Wichtung fokussiert.

Zur Stärkung der internationalen Vernetzung auf dem Gebiet der Metrologie ionisierender Strahlung im Sub-Mikrometerbereich wurde im Juni 2009 gemeinsam mit dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und der europäischen Strahlenschutz-Vereinigung EURADOS e.V. das 249. PTB-Seminar veranstaltet. 30 Teilnehmer aus acht europäischen Ländern und den USA diskutierten wissenschaftliche Fragestellungen, die sich für gemeinsame Projekte im Rahmen des im vergangenen Jahr ins Leben gerufenen „Interdisciplinary Network for Advanced Nanodosimetry and Biology-Based Concepts of Radiation Dosimetry“ (NanoCoRD) eignen.

Titelbild:

Mit der Methode des „live cell imaging“ können am Microbeam der PTB Ion Accelerator Facility (PIAF) die Strahlenschäden durch einzelne Ionen in lebenden Zellen „live“ beobachtet werden.

Neben der dosimetrischen Grundlagenforschung ist die Qualitätssicherung von Messungen bei der Anwendung ionisierender Strahlung am Menschen einer der wichtigen Schwerpunkte im Arbeitsprogramm der Abteilung. Dies betrifft sowohl die Röntgendiagnostik als auch die Strahlentherapie mit radioaktiven Quellen und mit Beschleunigern.

## **Forschungsbeschleuniger im Richard-Glocker-Bau in Betrieb genommen**

Die Erprobungs- und Inbetriebnahmephase des 11 m langen Elektronenbeschleunigers für die dosimetrische Grundlagenforschung im Richard-Glocker-Bau wurde am 16. September 2009 erfolgreich abgeschlossen, genau dreieinhalb Jahre nach der Grundsteinlegung am 16. März 2006. Die Verantwortung für den Betrieb des Beschleunigers ist damit vom Hersteller, der RI Research Instruments GmbH aus Bergisch-Gladbach, auf die PTB übergegangen.

An dem Beschleuniger werden Erzeugungs- und Wirkungsmechanismen von Elektronen- und Photonenstrahlung in Abhängigkeit von den grundlegenden physikalischen Größen kinetische Energie und elektrische Stromstärke studiert. Unter anderem soll das Strahlungsbremsvermögen diverser Materialien bestimmt werden. Diese Daten werden von Rechenprogrammen für die Bestrahlungsplanung und für die Strahlungstransportsimulation benötigt, die heute zu den unverzichtbaren klinischen Werkzeugen gehören.

Der aus zwei Sektionen bestehende Linearbeschleuniger wurde speziell für die PTB entwickelt. Die kinetische Energie der Elektronen ist von 0,5 MeV bis 50 MeV stufenlos wählbar. In der Erprobungsphase wurden Parametersätze für zehn verschiedene Standardenergien ermittelt, die nun minutenschnell eingestellt werden können.

# e Strahlung

Ablenk- und Blendensysteme sorgen für eine einzigartige Energieschärfe des Elektronenstrahls. Dabei ist die Leistung mit bis zu 1 kW so hoch, dass Photonenstrahlung mit therapeutisch relevanter Dosisleistung erzeugt werden kann. Eigens konstruierte Spektrometer und Stromtransformatoren messen Elektronenenergie und Stromstärke mit kleinstmöglicher Unsicherheit ( $u_r < 0,1\%$ ).

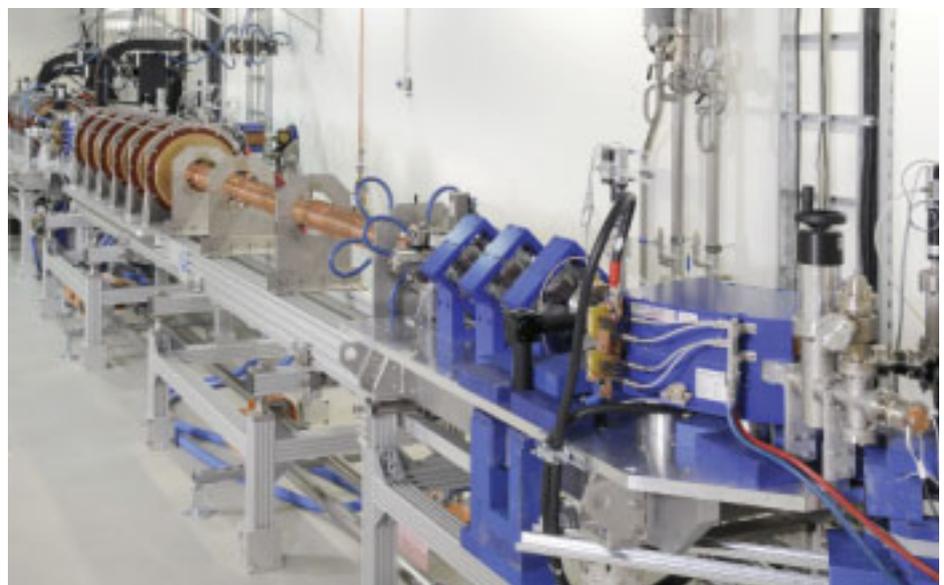
Der Richard-Glocker-Bau beherbergt zusätzlich noch zwei medizinische Elektronenbeschleuniger der Bauart „Elekta Precise Treatment System™“, wie sie auch in Kliniken zur Behandlung von Patienten eingesetzt werden. Bereits seit Januar 2008 werden damit anwendungsnahe dosimetrische Untersuchungen für die klinische Praxis durchgeführt. Zwischen dem Glocker-Bau und dem Röntgen-Bau wird gegenwärtig ein Verbindungsgang errichtet, der noch 2009 fertiggestellt sein soll. Dann ist das Projekt „Errichtung einer Elektronenbeschleuniger-Anlage für die Dosimetrie in der Strahlentherapie“ vollständig abgeschlossen.

## Dosimetrie im Sekundärstrahlungsfeld bei der $^{12}\text{C}$ -Strahlentherapie

Die Therapie von soliden Tumoren mittels hochenergetischer Protonen oder  $^{12}\text{C}$ -Ionen ist eine der modernsten Formen der Krebstherapie bei bestimmten Tumorarten. In Deutschland wurde die  $^{12}\text{C}$ -Ionentherapie über viele Jahre vom Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH (GSI) in Darmstadt entwickelt und wird demnächst am Heidelberger Ionentherapiezentrum (HIT) in den Routinebetrieb gehen. Darüber hinaus entstehen in Marburg und Kiel weitere Ionentherapiezentren mit hochenergetischen Ionenstrahlen.

Ziel der Strahlentherapie ist es, den Tumor vollständig abzutöten und das umgebende gesunde Gewebe mit so wenig Strahlung wie möglich zu belasten. Allerdings wird insbesondere bei der Ionentherapie durch die Wechselwirkung der Ionenstrahlen mit dem Gewebe auch Sekundärstrahlung aus Neutronen, Protonen, Deuteronen und Heliumkernen erzeugt, die zu einer geringen Exposition des gesunden Gewebes führt. Die dosimetrische Erfassung der während der Strahlentherapie im Patienten erzeugten

Bild 1: Der 11 m lange Elektronenbeschleuniger im Richard-Glocker-Bau. Am Ende der kupfernen Beschleunigungssektion (im Vordergrund) erreichen die Elektronen die maximale Energie von 50 MeV. Quadrupol- und Dipolmagnete (blau) fokussieren die Elektronen und lenken sie auf den Messplatz.



Sekundärstrahlung steht mittlerweile im Zentrum vieler Untersuchungen. Für dosimetrische Messungen in einem solch komplexen Strahlungsfeld sind die experimentellen Methoden der Mikrodosimetrie besonders geeignet.

Die PTB hat bei Messungen am  $^{12}\text{C}$ -Therapiestrahl der GSI einen mit gewebe-äquivalentem Gas gefüllten Proportionalzähler verwendet (engl. *tissue equivalent proportional counter*, TEPC), der auch zur Dosimetrie der kosmischen Strahlung in Flughöhen mit dem *PTB In-flight Dosimetry System* (pDOS) erfolgreich verwendet wurde. Durch die Reduktion des Gasdrucks auf etwa 40 hPa wird so mit einem Gasvolumen mit einigen Zentimetern Durchmesser ein Gewebevolumen von 4 mm Durchmesser simuliert. Mit einem TEPC wird eine Pulshöhenverteilung gemessen, die Rückschlüsse auf die Ionisationsdichte und damit auf die Strahlenqualität erlaubt und die in eine Dosisverteilung umgerechnet werden kann. Dieses Messverfahren ist für alle Komponenten des Strahlungsfeldes geeignet, da es auf der Messung der Dosis in Gewebe und deren mikroskopischer Verteilung beruht. Die Messergebnisse zeigen, dass unter typischen Bestrahlungsbedingungen bei einer Tumorbehandlung das gesunde Gewebe in der Nähe des bestrahlten Tumors mit einer zusätzlichen Dosis von mehreren mSv exponiert wird.

### Absolutdosimetrie für die Brachytherapie mit Miniatur-Röntgenanlagen

Die intraoperative Bestrahlung mit Hilfe einer Miniatur-Röntgenanlage etabliert sich zunehmend als eine Alternative zu den in der heutigen Strahlentherapie eingesetzten Methoden. Bei dieser Bestrahlungstechnik entfernt der Chirurg erst den Tumor und platziert den Kopf der Röntgenquelle mit einem Applikator direkt im entstandenen Hohlraum, im sogenannten Tumorbett. Nach der Bestrahlung kann die Röntgenquelle entfernt und das Operationsgebiet geschlossen werden.

Anwendung findet diese Bestrahlungstechnik heute schon bei der Therapie des Mammakarzinoms, aber auch bei der intraoperativen Bestrahlung von Gehirntumoren. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass sich die höchste Strahlendosis aufgrund eines steilen Abfalls



Bild 2: Miniatur-Röntgenquelle (links) mit sphärischem Applikator (rechts) zur gezielten Positionierung im Tumorbett.

der Dosis in dem direkt an der Applikatoroberfläche gelegenen Gewebe befindet und das weiter entfernte gesunde Gewebe geschont wird.

Miniatur-Röntgenanlagen werden mit Röhrenspannungen bis 50 kV betrieben. Das erzeugte kontinuierliche Bremsstrahlungsspektrum enthält einige charakteristische Fluoreszenzlinien, die sich aus den beim Bau der Anlage verwendeten Materialien ergeben.

Die PTB hat mit der deutschen Herstellerfirma Carl-Zeiss Surgical GmbH eine Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Absolutdosimetrie für die Brachytherapie mit Miniatur-Röntgenanlagen beschlossen mit dem Ziel, ein Verfahren zur Bestimmung der Wasser-Energiedosis im Nahfeld einer solchen Quelle zu entwickeln.

## Die TDCR-Čerenkov-Methode – Ein neues Verfahren zur Aktivitätsbestimmung

Hochenergetische Elektronen aus dem Betazerfall können in einem dielektrischen transparenten Medium Čerenkov-Licht erzeugen, sofern ihre Geschwindigkeit größer als die Phasengeschwindigkeit des Lichts in dem Medium ist. Dieser Effekt kann zur Aktivitätsbestimmung mit Hilfe eines Flüssigszintillationsspektrometers genutzt werden. Bisherige Anwendungen sind jedoch auf Relativverfahren beschränkt, bei denen jeweils Referenzlösungen mit bekannten Aktivitäten zur Kalibrierung benötigt werden. Dennoch bieten die Verfahren zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten, da niederenergetische Elektronen oder schwere und damit langsame Alpha-Teilchen kein Čerenkov-Licht erzeugen und deshalb die Messungen nicht beeinflussen. Außerdem können wässrige Lösungen direkt verwendet werden und es fallen keine gemischten Abfälle aus radioaktiver Lösung und organischen Flüssigkeiten an, wie das bei der Flüssigszintillationszählung der Fall ist.

In der PTB wurde nun ein Verfahren entwickelt, das Aktivitätsbestimmungen mit Čerenkov-Messungen ermöglicht, bei denen keine Referenzlösungen benötigt werden. Die Berechnung der Nachweiswahrscheinlichkeit des Systems basiert dabei auf einem Freien-Parameter-Modell, das auch die Grundlage zweier erfolgreicher Flüssigszintillationsmethoden, einer *Efficiency-Tracing*-Methode und der *Triple-to-Double-Coincidence-Ratio* (TDCR)-Methode, darstellt. Die bisher erreichte Präzision des Verfahrens ist für zahlreiche Anwendungen schon vielversprechend, zum Beispiel für Messungen von Radionukliden in der Nuklearmedizin oder für Anwendungen in der Überwachung der Umweltradioaktivität.

## Zehn Jahre Vergleichsmessungen von Europäischen Frühwarnsystemen

Heute betreiben fast alle Mitgliedstaaten der EU flächendeckende Messnetze zur Bestimmung der Ortsdosisleistung (ODL) externer Gamma-Strahlung. Die frühzeitige Erkennung und Beurteilung nuklearer Unfälle und ihrer möglichen radiologischen Folgen ist eine entscheidende Voraussetzung für ein adäquates staatliches Handeln. Europaweit sind, in

allen nationalen Frühwarnsystemen zusammen, dafür mehr als 4000 ODL-Messstellen im Betrieb, deren Messwerte im Ereignisfall mindestens stündlich an die EU-Kommission weiterzuleiten sind. Um vergleichbare Messergebnisse über Ländergrenzen hinweg zu erhalten, besteht auch mehr als zwanzig Jahre „nach Tschernobyl“ ein deutlicher Bedarf zur Harmonisierung der Mess- und Auswertemethoden europäischer Frühwarnsysteme.

Die EURADOS-Arbeitsgruppe „Environmental Radiation Monitoring“ beschäftigt sich seit zehn Jahren mit den metrologischen Aspekten bei der Messung der Ortsdosisleistung durch Frühwarnsysteme. In fünf Messvergleichen von 1999 bis 2009 wurden dabei bislang etwa sieben Messsysteme aus 18 europäischen Mitgliedstaaten untersucht und kalibriert. Die weltweit einzigartige Kombination von Referenzmessplätzen der PTB für die Umgebungs-dosimetrie war dabei von zentraler Bedeutung. Diese Messplätze erlauben die selektive Bestimmung der Ansprechvermögen von Detektoren für Höhenstrahlung und für terrestrische Strahlung, die Bestimmung ihres Eigennulleffekts, die Messung der Energie- und Dosisleistungsabhängigkeit sowie die auf Primärnormale rückführbare Kalibrierung von Dosimetriesystemen bei niedrigen Dosisleistungen.

Die Erkenntnisse und Folgerungen aus den genannten europäischen Messvergleichen, gewonnen auf den Referenzmessplätzen für Umgebungs-dosimetrie der PTB, sind unverzichtbare Voraussetzungen für die Harmonisierung der ODL-Messungen zur Umgebungsüberwachung in Europa.

## Prototyp für ein transportables Radon-Folgeprodukt-Messgerät

Aufgrund fehlender rückführbarer Messgeräte auf dem Gebiet der Radon- und Thoron-Folgeproduktmessung haben die PTB und die Firma Gammadata AB zusammen ein tragbares Folgeproduktmessgerät entwickelt, welches als Transfernormal genutzt werden kann.

Radon-(Rn-222) und Thoron-(Rn-220) Folgeprodukte verursachen den hauptsächlichen Beitrag zur Dosis der Lunge. Deshalb ist es für eine reale Dosisabschätzung der Lunge wichtig, die Folgeproduktkonzentrationen zu

kennen. Bisher konnte dies unter realen Bedingungen in Häusern und Gebäuden nur in unbefriedigendem Umfang erreicht werden, da es an rückführbaren, tragbaren Messgeräten mangelt.

Um die Bedeutung für den Strahlenschutz zu verstehen, ist es wichtig zu beachten, dass bei gleicher Aktivitätskonzentration von Radon und Thoron der Dosisbeitrag der Thoron-Folgeprodukte einen 14fach höheren Wert hat als derjenige für Radon-Folgeprodukte. Das tragbare Folgeproduktmessgerät ist in der Lage, zwischen den relevanten  $\alpha$ -Linien der  $\alpha$ , $\beta$ -Spektren der Nuklide der natürlichen Zerfallsreihen zu unterscheiden. Außerdem kann das Messgerät in einem großen Bereich von 100 Bq/m<sup>3</sup> bis 50 kBq/m<sup>3</sup> die jeweilige Aktivitätskonzentration des freien und an Aerosole angelagerten Anteils reproduzierbar messen. Erste Messungen des *Radon Decay Product Spectrometer* (RDS) wurden in der Thoron-Folgeprodukt-Kammer der PTB durchgeführt und mit dem Standardverfahren der PTB zur Messung von Folgeprodukten verglichen. Die Optimierung des Systems wird zur Zeit vorangetrieben.

### Strahlenschutz-Dosimeter in gepulsten Strahlungsfeldern

Die bisher genutzte Messtechnik für den Strahlenschutz basiert auf Dosimetern, die für kontinuierliche Strahlung entwickelt und geprüft wurden. In den letzten Jahren hat sich jedoch in allen Bereichen der Nutzung ionisierender Strahlung – in der Medizin, der Indu-

strie und der Forschung – ein Wandel hin zur Nutzung gepulster Felder vollzogen. Inzwischen arbeiten etwa 70 % der beruflich strahlenexponierten Personen in gepulsten Feldern.

Orientierende Messungen in diesen Strahlungsfeldern mit den bisher gebräuchlichen elektronischen Dosimetern zeigen, dass die bisher bewährten Messgeräte erhebliche Defizite aufweisen oder sogar völlig versagen können. Die messtechnischen Probleme in gepulsten Feldern ionisierender Strahlung sind inzwischen offensichtlich geworden und haben das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) veranlasst, die Verwendung elektronischer Dosimeter in gepulsten Strahlungsfeldern vorerst stark einzuschränken. Als Reaktion auf dieses messtechnische Problem hat die PTB eine Anlage zur definierten Erzeugung gepulster Röntgenstrahlung aufgebaut. Diese Puls-Röntgenanlage, deren Herzstück eine gittergesteuerte Röntgenröhre ist, wurde zusammen mit der Firma Siemens aus einem medizinischen Serienprodukt entwickelt. Mit dieser Referenzstrahlungsanlage wird es erstmals möglich sein, die Eignung von Dosimetern für Messungen in gepulsten Strahlungsfeldern zu testen. Als nächstes müssen dann neue elektronische Dosimeter und geeignete Prüfverfahren entwickelt werden, damit der Strahlenschutz auch in gepulsten Feldern ionisierender Strahlung sichergestellt werden kann.

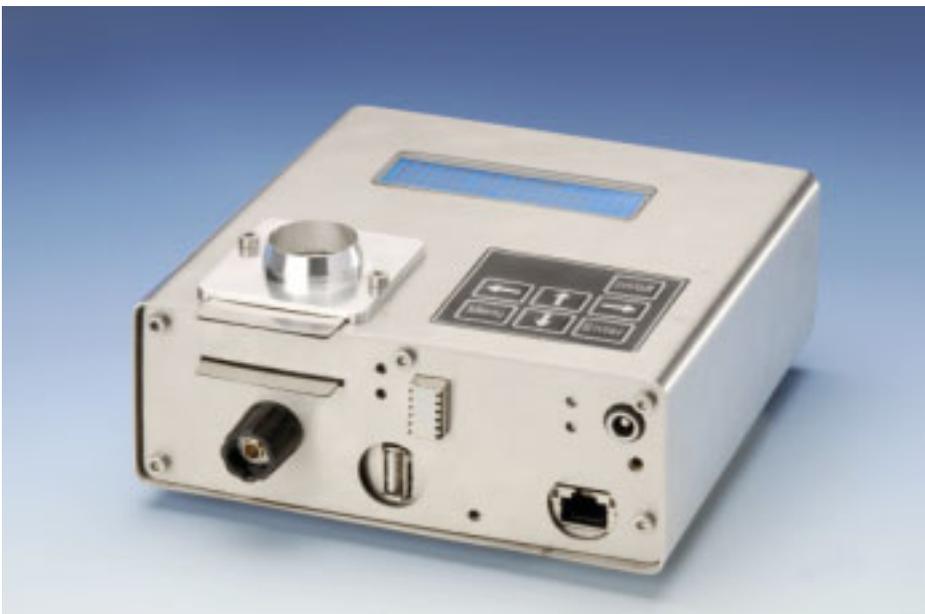


Bild 3: Prototyp des transportablen Radon-Folgeprodukt-Messgeräts, das gemeinsam mit der Gammadata Holding AB entwickelt wird.

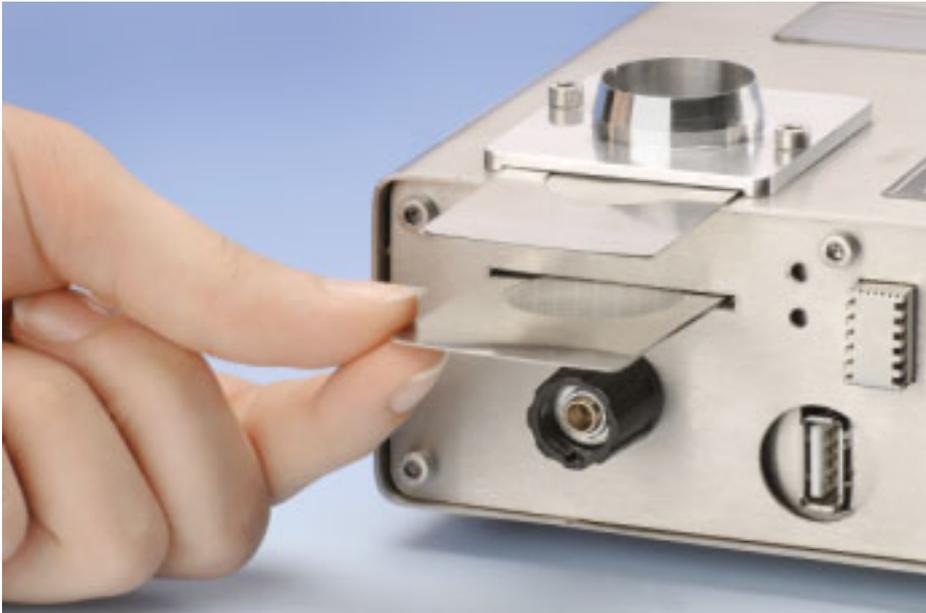


Bild 4: Die Probenahme gewährleistet eine nahezu verlustfreie Sammlung von Radon-Folgeprodukten, getrennt nach freiem und an Aerosole angelagertem Anteil.

Bild 5: Die Pulsröntgenanlage besteht aus dem Generator (links), dem Strahlerzeuger (Mitte) mit Drehanodenröhre, Verschluss, Filterrad und einschiebbarer Blende und dem verschiebbaren Bestrahlungstisch (rechts). Als Prüfling ist hier die Sekundärnormal-Ionisationskammer für die Tiefen-Personendosis,  $H_p(10)$ , aufgebaut.



## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Die TDCR-Čerenkov-Methode – Ein neues Verfahren zur Aktivitätsbestimmung

In der PTB wurde ein neues Verfahren zur Aktivitätsbestimmung hochenergetischer Beta-Strahler entwickelt und getestet. Das Verfahren bietet zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten, z. B. im Bereich der Nuklearmedizin oder der Umweltradioaktivität, und kann zur Untersuchung von Beta-Spektren genutzt werden. (K. Kossert, FB 6.1, [karsten.kossert@ptb.de](mailto:karsten.kossert@ptb.de))

#### Erstes Primärnormal für die Thoron-Aktivitätskonzentration entwickelt

Mit dem Aufbau des Thoron-Emanationsmessplatzes (TEM) steht für das kurzlebige Radon-Isotop Rn-220 ( $T_{1/2} = 55$  s) erstmals ein Primärnormal zur Verfügung. Mittels Aktivitätsnormalen, der Online-Messung des Emanationsvermögens der elektrolytisch abgetrennten Flächenpräparate von Th-228 sowie dem gemessenen Volumen des Aktivitätskreislaufes kann die Einheit mit einer relativen Standardmessunsicherheit von 3 % dargestellt werden. Die Bestimmung des Emanationsvermögens gelingt mit einer relativen Messunsicherheit von  $\leq 0,4$  % mit dem neu entwickelten Verfahren TEM basierend auf den Zählratenverhältnissen unterschiedlicher Präparate. (A. Röttger, FB 6.1, [annette.roettger@ptb.de](mailto:annette.roettger@ptb.de))

#### Bestimmung der Alpha-Emissionswahrscheinlichkeiten von Plutonium-240

Im Rahmen des internationalen EURAMET-Projektes 749 hat sich die Arbeitsgruppe *Aktivitätseinheit* der PTB erfolgreich der Bestimmung der Alpha-Emissionswahrscheinlichkeiten gestellt. Dieses Projekt war gleichzeitig Anlass, neue Auswertungsalgorithmen zu entwickeln und bestehende zu erweitern. (O. Ott, FB 6.1, [oliver.ott@ptb.de](mailto:oliver.ott@ptb.de))

#### Die spektrale Verteilung des ANITA-Neutronenstrahls

Am Gustav-Werner-Zyklotron des The Svedberg Laboratoriums (TSL) in Uppsala wird der hoch-intensive Neutronenstrahl ANITA (atmospheric-like neutrons from thick target) durch Beschuss eines 25 mm dicken Wolframtargets mit 178-MeV-Protonen erzeugt. In der Lethargiedarstellung zeigt die mit der Neutronenenergie gewichtete spektrale Ausbeute einen sogenannten Spallationspeak bei etwa 100 MeV und einen Verdampfungspeak bei etwa 1 MeV. Sie ähnelt damit der spektralen Verteilung der von der primären kosmischen Strahlung induzierten Neutronenkomponente der Umgebungstrahlung. Der ANITA-Strahl wird deshalb vor allem zur Untersuchung von strahlungsinduzierten Ausfällen in Halbleiter-Datenspeichern (SRAM) eingesetzt. Für diese Experimente ist vor allem der hochenergetische Anteil der spektralen Neutronenverteilung oberhalb von etwa 10 MeV wichtig. (R. Nolte, FB 6.4, [ralf.nolte@ptb.de](mailto:ralf.nolte@ptb.de))

#### Messungen von Neutronenspektren induziert durch kosmische Strahlung in Höhen von 85 m, 1195 m und 2650 m

Der Fachbereich *Neutronenstrahlung* hat zwischen Mai 2005 und Juli 2006 drei Messkampagnen zur Bestimmung von Neutronenspektren in 85 m, 1195 m und 2650 m Höhe mit dem erweiterten Bonnerkugel-Spektrometer NEMUS durchgeführt. Die bei solchen Umgebungsmessungen niedrigen Neutronenzählraten erforderten die Entwicklung neuer Datenanalysemethoden, bei der insbesondere eine kugelspezifische Luftdruckkorrektur angewendet wird. Die Auswerteverfahren und die Ergebnisse der Messungen wurden kürzlich auf dem internationalen Neutronendosimetrie-Symposium NEUDOS-11 vorgestellt. (B. Wiegel, FB 6.5, [burkhard.wiegel@ptb.de](mailto:burkhard.wiegel@ptb.de))

### **Charakterisierung eines hochauflösenden Diamantdetektors in Neutronenreferenzfeldern**

Ein kommerziell erhältlicher Detektor aus künstlich hergestelltem einkristallinen Diamant wurde in den monoenergetischen Neutronenreferenzfeldern der PTB im Energiebereich von 2,5 MeV bis 14 MeV untersucht. Aufgrund der guten Energieauflösung eignet sich dieser Detektor dazu, die Eigenschaften der Neutronenfelder und den Einfluss von Targeteigenschaften auf das Neutronenspektrum direkt ohne Flugzeitmethoden zu bestimmen. (A. Zimbal, FB 6.5, andreas.zimbal@ptb.de)

### **Totale Elektronenstreuquerschnitte von Tetrahydrofuran erstmals experimentell bestimmt**

Strahleninduzierte Schäden an der DNA werden zu einem großen Teil durch niederenergetische Elektronen verursacht. Die Simulation dieser Schädigung erfordert deshalb die Kenntnis der Elektronenstreuquerschnitte für Molekülgruppen, die als Bausteine in der DNA vorkommen oder diesen sehr ähnlich sind. Als Modellsysteme für die Molekülgruppe Deoxyribose wird gemeinhin das Molekül Tetrahydrofuran angesehen, für welches nun erstmals in der PTB die totalen Streuquerschnitte für niederenergetische Elektronen bestimmt wurden. (W. Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

### **Quantenchemische Berechnung elastischer Elektronenstreuquerschnitte**

Da viele Biomoleküle nicht unter Einzelstoßbedingungen in der Gasphase experimentell untersucht werden können, wurde ein theoretisches Verfahren zur Berechnung der elastischen Elektronenstreuquerschnitte entwickelt. Mit diesem wurden die differentiellen elastischen Streuquerschnitte von Trimethylphosphat berechnet, das der Phosphatgruppe im DNA-Strang sehr ähnlich ist. (W. Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

### **Erhöhen magnetische Felder die biologische Wirkung von Sekundärelektronen in der Strahlentherapie?**

Es ist bekannt, dass die Dosis im Tumolvolumen durch Bestrahlung in einem magnetischen Feld signifikant erhöht werden kann, weil dieses die Spurverläufe höherenergetischer Primär- oder Sekundärelektronen beeinflusst. Inwieweit das Anlegen eines externen Magnetfeldes auch die Spurstruktur niederenergetischer Sekundärelektronen, die letztendlich den größten Anteil der Dosis bei einer strahlentherapeutischen Behandlung deponieren, und damit deren biologische Wirkung verändert, war bisher nicht bekannt. (M. Bug, FB 6.6, marion.bug@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Absolutdosimetrie für die Brachytherapie mit Miniatur-Röntgenanlagen**

Die PTB hat mit der deutschen Herstellerfirma Carl-Zeiss Surgical GmbH eine Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Absolutdosimetrie für die Brachytherapie mit Miniatur-Röntgenanlagen beschlossen. Ziel ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Wasser-Energiedosis im Nahfeld dieser Strahlungsquelle. (Th. Schneider, FB 6.2, thorsten.schneider@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **14. Fachgespräch zur Überwachung der Umweltradioaktivität**

Vom 24. März bis 26 März 2009 fand an der Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg das 14. Fachgespräch (FG) zur Überwachung der Umweltradioaktivität statt. Unter dem Thema „IMIS – Integrierendes System zur Umweltüberwachung und Notfallvorsorge“ wurden der aktuelle Stand der Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt, zukünftige Entwicklungen und, teilweise in speziell dafür angesetzten Workshops, auch Detailthemen wie u. A. Qualitätssicherung und Ringversuche oder radiochemische und messtechnische Fragen, in intensivem Austausch mit den Vertretern der Messstellen und Nutzer diskutiert. (H. Wershofen, FB 6.1, herbert.wershofen@ptb.de)

### **Metrologische Infrastruktur für Aktivitätsmessungen des für die Nuklearmedizin wichtigen Radionuklids $^{64}\text{Cu}$**

Aktivitätsmessverfahren für  $^{64}\text{Cu}$  wurden etabliert und im Rahmen eines Vergleichs im internationalen Referenzsystems (SIR) eingesetzt. Darüber hinaus konnten die Halbwertszeit und Emissionswahrscheinlichkeiten des Isotops bestimmt werden. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

### **Neue Bestimmung der Halbwertszeit von $^{10}\text{Be}$**

Die Halbwertszeit des langlebigen Isotops  $^{10}\text{Be}$  konnte mit deutlich verbesserter Unsicherheit bestimmt werden. Die PTB hat insbesondere durch Aktivitätsmessungen mit Hilfe der Flüssigszintillationszählung dazu beigetragen. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

### **Prototyp für transportables Radon-Folgeprodukt-Messgerät steht zur Verfügung**

Aufgrund fehlender rückführbarer Messgeräte auf dem Gebiet der Radon- und Thoron-Folgeproduktmessung haben die PTB und die Firma Gammadata AB zusammen ein tragbares Folgeproduktmessgerät entwickelt, welches als Transfernormal genutzt werden kann. (A. Honig, FB 6.1, anja.honig@ptb.de)

### **Aufbau einer Low-Level-Radon-Referenzkammer begonnen**

Um Messgeräte zur Bestimmung der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Luft im Bereich unterhalb von  $1000 \text{ Bq/m}^3$  rückführbar zu kalibrieren, wird zur Zeit eine Low-Level-Radon-Referenzkammer aufgebaut. Für die nachfolgende Weitergabe der Einheit bei derart geringen Radon-Aktivitätskonzentrationen wird ein hochsensitives Transfernormal entwickelt. (D. Linzmaier, FB 6.1, diana.linzmaier@ptb.de)

### **Experimentelle Ermittlung von Strahlungsqualitätskorrektionsfaktoren**

Dosismessungen in der Strahlentherapie werden entsprechend der deutschen Norm DIN 6800-2 oder dem internationalen Dosimetrieprotokoll IAEA TRS-398 mit Ionisationsdosimetern durchgeführt, die zur Anzeige der Wasser-Energiedosis im  $^{60}\text{Co}$ -Strahlungsfeld kalibriert wurden. Wird ein solches Ionisationsdosimeter in einem Strahlungsfeld anderer Energie verwendet (z.B. in einem von einem medizinischen Linearbeschleuniger erzeugten Photonenfeld), so muss die dadurch bedingte Änderung des Ansprechvermögens durch den Strahlungsqualitätskorrektionsfaktor  $k_Q$  korrigiert werden. Die bislang bekannten Strahlungsqualitätskorrektionsfaktoren liefern mit einer relativen Standard-Messunsicherheit von 1 % den Hauptbeitrag zur Gesamtunsicherheit der Dosismessung. (R.-P. Kapsch, FB 6.2, ralf-peter.kapsch@ptb.de)

### **In-vivo-Dosimetrie mit Alanin/ESR**

Das Sekundärnormal-Messsystem für die Wasser-Energiedosis auf der Basis von Alanin/ESR wurde für In-vivo-Messungen bei der Strahlentherapie des Prostatakarzinoms verwendet. Die Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Göttingen durchgeführt. Für Messungen innerhalb der Harnröhre bei Brachytherapie mit  $^{192}\text{Ir}$  wurden eine neue Detektorform entwickelt und das Ansprechvermögen relativ zu  $^{60}\text{Co}$  bestimmt. Erste Untersuchungen am Prostataphantom zeigen – im Rahmen der Messunsicherheiten von ca. 4 % – gute Übereinstimmung zwischen Bestrahlungsplanung und ermittelter Dosis. Ziel der Untersuchungen ist der experimentelle Nachweis der beabsichtigten Schonung der Harnröhre durch entsprechende Bestrahlungsplanung. (M. Anton, FB 6.2, mathias.anton@ptb.de)

### **Europäisches Forschungsprojekt auf dem Gebiet der Dosimetrie für die Brachytherapie**

Die PTB ist maßgeblich an einem durch die EU mit 1,2 Millionen Euro geförderten Projekt zur Verbesserung der Dosimetrie in der Brachytherapie beteiligt. Ziel des Projektes ist es, Grundlagen für den Übergang zu einer ausschließlich auf der Einheit der Wasser-Energiedosis beruhenden Dosimetrie in der Brachytherapie zu schaffen. (H.-J. Selbach, FB 6.2, hans-joachim.selbach@ptb.de)

### **Aufbau eines Spektrometriestands für die Brachytherapie**

In der Arbeitsgruppe 6.22 wurde ein eigener Spektrometriestand für die Erfordernisse in der Brachytherapie mit Photonenquellen errichtet. Aufgrund ihres unterschiedlichen Aufbaus haben die verschiedenen Quellentypen von Brachytherapie-Seeds des gleichen Nuklids (z. B. I-125) unterschiedliche Spektren. Dieses führt zu einer Veränderung des Kalibrierfaktors und muss berücksichtigt werden. (Th. Schneider, FB 6.2, thorsten.schneider@ptb.de)

### **Durchführung eines Vergleiches für die Augentumor-Strahlentherapie mit einer Ru-106-Flächenquelle.**

Im Jahr 2008 sind die Unikliniken Essen und Tübingen, die mehr als die Hälfte der auftretenden Augentumorpatienten in Deutschland mit der Beta-Brachytherapie behandeln, sowie der weltweit einzige Hersteller der für diese Therapie nötigen Augenapplikatoren, die Firma BEBIG, an die PTB mit der Bitte herangetreten, eine Verifizierung ihrer jeweiligen Beta-Basisdosimetrie mittels eines Vergleiches durchzuführen. Der in diesem Jahr begonnene Vergleich soll gemäß dem aufgestellten Messprogramm Ende 2010 abgeschlossen sein. (M. Bambynek, FB 6.2, markus.bambynek@ptb.de)

### **Photonenstrahlungsfelder hoher Energie neu charakterisiert**

An vielen Arbeitsplätzen mit ionisierender Strahlung tritt hochenergetische Photonenstrahlung auf, z.B. in der Medizin (Tumortherapie), in der Forschung (Forschungsbeschleuniger) und in der Industrie (Kernkraftwerke). Diese Strahlungsfelder enthalten Photonen mit Energien von einigen Mega-elektronenvolt (MeV). (J. Brunzendorf, FB 6.3, jens.brunzendorf@ptb.de)

### **Zehn Jahre EURADOS-Vergleichsmessungen von Europäischen Frühwarnsystemen**

Seit dem Reaktorunfall von Tschernobyl 1986 wurden in allen Mitgliedsstaaten der EU Frühwarnsysteme mit zusammen ca. 4000 Messstellen zur Bestimmung der Ortsdosisleistung externer Gamma-Strahlung errichtet. In fünf Messvergleichen der EURADOS Working Group „Environmental Radiation Monitoring“ wurden von 1999 bis 2009 mehr als siebzig Detektoren aus verschiedenen Messstellen dieser Frühwarnsysteme von 18 europäischen Mitgliedstaaten untersucht und kalibriert. Diese Messungen trugen entscheidend zur Verbesserung der Messergebnisse und damit zur Harmonisierung der Umgebungsüberwachung in Europa bei. (S. Neumaier, FB 6.3, stefan.neumaier@ptb.de)

### **Neue Standardprobe des Isotops $^{79}\text{Se}$ für die AMS hergestellt**

Das langlebige Isotop  $^{79}\text{Se}$  hat eine Schlüsselrolle für das Verständnis der Nukleosynthese der schweren Elemente. In Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern des Maier-Leibnitz-Laboratorium (MLL) der LMU und der TU München wurde an den Ionenbeschleunigern der PTB eine neue Standardprobe des Isotops  $^{79}\text{Se}$  für die Beschleuniger-Massen-Spektrometrie (AMS) hergestellt. (U. Giesen, FB 6.4, ulrich.giesen@ptb.de; I. Dillmann, Physik-Department E12, TU München, iris.dillmann@ph.tum.de)

### **Dosimetrie im Sekundärstrahlungsfeld bei der $^{12}\text{C}$ -Strahlentherapie**

Die Messung der Dosisverteilung der durch einen  $^{12}\text{C}$ -Ionenstrahl in einem Wasserphantom erzeugten Sekundärstrahlung erfolgte mit einem Gewebe-äquivalenten Proportionalzähler. Ziel ist es, die Messung der Dosisverteilung während der Ionentherapie ausserhalb des Patienten zu messen, um dann Rückschlüsse auf die zusätzliche Exposition des Patienten durch Sekundärstrahlung ziehen zu können. (Frank Wissmann, FB 6.4, frank.wissmann@ptb.de)

### „Live Cell Imaging“ am PTB-Mikro-Ionenstrahl

In einer interdisziplinären Kooperation zwischen der PTB, der Deutschen Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH (DSMZ, Braunschweig) und der Uniklinik Düsseldorf wurde am Microbeam die neue Methode des „Live Cell Imaging“ etabliert. Entlang von Teilchenspuren entstehen DNA-Doppelstrangbrüche (DSB), die in Sekunden und Minuten Reaktionen und Reparaturprozesse in den Zellen auslösen. Durch die Fusion des fluoreszierenden Proteins GFP mit einem Reparaturprotein, welches in Zellen an den DSB akkumuliert, werden diese ersten und sehr schnellen Reaktionen der Zellen „live“ als Entstehung von fluoreszierenden Foci beobachtet. (U. Giesen, FB 6.4, ulrich.giesen@ptb.de)

### Cargoinspektion mit kombinierter Neutronen- und Gammastrahlung

Eine Kombination von Neutronen- und Gammastrahlen-Transmissionsradiographie ermöglicht automatische Detektion von Sprengstoffen, Drogen und spaltbarem Material. Dazu wurden Energiespektren und Ausbeuten der Neutronen- und Gammaemission der für diese Anwendung interessantesten Kernreaktion  $^{11}\text{B}(d,n+\alpha)^{12}\text{C}$  untersucht und ein Konzept für eine kombinierte Inspektionsanlage für Luftfracht entworfen. (V. Dangendorf, FB 6.5, volker.dangendorf@ptb.de)

### Bestrahlungseinrichtung mit thermischen Neutronen

Da die derzeit von der PTB am Forschungsreaktor der GKSS betriebene Bestrahlungseinrichtung mit thermischen Neutronen im nächsten Jahr ausläuft, wurde der Aufbau einer Bestrahlungseinrichtung in der PTB in Braunschweig geprüft. Dazu wurden Rechnungen für den Aufbau einer Anlage mittels  $^{241}\text{Am}$ -Be-Radionuklidquellen, moderiert durch schweres Wasser und Graphit, durchgeführt. (M. Luszik-Bhadra, FB 6.5, marlies.luszik-bhadra@ptb.de)

## Internationale Angelegenheiten

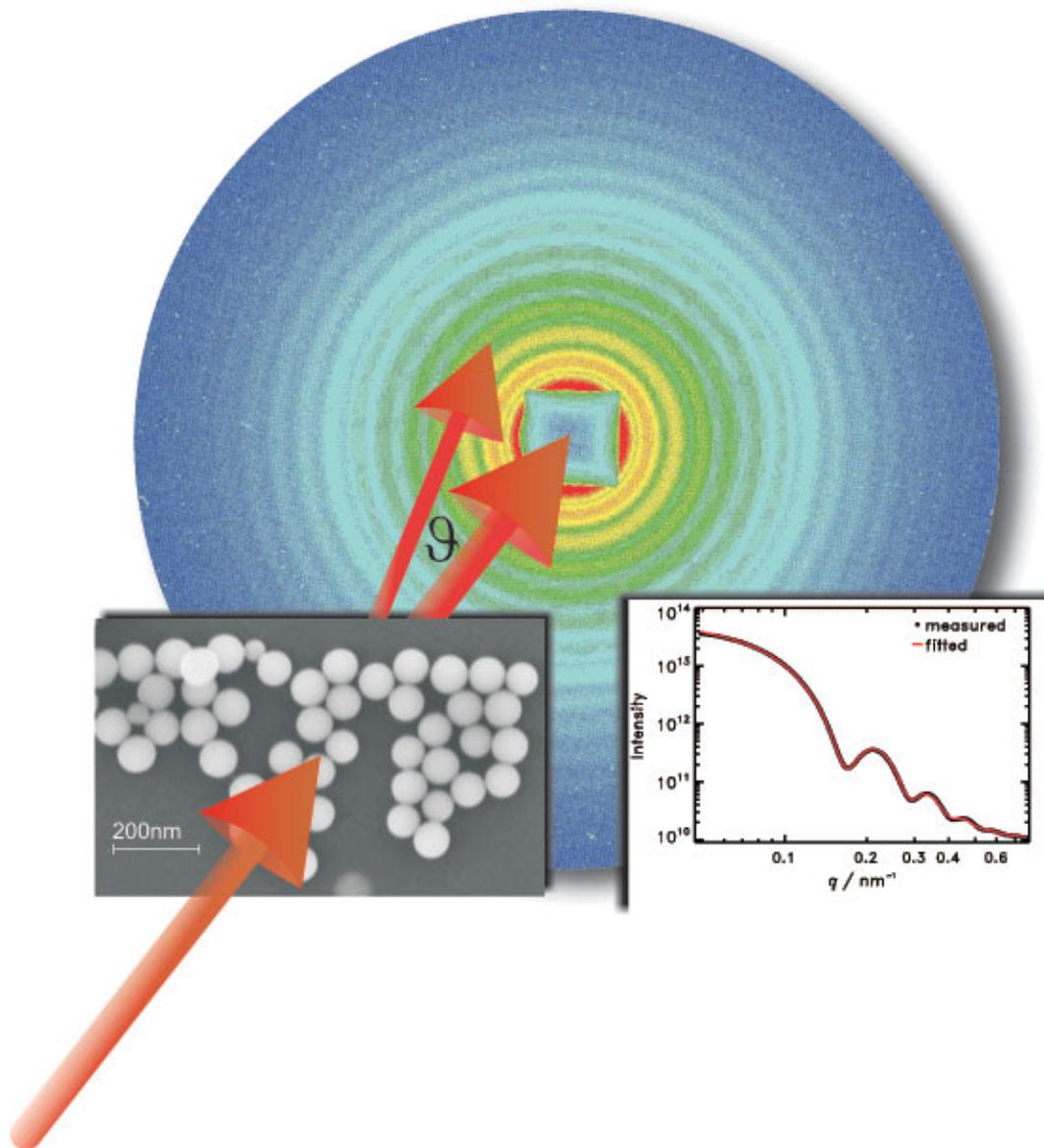
### Neue Wege zur Koordinierung von Forschung auf dem Gebiet der Dosimetrie ionisierender Strahlung

Die *European Radiation Dosimetry Group* (EURADOS) wurde bereits 1981 gegründet, um Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Dosimetrie ionisierender Strahlung zu koordinieren. Sie wurde über viele Jahre durch die Europäische Kommission gefördert und ist mittlerweile ein Netzwerk von etwa 50 Instituten aus praktisch allen Ländern Europas. Seit 2008 ist EURADOS als eingetragener Verein (e.V.) in Braunschweig mit Sitz in der PTB registriert. (H. Schuhmacher, FB 6.5, helmut.schuhmacher@ptb.de)

### Metrologie ionisierender Strahlung im Sub-Mikrometer-Bereich: Biology meets Physics

Das Verständnis des Zusammenhangs von mikroskopischer Struktur der Teilchenspur ionisierender Strahlung und deren biologischer Strahlenwirkung ist für die Strahlenbiologie und einige zukunftsweisende Bereiche der Strahlenmedizin von großer Bedeutung. Um die Vernetzung wichtiger Forschungsgruppen auf europäischer Ebene in einem interdisziplinären Netzwerk voranzutreiben, lud die PTB vom 8.-10. Juni 2009 zum 249. PTB-Seminar „International Workshop on Current Challenges to the Metrology of Ionizing Radiation in Sub-Micrometer Dimensions“ nach Braunschweig ein. (H. Rabus, FB 6.6, hans.rabus@ptb.de)

# Temperatur und Synchrotron- strahlung



Berichte der Abteilungen

Abteilung

# Temperatur Synchrotron

## Institut Berlin

Das Jahr 2009 stand für das Institut Berlin der PTB im Zeichen langfristig wirkender Entscheidungen. Die eine, der Kauf des Geländes des Willy-Wien-Laboratoriums in Berlin-Adlershof, hat sich eher im Hintergrund abgespielt. Dieser Schritt signalisiert aber, dass die PTB ihr Engagement in der Nutzung der Synchrotronstrahlung als metrologisches Werkzeug für unterschiedlichste Aufgaben über Abteilungsgrenzen hinweg und auf lange Sicht als wichtige gemeinschaftliche Aktivität sieht. Dies wird auch dadurch deutlich, dass das erworbene Gelände Ausbaumöglichkeiten sowohl für weitere Strahlrohre als auch für die Unterbringung von zusätzlichem Personal bietet.

Die andere Entscheidung war die Entwicklung eines Masterplans für die langfristige Gestaltung des PTB-Campus in Charlottenburg. Angesichts der 30 am Wettbewerb beteiligten Architekturbüros wurde dieser Plan in Rekordzeit innerhalb eines halben Jahres aufgestellt und am 23. November vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung der PTB feierlich übergeben. Bild 1 zeigt eine Ansicht des vom Wettbewerbsgewinner, der kleyer.koblitz.letz.el.freivogel gesellschaft von architekten mbH, angefertigten Modells mit dem Blick vom Hermann-von-Helmholtz-Bau über die Abbestraße nach Südosten zum Observatorium. Ziel des Masterplans war die

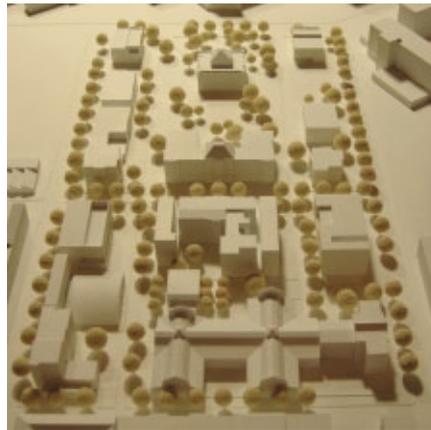


Bild 1: Siegermodell des Masterplanwettbewerbs für die Entwicklung des PTB-Campus in Charlottenburg

städtebauliche Einordnung der künftigen Baumaßnahmen der PTB in die sich ebenfalls entwickelnde Charlottenburger Umgebung unter gebührender Respektierung des denkmalgeschützten baulichen Erbes der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Um den parkähnlichen Charakter des Stammgeländes zu erhalten, wird am Nordeingang ein Infrastrukturgebäude errichtet, das die Nutzung vieler bisher verstreuter Kleinstgebäude konzentriert. Die Tieftemperaturphysik und Kryosensorik benötigen aufgrund der inzwischen gutachterlich festgestellten Abgängigkeit des Emil-Warburg-Baus ein neues Forschungsgebäude am südlichen Ende der Abbestraße, den künftigen Walther-Meißner-Bau. Zwei quer zur verkehrsberuhigten Abbestraße angelegte Sichtachsen werden die Zusammengehörigkeit der beiderseitigen Geländeteile betonen. Die Funktion des Berliner Instituts als Hauptstadtrepräsentanz und Schauplatz vielfältiger insbesondere auch europäischer Tagungen wird mittelfristig durch ein Seminarzentrum mit Cafeteria,

**Titelbild:**  
Nanometrologie:  
Röntgenkleinwinkelstreuung (SAXS = small angle X-ray scattering) mit Synchrotronstrahlung (am Speicherring BESSY II) ist eine ideale Methode zur Bestimmung der Größe von Nanopartikeln und ihrer Größenverteilung.

# und nstrahlung

historischer Messgerätesammlung und Bibliothek verteilt auf zwei „Torhäuser“ an der Marchstraße ausgebaut. Dass sich die PTB nach langer Verborgenheit „hinter ihrer Mauer“ dadurch sichtbar öffnet und städtebaulich in die Charlottenburger City-West integriert, für die derzeit ebenfalls ein Masterplan erstellt wird, wurde von Stadtrat Schulte in seinem Beitrag sehr positiv vermerkt (Bild 2).



Bild 2: Marc Schulte, Stadtrat für Wirtschaft, Ordnungsangelegenheiten und Weiterbildung des Berliner Bezirks Charlottenburg-Wilmersdorf, begrüßt den Masterplan für den PTB-Campus Charlottenburg

Bei der dritten langfristigen Festlegung der PTB, die schon einige Zeit zurückliegt, nämlich sich wesentlich am Experimental and Clinical Research Center (ECRC) des Max-Delbrück-Centrums und der Charité in Berlin-Buch zu beteiligen, konnte am 20. Januar der neue 7-Tesla-Hochfeld-Magnetresonanztomograph der Öffentlichkeit vorgestellt und im Beisein von Dr. Annette Schavan, Bundesministerin für Bildung und Forschung, und Dr. Hans-Gerhard Husung, Staatssekretär für Wissenschaft und Forschung beim Berliner Senat, eingeweiht werden. Die zum Jahresende vorgenommenen Beschaffung eines moder-

nen 3-Tesla-Tomographen, der im „Quarzhrenkeller“ des Observatoriums seinen 15 Jahre alten Vorgänger ersetzt, unterstreicht auch diese klare Weichenstellung in der Abteilung 8 für die Forschung an bildgebenden Verfahren für die Medizin.

Auch die Temperatur und mit ihr verwandte Messgrößen als zentrale Aufgaben des Berliner Instituts haben ihren Stellenwert im abgelaufenen Jahr demonstrieren können, als am 23. Juni das Helmholtz-Symposium mit dem Hauptthema „Temperatur“ in den Räumen der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften mit Vorträgen der Professoren Hänggi, Hasinger und Miller veranstaltet und anschließend der Helmholtz-Preis 2009 verliehen wurde. Tags darauf begann in Charlottenburg die zweitägige Tagung „Temperatur 2009“, bei der sich die einschlägige Wissenschaft und Industrie aus dem deutschsprachigen Raum in dreijährigem Rhythmus über Forschungsergebnisse und zukünftige Entwicklungen austauschen (Bild 3).



Bild 3: Die beiden Organisatoren der „Temperatur 2009“, Dr. Jörg Hollandt und Dr. Steffen Rudtsch.

Am 30. April war das Institut Gastgeber für ein ganztägiges Seminar „Messen, Prüfen, Kalibrieren“, das das regionale Kompetenznetz für Optische Technologien OpTecBB zusammen mit dem Netzwerk der Metall- und Elektroindustrie des BDI zum Thema „Optische Mess- und Prüftechnik“ veranstaltet hat. Am 15. Juni besichtigten ca. 30 Mitglieder der „Berliner Wirtschaftsgespräche“, einem renommierten überparteilichen Berliner Bildungs- und Diskussionsforum, eine Reihe von Laboratorien der PTB und hatten viele interessierte Fragen.

Kurz davor, am 13. Juni, fand wie jeden Sommer die Lange Nacht der Wissenschaften statt, bei der die PTB im Willy-Wien-Laboratorium in Berlin-Adlershof (Bild 4) um die Metrology Light Source herum eine Ausstellung mit vielen Stationen zum Thema „Das rechte Maß am Himmel“ aufgebaut hatte (Bild 5). Weit über tausend Besucher, unter ihnen auch viele hochmotivierte kleine Forscher (Bild 6), ließen sich über den metrologischen Beitrag der PTB zur Weltraumforschung unterrichten.



Bild 4: Das Willy-Wien-Laboratorium in Berlin-Adlershof während der Langen Nacht der Wissenschaften.

Bild 5: Dr. Hartmann erklärt die Kalibrierung von Wärmebildkameras.



Bild 6: Kleine Forscher bauen sich unter fachmännischer Anleitung ein Kaleidoskop.

Zu Anfang des Jahres am 13. Januar machte der Minister für Wissenschaft und Technologie aus Äthiopien Juneydi Saddo anlässlich eines Besuchs bei der Bundesregierung einen Abstecher ins Institut Berlin und ließ sich über die Aktivitäten der PTB bei der Technischen Zusammenarbeit, in der Radiometrie und Erdbeobachtung aus dem Weltraum sowie der Blutzellenzählung unterrichten (Bild 7). Ende des Jahres am 11. Dezember wurde das Fassungsvermögen des Hörsaals und der Galerie im Hermann-von-Helmholtz-Bau auf die Probe gestellt, als ca. 250 Gäste, darunter viel Prominenz aus der Berliner Politik und der Wissenschaftslandschaft, zur Verabschiedung des Institutsleiters Dr. Wolfgang Buck in den Ruhestand zusammenkam (Bild 8). Prof. Dr. Jürgen Mlynek sprach über die „Großen Fragen“ der Wissenschaft und Gesellschaft, die große Forschung notwendig machten, und daraus resultierende Anforderungen an die Metrologie. Dr. Terry Quinn (Director emeritus des BIPM) berichtete über die spannende Geschichte der Entstehung der Meterkonvention als Basis der internationalen Metrologie und die maßgebliche deutsche Beteiligung durch Wilhelm Foerster, den damaligen Direktor der kaiserlichen Normal-Eichungskommission. Mit diesen Themen wurden zwei der „Koordinaten“ des multidimensionalen Raums illustriert, in dem die deutsche Metrologie mit der PTB an der Spitze historisch eine wichtige Rolle spielte, aber auch in Gegenwart und Zukunft spielen muss.



Bild 7: Minister Junedy Saddo aus Äthiopien (Mitte) im Strahlungsthermometrie-Laboratorium



Bild 8: Redner und Gäste bei der Verabschiedung des Berliner Institutsleiters; oberes Bild: (v. re.) Prof. Mlynek (Helmholtz-Gemeinschaft), Prof. Wilkens (Physikalische Gesellschaft zu Berlin), Petra Merkel (MdB), zweite Reihe v. re. Frau Prof. Kaysser-Pyzalla (Helmholtz-Zentrum Berlin), Prof. Tränkle (Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik) und Bezirksbürgermeisterin Thiemen; unteres Bild: Dr. Terry Quinn (Director emeritus des BIPM) und seine Frau.



### Abteilung 7 „Temperatur und Synchrotronstrahlung“

Quer zu den metrologischen Basisaufgaben entwickeln sich über die Abteilungsgrenzen hinweg Allianzen in der PTB zur Bearbeitung aktueller metrologischer, aber auch gesellschaftlicher Fragen. Auch sie erhalten im folgenden Bericht eigene Kapitel. Einen neuen Schwerpunkt im Portfolio der Abteilung 7 bildet dabei die Nano-Metrologie, für die hauptsächlich die apparativen Möglichkeiten der Synchrotronstrahlung der Speicherringe BESSY II und Metrology Light Source in Berlin-Adlershof genutzt werden (siehe Titelbild).

#### Nano-Metrologie

Die Wellenlängen der Synchrotronstrahlung des Speicherrings BESSY II im weichen Röntgengebiet eignen sich ideal zur Bestimmung der Größe und der Größenverteilung von Nanopartikeln. Bei Teilchen aus Metall mit üblicherweise hoher Kernladungszahl erhält man mit Röntgen-Kleinwinkelstreuung (SAXS) kontrastreiche Beugungsdiagramme, die sich gut auswerten lassen. Dies wird aber schwierig bei organischen Materialien, die wegen des wesentlich geringeren Kontrasts zur Umgebungslösung eine Herausforderung an die Messtechnik darstellen. Man erreicht derzeit Unsicherheiten beim Teilchendurchmesser von 1 %. Für bessere Resultate bei solchen Untersuchungen wurde die Beschaffung eines hochauflösenden Detektors genehmigt.

Die Untersuchung von partikelförmigen nanoskaligen Kontaminationen auf Halbleiteroberflächen wurde mit verfeinerten Methoden der Totalreflexionsröntgenfluoreszenz in Angriff genommen. Mit Hilfe von gut charakterisierten Vergleichsproben ließen sich die von den Kontaminationen verursachten Effekte studieren und aufklären.

Der Spektralbereich des Extremen Ultraviolett (EUV) ist mit seiner Wellenlänge um 13 nm geradezu exemplarisch für das Gebiet der Nanometrologie. Man nutzt diese Strahlung sowohl in der Scatterometrie, um periodische Strukturen von Halbleiterphotomasken zu charakterisieren (z. B. im Rahmen des CDur32-Projekts), als auch zur Charakterisierung von optischen Komponenten für die

EUV-Lithographie, mit deren Hilfe man die künftigen Generationen von Speicherchips belichten will. Die Abbildung der Masken kann in diesem Wellenlängenbereich nicht mit Linsen erfolgen, sondern man muss Spiegel verwenden, deren Oberflächengüte besser sein muss als die verwendete Wellenlänge. Um die nötige Lichtleistung für die geforderten hohen Belichtungsraten erreichen zu können, werden die Spiegeldurchmesser immer größer. Die derzeit größten ihrer Art mit einem Durchmesser von 670 mm können im EUV-Reflektometer der PTB gerade noch untersucht werden. Weitere optische Komponenten wie spezielle Sensoren werden zur Optimierung der Belichtung benötigt. Dabei ist die Kenntnis sowohl ihrer spektralen Empfindlichkeit an sich als auch deren Langzeitstabilität unter EUV-Bestrahlung von Interesse. Solche Untersuchungen wurden zusammen mit dem Stepper-Hersteller ASML und der Technischen Universität Delft an Prototypen durchgeführt.

Zur Absicherung der eigenen Unsicherheitsbetrachtungen dienen internationale Vergleiche. So konnte der im Rahmen des Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR) von der PTB geleitete Pilotvergleich der spektralen Empfindlichkeit mit dem NIST (USA) und dem NMIJ (Japan) im EUV-Spektralbereich von 11,5 nm bis 20 nm erfolgreich abgeschlossen werden. Ein breiter angelegter Schlüsselvergleich im Bereich von 10 nm bis 200 nm soll auf dieser Grundlage für einen späteren Zeitpunkt vorbereitet werden.

#### Radiometrie

Für die „quellengestützte“ Radiometrie benötigt man charakterisierte und berechenbare Strahlungsquellen. Hier wurden systematisch weitere Schritte unternommen, um aus der 2008 in Betrieb genommenen Metrology Light Source (MLS) ein primäres Strahlungsnormale zu machen. Der Vergleich mit einem Empfänger-Primärnormal, einem sog. Kryoradiometer, ergab im infraroten und sichtbaren Spektralbereich eine hervorragende Übereinstimmung von 0,5 %. Wichtig für die Berechenbarkeit des Photonenflusses ist auch die Größe und Lagestabilität des Quellpunktes der Synchrotronstrahlung, die durch die entsprechenden Parameter des im Magne-

ten abgelenkten Elektronenstrahls gegeben sind. Deren Bestimmung ist durch ein neues optisches System mit hoher Präzision bis zu kleinsten Strahlströmen von nur noch einem Elektron möglich.

Nicht nur an den Speicherringen BESSY II und MLS verwendet die PTB ihre radiometrische Expertise zur Bestimmung der Photonenflüsse. Bereits in den vorangegangenen Jahresberichten, aber auch in renommierten Zeitschriften wurde über den von der PTB mit Partnern entwickelten Gas-Monitor-Detektor (GMD) berichtet, der in der Lage ist, höchste Photonenflüsse von Freien-Elektronen-Lasern (FEL) wie FLASH in Hamburg zu bestimmen. Nun konnte dieser Detektor am japanischen FEL Spring8 erstmals mit einem elektrisch kalibrierten Kryoradiometer des AIST verglichen und innerhalb der abgeschätzten Unsicherheit validiert werden.

Mit den Methoden der „klassischen“ Metrologie beteiligt sich die Abteilung 7 zusammen mit anderen Bereichen der PTB an einem EU-geförderten Projekt „Candela: Towards quantum-based photon standards“, das den ehrgeizigen Versuch unternimmt, höchstempfindliche konventionelle Radiometrie mit der Bestimmung von Photonenflüssen durch Einzelquantenzählung zu verbinden. Hierzu soll als TransfERNormal mit hoher Dynamik ein „berechenbarer“ Detektor entwickelt werden. Eine erste Charge neuartiger Silicium-Photodioden wurde bei tiefen Temperaturen und im Vakuum auf ihre Eignung hierfür untersucht. Als unverzichtbares Hilfsmittel hierfür wurde eine Laserquelle entwickelt, die

eine Leistungsstabilität von  $10^{-5}$  im Stundenbereich garantiert (Bild 9).

Dass die PTB auch bisher schon eines der renommiertesten Radiometrie-Laboratorien besitzt, wurde im vergangenen Jahr durch das Interesse anderer Metrologieinstitute an der Rückführung ihrer Filtrerradiometer auf die PTB-Skala der spektralen Empfindlichkeit im Spektralbereich von 400 nm bis 1000 nm deutlich. Frankreich, Russland und China stützen sich auf die PTB ab, u. a. um thermodynamische Temperaturmessungen zur Bestimmung der Schmelzpunkte von Metall-Kohlenstoff-Eutektika als Fixpunkte einer künftigen Hochtemperaturskala durchzuführen.

### Metrologie für die Weltraumforschung

Mit langer Tradition nutzte die PTB ihre messtechnischen Möglichkeiten in der Radiometrie für die Unterstützung von astronomischen und Weltraummissionen auf höchstem metrologischem Niveau auch im abgelaufenen Jahr.

Die für einen Start im Jahr 2013 vorgesehene BepiColombo-Mission der ESA soll den Planeten Merkur umfassend erkunden. Dafür wurden hochauflösende Röntgendetektoren für die Röntgenfluoreszenzanalyse der Merkur Oberfläche vom Max-Planck-Institut Halbleiterlabor in München-Neuperlach im Energiebereich zwischen 100 eV und 15 keV am Speicherring BESSY II charakterisiert und kalibriert. Im Infraroten soll das Spektrometer MERTIS die felsbildenden Materialien auf

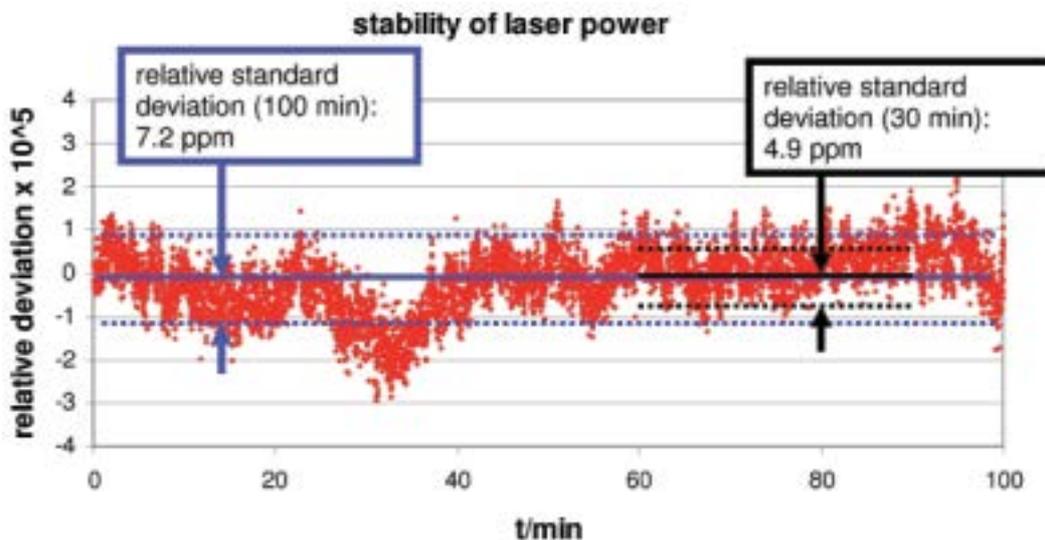


Bild 9: Leistungsstabilität des für die Kalibrierung der berechenbaren Empfänger entwickelten Diodenlasers von <10 ppm über 30 Minuten.

dem Quecksilber analysieren und deren Temperatur messen. Zur On-flight-Kalibrierung dieses Spektrometers wurden zwei bei 300 °C und 700 °C arbeitende Hohlraumstrahler zusammen mit der Herstellerfirma untersucht und optimiert und der beabsichtigte hohe Emissionsgrad erreicht.

Das Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik in Freiburg hat ein robustes Photoemissionskugelspektrometer für den Satelliteneinsatz entwickelt, um mit dessen Hilfe die Intensität der Sonneneinstrahlung im VUV- und EUV-Bereich zu verfolgen u. a. mit dem Ziel, durch Schwankungen verursachte Störungen des Satellitenbetriebs kurzfristig vorhersagen zu können. Der Beitrag der PTB besteht hierbei in der hochwertigen Charakterisierung der spektralen Empfindlichkeit dieses Instruments.

Ebenfalls zum Monitoring der Intensität der Sonneneinstrahlung wird das vom Weltstrahlungszentrum (WRC) am Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos vorbereitete Mikrosatellitenprojekt PICARD mit seinen Filterradiometern im PREMOS-Modul eingesetzt. Diese Radiometer wurden im UV- und im IR-Spektralbereich an der Hochleistungs-Plasma-Strahlungsquelle der PTB mit höchster Präzision kalibriert (Bild 10). Ohne eine solche aufwendige Kalibrierung sind aussagekräftige Langzeitmessungen der klimarelevanten solaren Strahlung nicht möglich.

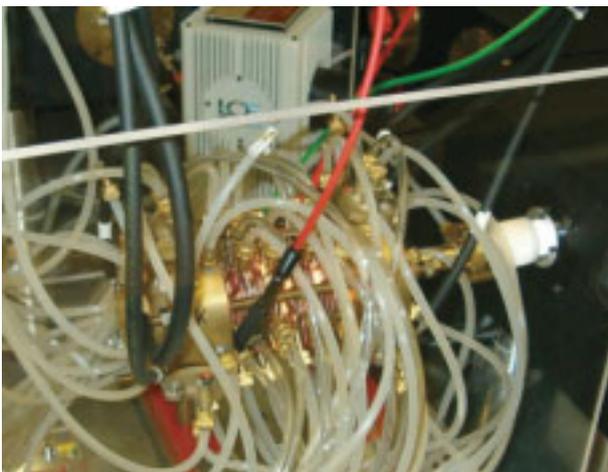


Bild 10: Höchstleistungs-Plasma-Strahlungsquelle für die Präzisionsradiometer-Kalibrierung

## Terahertz-Metrologie

Die im Jahre 2007 gebündelten Aktivitäten der PTB in Abteilung 2 und Abteilung 7 auf dem Gebiet der Terahertz-Metrologie haben sich in kooperativer Weise sehr positiv entwickelt. Dies wurde auch vom Präsidium der PTB in seiner Stellungnahme zur aktuellen Arbeitsplanung hervorgehoben.

In der Abteilung 7 konnte zum ersten Mal ein kommerzieller Molekülgaslaser eines führenden Herstellers kalibriert werden, indem seine Ausgangsleistung bei 2,5 THz mit einem rückgeführten Transferempfänger bestimmt wurde. Dieser Empfänger war zuvor mit einem geeigneten Kryoradiometer verglichen worden, das ein primäres Empfängernormal für die Leistungsmessung elektromagnetischer Strahlung darstellt.

Wie im letzten Jahr berichtet, wurde an der als Terahertz-Quelle optimierten Metrology Light Source im Willy-Wien-Laboratorium der PTB in Berlin-Adlershof an einem Infrarot-Strahlrohr erstmals auch Terahertz-Strahlung für Nutzer zur Verfügung gestellt. Zusätzlich konnte ein in seiner Geometrie speziell für Terahertz-Strahlung ausgelegtes Strahlrohr in Betrieb genommen werden und liefert um bis zu hundertfach höhere THz-Leistung als die hierfür üblicherweise an anderen Speicherringen verwendeten Strahlrohre (Bild 11).

## Thermometrie bei hohen und bei tiefen Temperaturen

Die Überschrift dieses Abschnitts soll in keiner Weise signalisieren, die Abteilung würde ihre wichtigen Dienstleistungen wie unterschiedlichste Kalibrierungen für Industrie und Gesellschaft im Rahmen des Subsidiaritätsprinzips vernachlässigen. Es gilt allerdings wie in früheren Jahren, dass die spektakulären Entwicklungen eher an den Rändern dieses Temperaturbereichs stattfinden.

So konnte u. a. im Rahmen einer zusammen mit der BAM betreuten Dissertation gezeigt werden, dass der Einfluss von Verunreinigungen im ppm-Bereich auf die Schmelztemperatur von Metallen, die nach der Internationalen Temperaturskala von 1990 (ITS-90) als Temperaturfixpunkte bei hohen Temperaturen verwendet werden, nicht nur von der

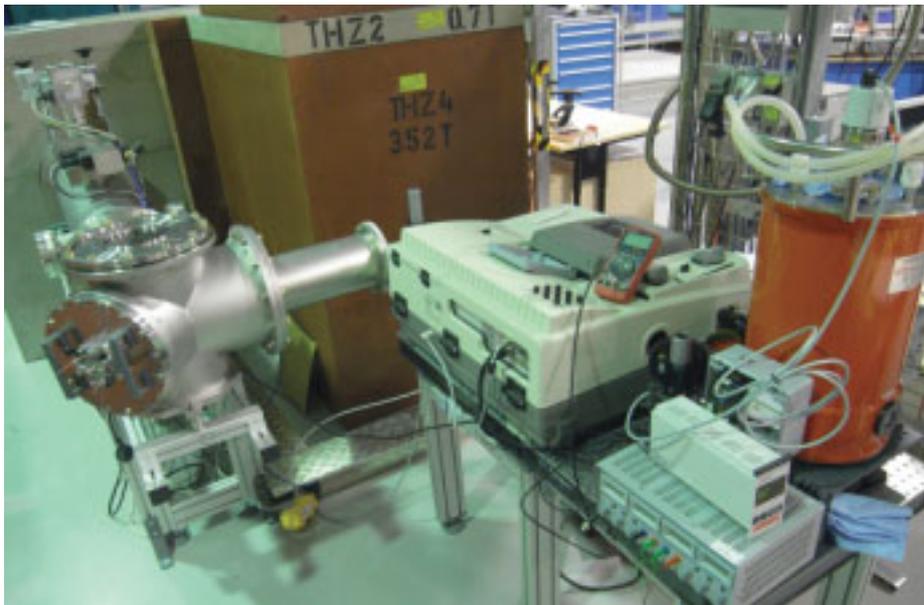
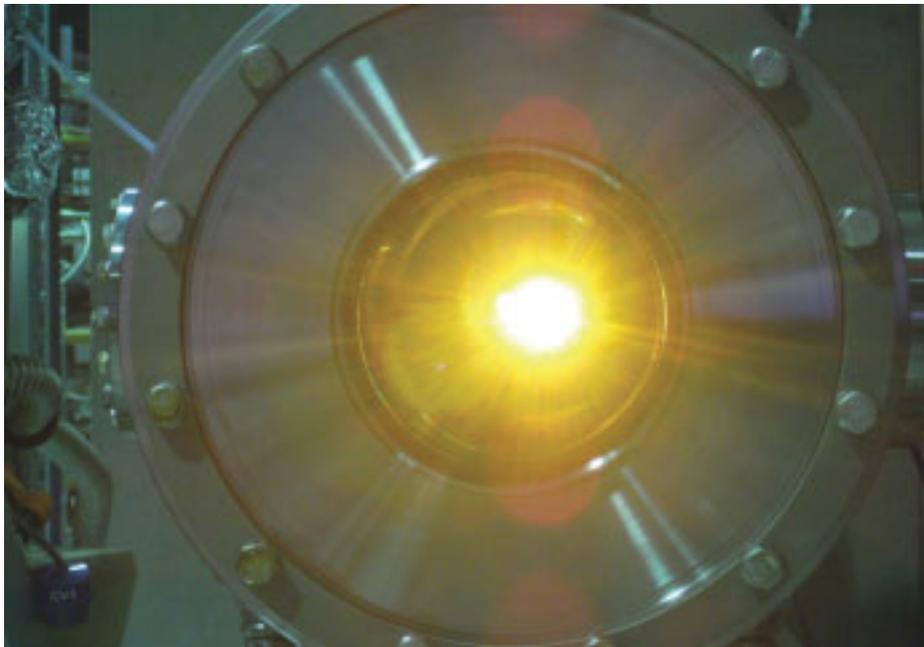


Bild 11: Terahertz-Strahlrohr an der Metrology Light Source mit hoher Strahlungsleistung (Strahlrohr-ende siehe unteres Bild).



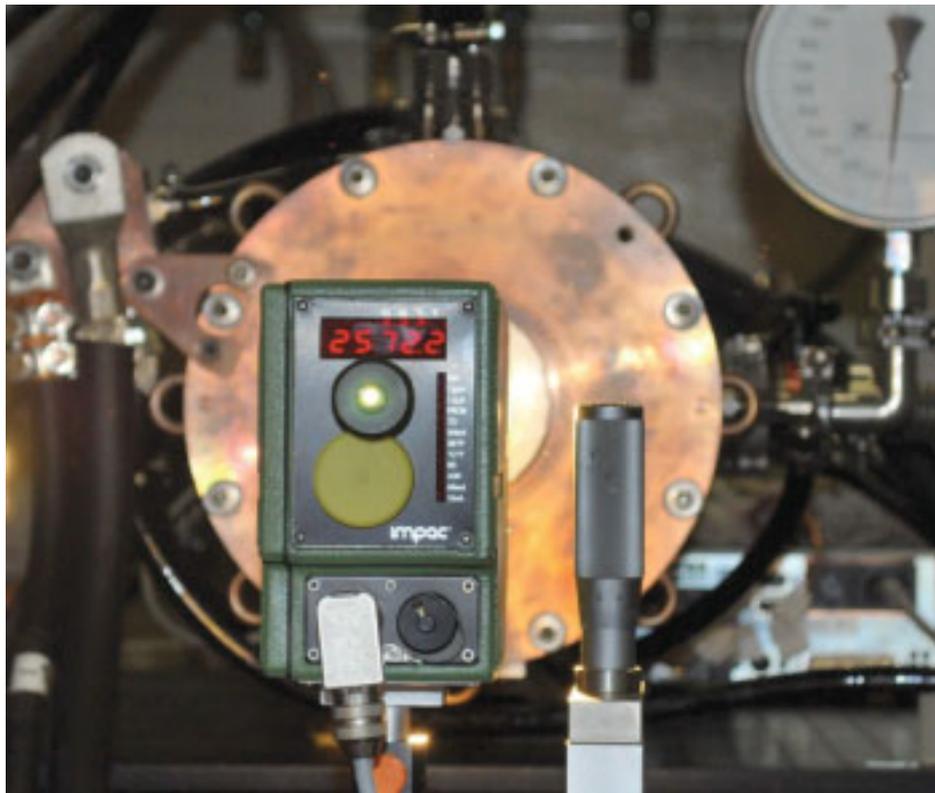
Verunreinigungskonzentration, sondern u. a. auch von ihrem Oxidationsgrad abhängt. Damit liefern z. B. massenspektroskopische Bestimmungen der Konzentration von Verunreinigungen, die in Zusammenarbeit mit der BAM mit einer bisher nicht erreichten Unsicherheit von 30 % ermittelt werden konnten, nur Anhaltspunkte für die Korrektur der Schmelztemperatur einer vorliegenden Fixpunktzelle. Der wirkliche Einfluss einer Verunreinigung hängt auch von ihrer Affinität beispielsweise zu Sauerstoff und von der beim Herstellungsprozess zugelassenen Sauerstoffmenge ab. Die genauen Zusammenhänge, die die Grundlagen der Metallurgie betreffen, müssen weiter untersucht werden,

wenn man kontrollierte Verbesserungen der Darstellung der ITS-90 erreichen will.

Auch beim Technologietransfer konnte mit dem Abschluss eines durch ProInno geförderten Projekts zur Entwicklung eines Hochtemperaturofens ein beachteter Erfolg erzielt werden. Der bis maximal 3000 K einsetzbare Ofen mit einer strahlenden Öffnung von 50 mm Durchmesser ist hervorragend für den Betrieb von Metall-Kohlenstoff-Fixpunkten geeignet und in der Industrie oder im Forschungslabor flexibel verwendbar (Bild 12).

Die Gasthermometrie ist an sich ein primäres Verfahren zur Bestimmung der Temperatur in weiten Temperaturbereichen. Die ITS-90

Bild 12: Hochtemperaturofen für Temperaturfixpunkte bis 3000 K im Betrieb, im Vordergrund Temperaturmessung mit Strahlungsthermometer



verwendet das Gasthermometer im Bereich zwischen 3 K und 25 K auch als Interpolationsinstrument. Die PTB betreibt eine besondere Variante dieser Messmethode, das Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer (DCGT), über viele Jahre und inzwischen in der zweiten Generation. Damit konnten erstmals Messungen über den von der ITS-90 vorgesehenen Bereich hinaus bis 36 K durchgeführt werden, um dort die Realgaseigenschaften von  $^4\text{He}$  zu ermitteln. Dies ist der erste Schritt, um experimentell die Polarisierbarkeit des Gases Neon an die ab initio berechnete Polarisierbarkeit von Helium anzuschließen. Eine auf diese Weise ermittelte Polarisierbarkeit von Neon könnte wegen ihres im Vergleich zu Helium deutlich höheren Wertes die Unsicherheit der Bestimmung der Boltzmann-Konstanten mit dem DCGT am Wassertripelpunkt weiter verringern.

Im Bereich noch tieferer Temperaturen zwischen 1 K und 0,001 K ist es der PTB, wie im Jahresbericht 2006 angekündigt, in Zusammenarbeit mit der Universität Heidelberg und einer Firma gelungen, ein sehr anwenderfreundliches Thermometer kommerziell auf den Markt zu bringen, das eine sehr hohe Linearität über den gesamten o. g. Temperaturbereich (Bild 13) besitzt: das Magnetfeld-Fluktuationsthermometer (MFFT). Es hat sich

gezeigt, dass seine untere Einsatzgrenze offenbar noch nicht erreicht ist und deshalb Gegenstand weiterer Untersuchungen sein wird. Außerdem wurde in Kooperation mit der Helsinki University of Technology ein neuartiges Coulomb-Blockaden-Thermometer (CBT) im Bereich zwischen 8 mK und 1 K untersucht, dessen Temperaturangaben gut mit der in diesem Bereich gültigen Skala PLTS-2000 übereinstimmen. Wenn sich auf Grund dieser Ergebnisse die bei der Modellierung des Thermometerverhaltens angewandte Beschreibung der Elektron-Phonon-Wechselwirkung als belastbar erweist, kann das CBT auch als primäres Thermometrieverfahren genutzt werden.

Die Position der PTB bei der Tieftemperaturthermometrie ist seit vielen Jahren so etabliert, dass sie als der für die Metrologie zuständige Partner in einem innerhalb des 7. Rahmenprogramms der EU geförderten vierjährigen Projekts „European Microkelvin Collaboration“ einbezogen wurde, das von finnischen Kollegen geleitet wird. Um die Ziele dieses Projekts und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten für andere Nutzer darzustellen und ausführlich zu diskutieren, fand am 10. Dezember das gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie organisierte PTB-Seminar „Physics

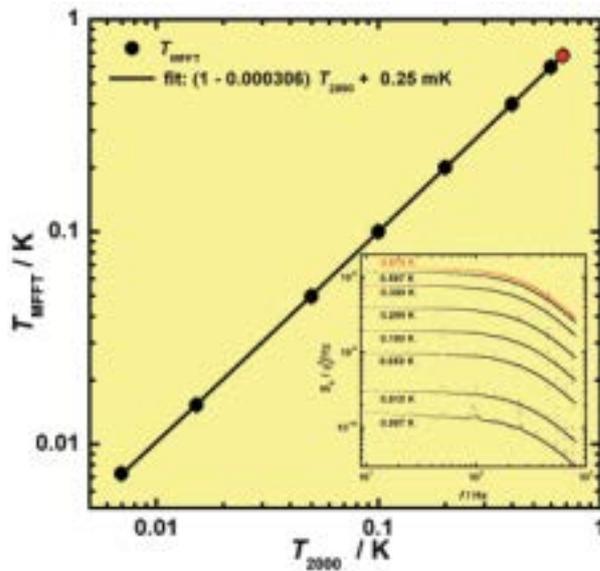


Bild 13: Das MFFT (magnetic field fluctuation thermometer), ein über drei Größenordnungen lineares praktisches Thermometer für ultra-tiefe Temperaturen. Das untere Foto zeigt den Sensorchip auf seiner hochreinen Kupferbasis.

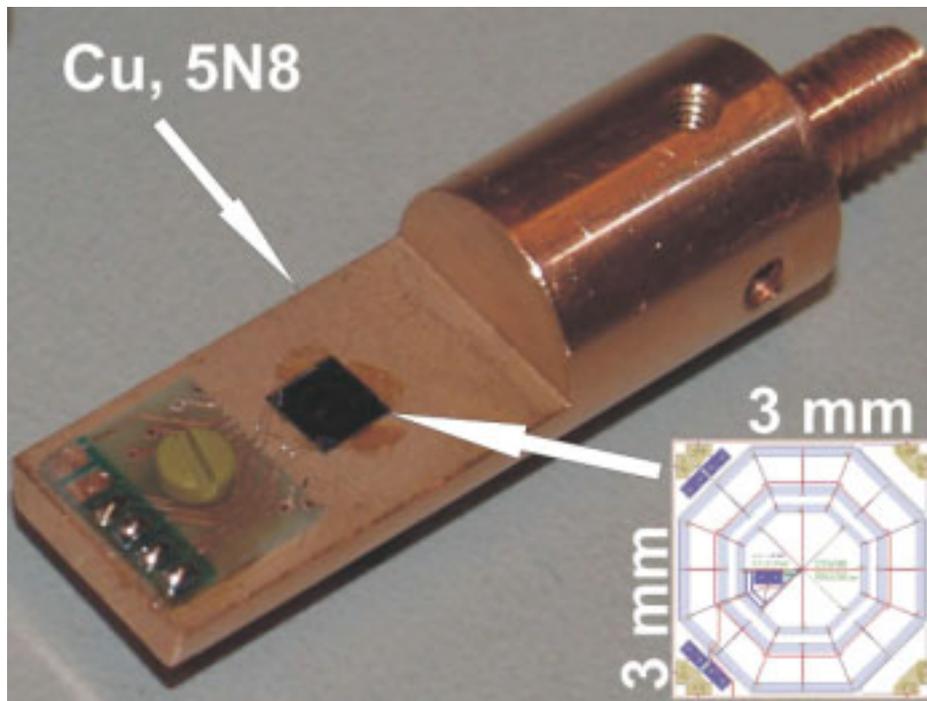


Bild 14: Die Teilnehmer des PTB-Seminars „Physics and Metrology at Very Low Temperatures“ am 10. Dezember 2009



and Metrology at Very Low Temperatures“ mit europäischer Beteiligung statt (Bild 14).

Dass die PTB im Bereich der Thermometrie insgesamt eine führende Stellung einnimmt, lässt sich nicht nur an der Spannweite der bearbeiteten und nur zum Teil hier beschriebenen Fragestellungen und dem weltweit breitesten experimentell verfügbaren Temperaturbereich festmachen, sondern auch an den 120 engagierten Teilnehmern der im Kapitel „Institut Berlin“ schon erwähnten seit vielen Jahren von der PTB ausgerichteten Tagung „Temperatur“.

### Das Boltzmann-Projekt

Der apparative Aufbau zur Bestimmung der Boltzmann-Konstanten bei der Temperatur des Wassertripelpunktes geht überwiegend planmäßig voran. Der zusammen mit dem italienischen Staatsinstitut INRiM entwickelte Thermostat mit großem Arbeitsvolumen (Innendurchmesser 500 mm, lichte Höhe 750 mm) hat nach einigen Anfangsschwierigkeiten seine Spezifikationen, was Temperaturstabilität und -homogenität von jeweils 1 mK angeht, deutlich unterboten. In Fachkreisen wird er wegen seiner Dimensionen bewundernd schon als „Monster-Thermostat“ gehandelt (Bild 15). Die kritische Unsicherheit der Druckmessung für das Boltzmann-Projekt konnte um den Faktor 3 verbessert werden, ist aber für das Ziel einer Gesamtunsicherheit von  $2 \cdot 10^{-6}$  noch nicht ausreichend, während die Hausaufgaben der Kapazitätsmessung mit einer Unsicherheit der Relativmessung von  $1 \cdot 10^{-9}$  erledigt sind. Hier ist die Korrigierbarkeit der effektiven Kompressibilität der verwendeten Kondensatoren noch offen.

Ende September fand in Turin der diesjährige Statusworkshop des internationalen Boltzmann-Projekts zur genaueren Bestimmung der Boltzmann-Konstante statt, mit deren Hilfe man die Basiseinheit der Temperatur, das Kelvin, neu definieren möchte. Kurz gefasst ist nach 22 Fachvorträgen der derzeitige Stand, dass diejenigen Institute, die das Akustische Gasthermometer verwenden, mit dem 1988 der derzeitige verwendete Wert der Boltzmann-Konstanten ermittelt worden war, ihre Messaufbauten zunehmend identisch gestalten und bisher auch in den Ergebnissen bis auf  $3 \cdot 10^{-6}$  übereinstimmen. Die anderen Methoden wie das DCGT der PTB oder das in

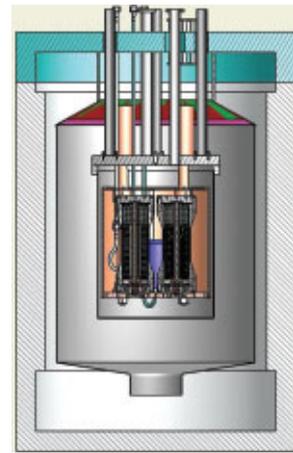


Bild 15: Der „Monster-Thermostat“ für das Boltzmann-Experiment als Prinzipskizze und in Funktion

Italien und Frankreich an Universitäten entwickelte Doppler-Verbreiterungsthermometer liegen mit ihrer Unsicherheit bisher noch um eine Größenordnung vom angestrebten Ziel mit  $1 \cdot 10^{-6}$  entfernt.

### Thermische Energie

Im Bereich der thermischen Energie, in dem Durchflussmessungen des Energietransportmediums – meistens Wasser – mit den Temperaturunterschieden von Vor- und Rücklauf verrechnet werden, wurde anstelle der zeitaufwendigen, weil punktrasternden Laser-Doppler-Velozimetrie zur Bestimmung des Strömungsprofils ein ebenfalls laseroptisches, aber Ganzfeldmessverfahren, die Particle Image Velocimetry (PIV), erprobt. Erste Ergebnisse lassen eine Reduzierung der Messzeit aus dem Stunden- in den Minutenbereich bei einer Messunsicherheit von 1 % erwarten.

War die Anwendung der Strömungsmesstechnik für die thermische Energie bisher eher auf Fernwärme- und Fernkälteverteilungsnetze gerichtet, so gerät mittlerweile die Optimierung der Steuerung der Kraftwerke selbst in den Fokus. Dabei geht es im Prinzip um die gleichen Messmethoden, allerdings bei viel höheren Temperaturen und damit verbunden auch viel höheren Drücken. Deshalb baut die PTB eine Messanlage auf, die die Untersuchung von Durchfluss-Sensoren unter realistischen Bedingungen zunächst bei Temperaturen bis zu 230 °C ermöglicht. Aktuelle Studien schätzen, dass am Ende der angestrebten Untersuchungen der Wirkungs-

grad eines Kraftwerks um 2 % gesteigert werden könnte. Auch europaweit hat die Problematik erhebliche Bedeutung. So ist vor wenigen Wochen im Rahmen des Aufrufs für Projekte zur „Metrologie im Energiesektor“ als Teil des Europäischen Metrologie-Forschungsprogramms EMRP ein mehrere Mio. Euro umfassendes Forschungsprojekt mit dem Thema „Metrology for Improved Power Plants“ von den Gutachtern befürwortet und für die Förderung genehmigt worden. Mit der Koordination dieses Projekts ist der Fachbereich 7.6 *Wärme* beauftragt.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Untersuchung von PMMA-Nanopartikeln mit Röntgenkleinwinkelstreuung

Nanopartikel gewinnen in vielen Bereichen rasant an Bedeutung und damit auch die rückführbare Bestimmung ihrer Größe. Dazu wird derzeit im PTB-Labor bei BESSY II mit einer am Helmholtz-Zentrum-Berlin (HZB) entwickelten Anlage die rückführbare Größenbestimmung von Nanopartikeln mit Röntgenkleinwinkelstreuung (*Small Angle X-ray Scattering*, SAXS) im Rahmen des europäischen *Joint Research Project „Traceable Characterization of Nanoparticles“* untersucht. Erste Messungen an PMMA-Nanopartikeln im Größenbereich von 100 nm bis 200 nm zeigten, dass mittlere Durchmesser mit relativen Messunsicherheiten von unter 1 % bestimmt werden konnten. Auch für binäre Partikelmischungen war die Größenbestimmung der Komponenten bereits erfolgreich. (M. Krumrey, FB 7.1, [michael.krumrey@ptb.de](mailto:michael.krumrey@ptb.de))

#### Quantitativer Vergleich von Streuexperimenten mit Monte-Carlo-Simulationen

Viele Anwendungen von Röntgenstrahlung in der Materialforschung nutzen Monte-Carlo-Programme zur Simulation der Wechselwirkung von Strahlung mit Materie. Zur quantitativen Überprüfung des weitverbreiteten Programmpaketes GEANT4 wurden am Wellenlängenschieberstrahlrohr bei BESSY II Messungen mit monochromatisierter Synchrotronstrahlung durchgeführt. Für Kupfer- und Goldfolien wurden die auftretende Rayleigh- und Comptonstreuung sowie die Fluoreszenz mit einem kalibrierten Detektionssystem sowohl winkelaufgelöst als auch für unterschiedliche Polarisationsrichtungen der einfallenden Strahlung untersucht. Experiment und Simulation zeigten eine gute Übereinstimmung, nur bei der Polarisationsabhängigkeit der Rayleighstreuung wurden signifikante Abweichungen zwischen Simulation und Experiment beobachtet. (M. Krumrey, FB 7.1, [michael.krumrey@ptb.de](mailto:michael.krumrey@ptb.de))

#### Atomare Fundamentalparameter für die Röntgenfluoreszenzanalyse

Am Plangittermonochromator-Strahlrohr für Undulatorstrahlung der PTB bei BESSY II wurden mittels einer hochauflösenden Spektrometereinheit atomare Fundamentalparameter für die quantitative Beschreibung der L-Fluoreszenzstrahlung von Nickel bestimmt. Die radiometrisch charakterisierte Spektrometereinheit erlaubt die wellenlängendispersive Bestimmung von Fundamentalparametern mit bisher nicht erreichten geringen relativen Unsicherheiten. (B. Beckhoff, FB 7.1, [burkhard.beckhoff@ptb.de](mailto:burkhard.beckhoff@ptb.de))

#### Kalibrierung von Detektoren für Merkur-Mission

Für die ESA-Mission *BepiColombo* zum Planeten Merkur, deren Start für das Jahr 2013 geplant ist, werden im Max-Planck-Institut Halbleiterlabor (MPI HLL) hochauflösende Röntgendetektoren entwickelt. Die Module verfügen über 4000 Pixel auf einer Fläche von 3,6 cm<sup>2</sup> und sollen bei der Röntgenfluoreszenzanalyse der Merkuroberfläche eingesetzt werden. Jedes Pixel verfügt über einen Drift-detektor und einen speziellen Feldeffekt-Transistor. Prototypen dieser Detektormodule wurden im PTB-Labor bei BESSY II im Photonenenergiebereich von etwa 100 eV bis 15 keV mit monochromatischer Strahlung charakterisiert und mit undispergierter, berechenbarer Synchrotronstrahlung kalibriert.

Ein weiteres Instrument auf der *BepiColombo* Mission ist das „Mercury Thermal Infrared Spectrometer“ (MERTIS), dessen Aufgaben die Identifikation von felsbildenden Mineralien und die Messung der Oberflächentemperatur des Merkurs mit Hilfe von Infrarot-Spektroskopie sind. Zur Kalibrierung der Spektren werden mit einem rotierenden Spiegelsystem sequentiell das Spektrum eines Oberflächenstreifens vom Merkur, das Spektrum des „kalten“ Weltraums und Spektren zweier Schwarzkörperstrahler unterschiedlicher Temperatur aufgenommen. Der Aufbau der beiden Schwarzkörperstrahler MBB7 (700 K) und MBB3 (300 K) wurde durch Messungen der PTB in Zusammenarbeit mit einem Industrieunternehmen optimiert, sodass für den MBB3 ein sehr hoher Emissionsgrad von über

0,99 im Wellenlängenbereich von 5  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  realisiert wurde. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de, B. Gutschwager, FB 7.3, berndt.gutschwager@PTB.de)

### **Metrology Light Source (MLS):**

*Primäres Strahlernormal:* Die MLS wurde im nahen Infrarot und Sichtbaren durch Vergleichsmessungen mit rückführbar auf ein Kryoradiometer kalibrierten Filterradiometern als primäres Strahlernormal weiter etabliert. Der Vergleich wurde bei verschiedenen Elektronenenergien durchgeführt und ergab jeweils eine Übereinstimmung im Rahmen der kombinierten relativen Unsicherheiten von besser als  $5 \cdot 10^{-3}$ . (R. Klein, FB 7.2, roman.klein@ptb.de, D. Taubert FB 7.3, dieter.taubert@PTB.de)

*Messung der Größe des Elektronenstrahls:* Ein optisches Abbildungssystem zur Messung der Quellpunktsgröße und -lagestabilität des Elektronenstrahls in der MLS wurde aufgebaut und in Betrieb genommen. Dieses System erlaubt die Abbildung des Quellpunktes bei allen Betriebsparametern der MLS, also insbesondere auch bei kleinsten Strömen bis hin zu einem einzelnen gespeicherten Elektron. (R. Klein, FB 7.2, roman.klein@ptb.de)

*Charakterisierung eines Silicium-Drift-Detektors (SDD):* Die berechenbare Strahlung der MLS wurde zur Charakterisierung der Nachweisempfindlichkeit eines SSD-Detektors eingesetzt. Darüber hinaus wurde die Linearität des Detektionssystems durch die kontrollierte Variation des Photonenflusses durch entsprechende Anpassung des Elektronenstroms untersucht. (R. Klein, FB 7.2, roman.klein@ptb.de)

*Charakterisierung eines VUV-Satellitenspektrometers:* Die permanente Messung der solaren Einstrahlung im vakuum- und extrem-ultravioletten Spektralbereich erlaubt kurzfristige Vorhersagen über Sonnenstürme und solare Partikelschauer, die eine potentielle Gefahr u. a. für Satelliten auf Erdumlaufbahnen darstellen. Für das Freiburger Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik wurde an der MLS ein robustes Photoemissions-Kugelspektrometer bezüglich seiner spektralen Empfindlichkeit charakterisiert, das durch seine einfache Konstruktion als Messgerät zum dauerhaften Einsatz auf Satelliten geeignet ist. (A. Gottwald, FB 7.2, alexander.gottwald@ptb.de)

*THz-Strahlrohr geht in Betrieb:* Die MLS ist der erste Elektronenspeicherring weltweit, der für die Erzeugung von THz-Strahlung optimiert ist. Um die THz-Strahlung nutzbar zu machen, wurde eine für den langwelligen Spektralbereich optimierte Strahlführung aufgebaut und Anfang 2009 in Betrieb genommen. Die an diesem dedizierten THz-Strahlrohr zur Verfügung stehende Leistung ist im THz-Bereich um bis zu zwei Größenordnungen höher als an konventionellen Synchrotron-Infrarot-Strahlrohren. (R. Müller, FB 7.2, ralph.mueller@ptb.de)

### **Bestimmung von Strukturbreiten auf Halbleiterphotomasken mit EUV-Scatterometrie**

Im Rahmen des CDur32-Projektes des BMBF wird die Nutzung von EUV-Scatterometrie für die Bestimmung von Strukturbreiten auf Halbleiterphotomasken weiterentwickelt. Dazu werden die im Rahmen des Vorläuferprojektes ABBILD für periodische Strukturen entwickelten FEM-Lösungen des ZUSE-Instituts Berlin und des WIAS mit statistischen Beschreibungen zur Erfassung von Rauheiten an den Linienstrukturen verbunden. (F. Scholze, FB 7.2, frank.scholze@ptb.de)

### **Verringerung der Messunsicherheiten für die EUV-Reflektometrie**

Mit der Entwicklung der EUV-Lithographie werden zunehmend Messungen an optischen Elementen für große numerische Aperturen und damit auch unter schrägem Einfall erforderlich. Dies stellt erhöhte Anforderungen an die Einstellgenauigkeit des Einfallswinkels und die Charakterisierung des Polarisationszustandes der Strahlung. Durch eine eingehende Untersuchung aller systematischen Einflüsse, wie Fehlstellungen von Achsen des EUV-Reflektometers, konnte die Unsicherheit des Einfallswinkels bei nahezu senkrechtem Einfall von  $0,02^\circ$  auf  $0,01^\circ$  verringert werden. Die verbesserte Ausrichtung von Blenden bzgl. der Orbitalebene der Synchrotronstrahlung von BESSY II erhöhte den linearen Polarisationsgrad von 97 % auf 98,7 %. (F. Scholze, FB 7.2, frank.scholze@ptb.de)

### **Filterradiometer für die PICARD-Forschungsmission kalibriert**

An Bord des Mikrosatellits PICARD werden als Bestandteil des sogenannten PREMOS-Moduls eine Reihe von Filterradiometern sein, die in der PTB kalibriert wurden. Sie dienen der Messung der totalen und der spektralen solaren Bestrahlungsstärke sowie deren zeitlicher Variation (PREMOS: Precision Monitoring of Solar Variability). Die Filterradiometer wurden im Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos – World Radiation Center entwickelt. Durchgeführt wurden die Kalibrierungen am UV- und NIR-Kryoradiometer-Messplatz der PTB unter Einsatz einer einzigartigen Hochleistungsplasma-Strahlungsquelle mit der weltweit höchsten spektralen Strahlungsleistung im Bereich zwischen 200 nm und 300 nm. Die Rückführung der spektralen Bestrahlungsstärkeempfindlichkeit der Filterradiometer auf die SI-Einheiten ist wesentliche Voraussetzung für die zuverlässige Ermittlung von klimarelevanten Langzeitmessungen der solaren Strahlung. (P. Meindl, FB 7.3, peter.meindl@ptb.de)

### **iMERA-Plus Projekt Quanten-Candela**

Im Rahmen der iMERA-Plus-Forschungsinitiative beteiligen sich verschiedene Fachbereiche der PTB zusammen mit Partnern aus sechs europäischen Metrologieinstituten am Projekt „Candela: Towards quantum-based photon standards“. Im Fachbereich *Detektorradiometrie und Strahlungsthermometrie* werden dazu die Eigenschaften neuartiger Silicium-Photodioden untersucht, um Aussagen über die Berechenbarkeit ihrer spektralen Empfindlichkeit und damit ihre Eignung als primäre Empfängernormale zu treffen. Hierzu wurden Messanlagen zur hochgenauen Bestimmung der Homogenität und Linearität der spektralen Empfindlichkeit von Photodioden bei Temperaturen bis hinunter zu 78 K und im Vakuum aufgebaut. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Anlagen ist eine neu entwickelte, hochstabile Laserstrahlungsquelle, die eine Leistungsstabilität von besser als  $10^{-5}$  über mehr als eine Stunde aufweist. (L. Werner, FB 7.3, lutz.werner@PTB.de)

### **Untersuchung neuer Primärthermometer im Tieftemperaturbereich**

Thermometrie im Tieftemperaturbereich unterhalb von 1 K ist aufwendig und anspruchsvoll. Praktikable Primärthermometer können eine Alternative zu Sekundärthermometern darstellen, die an der Internationalen Temperaturskala PLTS-2000 kalibriert werden müssen. Primärthermometer auf Basis des Coulomb-Blockade-Effektes gestatten die direkte Temperaturbestimmung über die Messung der differentiellen Leitfähigkeit an speziellen Anordnungen von Tunnelkontakten. Im Rahmen des EU-Projektes „European Microkelvin Collaboration“ und in Kooperation mit der Helsinki University of Technology wurden neuartige Coulomb-Blockade-Thermometer (CBT) in einem weiten Temperaturbereich zwischen 0,008 K und 1 K untersucht und mit der PLTS-2000 verglichen. Erste Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit der PLTS-2000. Die Messungen gestatten erstmals eine gesicherte Überprüfung von Modellen zur Beschreibung der Elektron-Phonon-Wechselwirkung in den mikrostrukturierten Bauteilen, die bei der Modellierung der CBT angewendet werden. (J. Engert, FB 7.4, jost.engert@ptb.de)

### **Präzisionsthermostat für das Boltzmann-Experiment**

Für das im Rahmen des Boltzmann-Projektes neu aufzubauende Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer ist eine zuverlässige Temperaturumgebung in einem sehr großen Arbeitsvolumen (Durchmesser 500 mm, Höhe 750 mm) erforderlich. Dazu wurde ein großvolumiger Präzisionsthermostat, in dem die Vakuumkammer des Experimentes montiert werden soll, in Zusammenarbeit mit dem italienischen Metrologieinstitut INRiM entwickelt und getestet. Die Größe der Vakuumkammer wird dadurch bestimmt, dass für die Reduzierung des Unsicherheitsbeitrages durch die effektive Kompressibilität bei der Bestimmung der Boltzmann-Konstante je zwei Zylinder- und Kreuzkondensatoren auf einer gemeinsamen Plattform am Wassertripelpunkt isotherm untergebracht werden müssen. Für dieses Arbeitsvolumen konnte die Zielstellung von 1 mK sowohl bezüglich der Temperaturstabilität als auch der Temperaturhomogenität bis zu einem Faktor fünf übertroffen werden. (T. Zandt, FB 7.4, thorsten.zandt@ptb.de)

### Erste Messungen mit dem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer im Bereich von 22 K bis 36 K

Mit der zweiten Generation des Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometers (DCGT) wurde die bisherige thermodynamische Gasthermometer-Skala der PTB um Daten im Temperaturbereich zwischen 22 K und 36 K erweitert. Erstmals wurden in der PTB thermodynamische Temperaturen mit dem DCGT oberhalb von 27 K bestimmt. Dieser Temperaturbereich ist besonders wichtig, da dort bisher weltweit keine ausreichenden Daten vorliegen. Darüber hinaus konnten Werte für die Realgaseigenschaften von Helium-4 gewonnen und diese mit neuen theoretischen Werten verglichen werden. Diese Arbeiten sind der erste Schritt zur Bestimmung der Polarisierbarkeit von Neon im Vergleich mit Helium-4. Aufgrund seiner höheren Polarisierbarkeit soll darauf aufbauend Neon neben Helium als Messgas zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante am Wassertripelpunkt verwendet werden. (Ch. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

### Bessere Temperaturfixpunkte durch Zusammenarbeit zwischen PTB und BAM

Der Einfluss von Verunreinigungen auf die Phasenumwandlungstemperatur von Metallen ist der dominierende Unsicherheitsbeitrag bei der Darstellung und Weitergabe der Internationalen Temperaturskala von 1990. In einer Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ist es im Rahmen einer gemeinsamen Dissertation weltweit erstmalig gelungen, eine auf das Internationale Einheitensystem rückgeführte Spurenanalytik bei den Fixpunktmaterialien Indium und Zink mit einer bisher nicht erreichten relativen Unsicherheit von nur 30 % aufzubauen. Dies ist eine entscheidende Voraussetzung für die Korrektur von Fixpunkttemperaturen und verringerte Unsicherheiten bei der Fixpunktdarstellung. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

### Neuer Chopper-Verstärker für elektrische Präzisionsmessungen

Das Nanovoltmeter N11 der Firma EM Electronics wird aufgrund seines niedrigen Rauschens häufig für elektrische Präzisionsmessungen in der Metrologie verwendet, besitzt aber eine geringe Bandbreite und zeigt störende Umschaltstromspitzen am Eingang. Für die in der PTB neu aufgebaute Kryostromkomparator-Messbrücke zur Widerstandskalibrierung wurde ein verbesserter Verstärker entwickelt, der zukünftig das Nanovoltmeter N11 ersetzen wird. Dieser Verstärker zeichnet sich durch eine deutlich erhöhte Messbandbreite von 300 Hz und einen wesentlich reduzierten Eingangsstörpegel aus. Das Spannungsrauschen ist mit  $750 \text{ pV}/\sqrt{\text{Hz}}$  vergleichbar zum kommerziellen Nanovoltmeter, wogegen das Stromrauschen mit  $70 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$  deutlich niedriger ist. Die Grenzfrequenz des  $1/f$ -Rauschens liegt unter 10 mHz. Der neue Verstärker soll im Rahmen einer Lizenzvereinbarung von der Firma Magnicon kommerziell vertrieben werden. (D. Drung, FB 7.5, dietmar.drung@ptb.de)

### EU-Vorhaben „European Microkelvin Collaboration“ begonnen

Im April diesen Jahres hat das von der EU im Rahmen des 7. Rahmenprogramms geförderte, vierjährige Vorhaben „European Microkelvin Collaboration“ begonnen, das die in Europa vorhandene Infrastruktur zur Erzeugung und messtechnischen Nutzung ultratiefer Temperaturen weiter ausbauen und einer breiten Nutzung zuführen soll. Am Vorhaben sind 12 Projektpartner beteiligt, darunter 3 Partner, die ihre Einrichtungen anderen Nutzern zur Verfügung stellen, sowie eine Spin-off-Firma der Helsinki University of Technology. Die PTB-Fachbereiche *Temperatur* sowie *Kryo- und Vakuumphysik* arbeiten in diesem Vorhaben an der Weiterentwicklung thermometrischer Methoden für den Bereich ultratiefer Temperaturen und an der Entwicklung neuer Stromsensoren und Verstärker auf der Basis von SQUIDs. (T. Schurig, FB 7.5, thomas.schurig@ptb.de)

### Metrologie für die Wirtschaft

#### Röntgenspektrometrie an Nanostrukturen

Im Rahmen eines gemeinsamen Drittmittelprojektes mit der Bundesanstalt für Materialforschung (BAM) und einem Industriepartner wurde die für die Oberflächenkontaminationskontrolle etablierte Methode der quantitativen Totalreflexionsröntgenfluoreszenz weiterentwickelt, um auch die Analyse von partikelförmigen Kontaminationen zu ermöglichen. Dazu wurden an verschiedenen Strahlrohren der PTB bei BESSY II nanoskalige Strukturen bekannter Dimension bei verschiedenen Einfallswinkeln untersucht. Mit Hilfe gut charakterisierter Vergleichsproben ließen sich die durch die Oberflächenstruktur hervorgerufenen Effekte isolieren und gezielt studieren. (B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

#### Metrologie für die EUV-Lithographie

Die umfangreiche Unterstützung der europäischen Halbleiterindustrie bei der Entwicklung der Lithographie mit Strahlung einer Wellenlänge von 13,5 nm im extremen UV (EUV) wurde fortgesetzt. Insbesondere wurden Kollektorspiegel für eine neue Generation von EUV-Strahlungsquellen, die derzeit größten EUV-optischen Komponenten mit einem Durchmesser von 670 mm, charakterisiert. Mit den neuen Quellen konnte die EUV-Strahlungsleistung deutlich von 20 W auf 75 W erhöht werden. (F. Scholze, FB 7.2, frank.scholze@ptb.de)

#### EUV-Photosensoren für die Lithographie

Für den Betrieb einer EUV-Belichtungsmaschine sind zur Prozessüberwachung und Justage eine Vielzahl von optischen Sensoren im Spektralbereich des EUV notwendig. Im Rahmen einer wissenschaftlichen Kooperation mit dem ASML und der TU Delft wurden Prototypen dieser Sensoren mit komplexen Filterschichten zur Einstellung der spektralen Empfindlichkeit bezüglich der Einhaltung dieser Spezifikationen und ihrer Stabilität unter EUV-Bestrahlung charakterisiert. (F. Scholze, FB 7.2, frank.scholze@ptb.de)

### Praktikabler Hochtemperaturofen entwickelt

Im Rahmen eines von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschung geförderten ProInno-Projektes wurde mit der KE Technologie GmbH in Stuttgart der Prototyp eines praktikablen Hochtemperaturofens entwickelt. Mit einer maximalen Betriebstemperatur von 3000 K und einem Durchmesser der strahlenden Öffnung von 50 mm ist dieser Ofen flexibel an die Anforderungen in industriellen, aber auch wissenschaftlichen Hochtemperaturlaboratorien angepasst. Mit ihm können sowohl die modernen Metall-Kohlenstoff-eutektischen Hochtemperaturfixpunkte in die industriennahe Rückführungskette eingebunden als auch bildgebende Messsysteme für Temperatur und Strahlung effizienter auf die internationale Temperaturskala zurückgeführt werden. (K. Anhalt, FB 7.3, klaus.anhalt@ptb.de)

### Entwicklung der dynamischen Hochtemperaturremissionsgradmessung gestartet

Gemeinsam mit der Netzsch Gerätebau GmbH ist die Entwicklung einer dynamischen Methode zur Messung thermophysikalischer Materialeigenschaften bei hohen Temperaturen gestartet. Mit dieser Methode soll die Messung und Rückführung wichtiger thermophysikalischer Materialparameter, insbesondere des Emissionsgrades, bei hohen Temperaturen ermöglicht werden. Das Projekt ist auf drei Jahre ausgelegt und soll im letzten Schritt Messungen bei Temperaturen bis über 3000 K ermöglichen. (S. Krenek, J. Hartmann, FB 7.3, stephan.krenek@ptb.de, juergen.hartmann@ptb.de)

### Terahertz-Kalibrierung überzeugt auch US-Laserhersteller

Die Strahlungsleistung eines kommerziellen Terahertz-Lasers, Herzstück eines neuen Messplatzes zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von Detektoren im Terahertz-Spektralgebiet, wurde erstmalig auf das Internationale Einheitensystem rückgeführt. Dies gelang bei 2,5 THz mit einem zuvor am PTB-Kryoradiometer, dem Primärnormal für Leistungsmessung elektromagnetischer Strahlung, kalibrierten Transferempfänger. Damit ist dieser THz-Laser, ein Molekülgaslaser des US-Herstellers Coherent Inc., weltweit der erste Laser im praktischen Einsatz, dessen Ausgangsleistung von der PTB zuverlässig nachgewiesen worden ist. (A. Steiger, FB 7.3, andreas.steiger@ptb.de)

### Erfolgreiche nationale Fachtagung TEMPERATUR 2009

Am 24. und 25. Juni 2009 wurde die Tagung TEMPERATUR 2009 im Hermann-von-Helmholtz-Bau der PTB in Berlin ausgerichtet. Die TEMPERATUR hat sich im deutschsprachigen Raum als die wichtigste nationale Tagung zu Verfahren und Geräten der Temperatur- und Gasfeuchtemessung etabliert; sie wurde nach 1998, 2003 und 2006 zum vierten Mal in Folge in der PTB durchgeführt. Die große Zahl von 145 Teilnehmern mit über 50 % Beteiligung aus kleinen und mittelständischen Unternehmen zeigt die Aktualität der Fragestellungen. Schwerpunkte der Tagung waren diesmal bildgebende Temperaturmessung und Emissionsgrad sowie Dünnfilmwiderstandsthermometer und der Einsatz von Fixpunkten in industriellen Kalibrierlaboratorien. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de, J. Hollandt, FB 7.3, joerg.hollandt@ptb.de)

### Ringvergleich mit Blockkalibratoren

Blockkalibratoren sind wichtige Messgeräte für In-situ-Temperaturkalibrierungen in der Industrie. Ein 2008/2009 durchgeführter DKD-Ringvergleich mit 17 DKD-Laboratorien bestätigte erstmals die breite Anwendbarkeit der DKD-Richtlinie DKD-R 5-4. Die Pilotlaborfunktion übernahm die PTB. Die Vergleichstemperaturen reichten von  $-24\text{ °C}$  bis zu  $600\text{ °C}$ . Die Bestimmung wichtiger Eigenschaften der Blockkalibratoren gemäß der DKD-Richtlinie und die Vergleichsergebnisse selbst bestätigten die akkreditierten Messunsicherheiten in den DKD-Kalibrierlaboratorien, wiesen deren Kompetenz nach und sind eine wichtige Grundlage zur Verringerung von Messunsicherheiten. (H.-G. Behnke, FB 7.4, heinz-guenther.behnke@ptb.de)

### Neuentwurf IEC 60584 – Aufnahme der Typ-A-Thermoelement-Kennlinie

Die vom Komitee SC65B der IEC vorgeschlagene Aufnahme der Kennlinie für Typ-A-Thermoelemente auf Basis der russischen Norm GOST R 8.585-2001 in die Neufassung der Norm IEC 60584 erforderte internationale Vergleichsmessungen, an denen die PTB beteiligt war. Ein von der Firma Obninsk Thermoelectric Company Ltd. bereitgestelltes Typ-A-Thermoelement mit Saphirschutzrohr wurde bezüglich der thermoelektrischen Stabilität und Homogenität untersucht und an Fixpunkten der ITS-90 sowie an eutektischen Metall-Kohlenstoff-Fixpunkten kalibriert. Die in der PTB und beim russischen Partner erzielten Ergebnisse stimmten im Temperaturbereich zwischen  $1000\text{ °C}$  und  $1850\text{ °C}$  innerhalb einer Unsicherheit von  $\pm 0,5\%$  mit der GOST-Kennlinie überein. Um eine Entscheidung über die Aufnahme der Kennlinie in die neue Norm IEC 60584 zu treffen, sollen die Resultate der anderen Teilnehmer im nächsten Jahr auf einem Workshop präsentiert werden. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

## Materialkompatibilitätsuntersuchungen im Hochtemperaturbereich

Viele Anwendungen von Thermoelementen erfordern eine Ausdehnung des Temperaturbereichs. Dazu wurden in einer Argon-Atmosphäre bei Temperaturen zwischen 1750 °C und 1850 °C in einem Hochtemperaturofen Alterungstests von Aluminiumoxid-Rohren mit unterschiedlichen Oxidkeramik-Beschichtungen im Kontakt mit Kohlenstoff durchgeführt. Ziel war es, durch die aufgetragenen Schutzschichten Reduktionsreaktionen des Aluminiumoxids zu vermeiden. Es zeigte sich, dass keine der untersuchten Schichten eine thermische und chemische Beständigkeit aufwies, um einen Reduktionsschutz zu gewährleisten. Die gemessene elektrische Leitfähigkeit der Oberflächen der beschichteten Rohre zeigte, dass ZrO<sub>2</sub> und Aluminiumtitanat-Schichten jeweils zu ihren elementaren Metallen reduziert wurden, während Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schichten nach den Alterungstests mechanisch vollständig zerstört waren. Weitere Untersuchungen nicht-oxidischer Beschichtungen sind geplant. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

## Messung thermischer Energie in Kraftwerken.

Die Messung thermischer Energie ist wesentlich für die Steuerung von Kraftwerken. Gegenwärtig weisen die dabei verwendeten Durchfluss-Sensoren aufgrund mangelnder Kalibriermöglichkeiten Messunsicherheiten im Prozentbereich auf. Daher investiert die PTB in eine Messanlage, mit der Durchfluss-Sensoren bei Durchflüssen mit Medientemperaturen bis 230 °C untersucht werden können, um gemeinsam mit den vorhandenen Messmöglichkeiten, mit deren Hilfe Sensoren auch bei großen Durchflüssen bis 2000 m<sup>3</sup>/h charakterisiert werden können, eine Methode der Rückführung für in Kraftwerken eingesetzte Durchfluss-Sensoren zu entwickeln. Ziel ist es, die Messunsicherheit der Sensoren unter Prozessbedingungen festzustellen und auf diese Weise das bisherige suboptimale Regelungsverhalten von Kraftwerken zu verbessern. Aktuelle Studien gehen davon aus, dass so der Wirkungsgrad der Kraftwerke um rund 2 % gesteigert werden kann. (T. Lederer, FB 7.6, thomas.lederer@PTB.de)

## Erste Ergebnisse bei der laseroptischen Durchflussmessung mit Ganzfeldverfahren

Die laseroptische Durchflussmessung für den Einsatz in Heizkraftwerken und in Fernwärmeübergabestationen wurde in den vergangenen Jahren mit Erfolg vorangetrieben. Messprinzip hierbei ist, den Volumenstrom durch die direkte Integration des gemessenen Geschwindigkeitsprofils der Rohrströmung zu ermitteln. Die zugrunde gelegte Messmethode war dabei die Laser-Doppler-Velocimetrie. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist die lange Messzeit von einigen Stunden, da das Geschwindigkeitsprofil Punkt für Punkt abgetastet werden muss. Aktuelle Versuche mit einem laseroptischen Ganzfeldmessverfahren, der Particle-Image-Velocimetry, zeigten vielversprechende Ergebnisse: Das Geschwindigkeitsprofil kann innerhalb weniger Minuten aufgenommen werden und die Messunsicherheit für die Bestimmung des Volumenstroms liegt nach bisherigen Erkenntnissen bei ungefähr 1%. (T. Lederer, FB 7.6, thomas.lederer@PTB.de)

## Internationale Angelegenheiten

### Erster bilateraler Vergleich der Röntgenlaserradiometrie

Am neuen EUV-Freie-Elektronen-Laser (EUV-FEL) des japanischen Beschleunigerzentrums *Spring8* wurde ein bilateraler Detektorvergleich zwischen der PTB und dem *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* (AIST, Japan) durchgeführt. Der Nachweis der Laserstrahlung mit Wellenlängen zwischen 50 nm und 60 nm erfolgte mit Hilfe eines elektrisch kalibrierten Kryoradiometers des AIST und mit einem Gas-Monitor-Detektor (GMD). Der GMD ist eine gemeinsame Entwicklung der PTB, des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (DESY) in Hamburg und des Ioffe-Instituts St. Petersburg und wurde zuvor an der *Metrology Light Source* (MLS) der PTB mit Synchrotronstrahlung ebenfalls gegen ein Kryoradiometer kalibriert. Das Ergebnis des Vergleichs – eine Übereinstimmung innerhalb von 3 % bei einer kombinierten relativen Standardmessunsicherheit von 4 % – bedeutet eine Validierung der Photonendiagnostik am weltweit ersten EUV-FEL *FLASH* in Hamburg, die auf GMDs basiert und in den letzten Jahren im Rahmen der PTB-DESY-Ioffe-Kooperation entwickelt wurde. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

### **Arbeitsgruppe des Internationalen Komitees für Thermometrie untersucht den Stand der Messung thermodynamischer Temperaturen**

Nach der Neudefinition des Kelvin werden Temperaturmessungen in einigen Temperaturbereichen zunehmend mit sogenannten Primärthermometern durchgeführt werden, die direkt thermodynamische Temperaturen bestimmen. Für diese Thermometer ist keine Kalibrierung an der Temperaturskala ITS-90 erforderlich. Zur Gewährleistung der Einheitlichkeit des Messwesens sind daher die Differenzen zwischen den thermodynamisch bestimmten und den nach der ITS-90 gemessenen Temperaturen festzustellen. Eine Arbeitsgruppe des Internationalen Komitees für Thermometrie (CCT WG4) hat dazu unter der Leitung der PTB alle verfügbaren Daten der letzten 30 Jahre kritisch bewertet und eine Empfehlung für diese Differenzen mit fundierten Unsicherheitsangaben herausgegeben. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

### **PTB-Skala der spektralen Empfindlichkeit wird international**

Im Rahmen dreier Kooperationsvereinbarungen mit den nationalen Metrologieinstituten aus Frankreich, Russland und China stellt die PTB kalibrierte Strahlungsempfänger mit der Skala der spektralen Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1000 nm zur Verfügung. Mit diesen Empfängern wird es den genannten nationalen Metrologieinstituten ermöglicht, eine auf die PTB zurückgeführte absolute Kalibrierung der spektralen Empfindlichkeit von Filtrerradiometern durchzuführen. Damit können diese Institute kurzfristig thermodynamische Temperaturmessungen, z. B. zur Bestimmung der Schmelzpunkte von Metall-Kohlenstoff-Eutektika, durchführen. (L. Werner, J. Hartmann, FB 7.3, lutz.werner@ptb.de, juergen.hartmann@ptb.de)

### **Abschluss des CCPR-Pilotvergleichs für spektrale Empfindlichkeit im EUV**

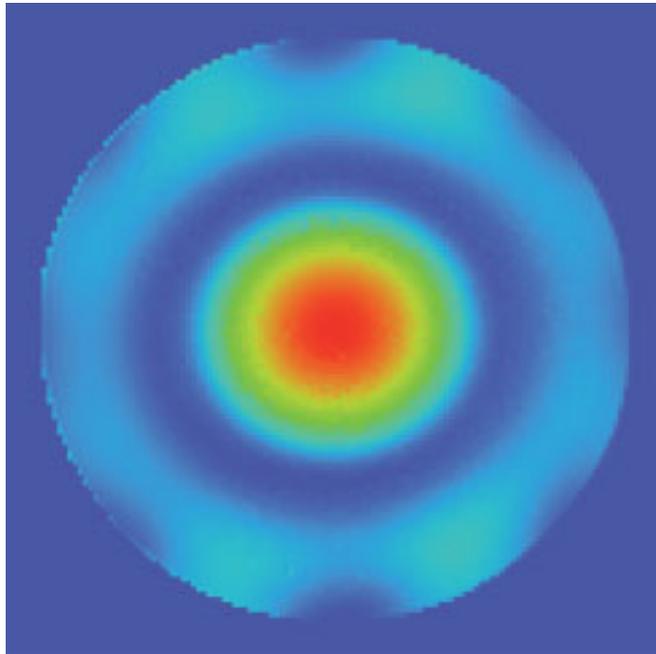
Der von der PTB geleitete CCPR-Pilotvergleich zur spektralen Empfindlichkeit im Spektralbereich von 11,5 nm bis 20 nm (EUV) zwischen dem NIST, dem NMIJ und der PTB wurde erfolgreich abgeschlossen und damit die internationale Vergleichbarkeit der Messungen der spektralen Empfindlichkeit im Spektralbereich des EUV durch alle in diesem Bereich tätigen NMIs sichergestellt. Auf dieser Grundlage wurde vom CCPR die Durchführung eines Schlüsselvergleichs (CCPR K2.d) für den Spektralbereich 10 nm bis 200 nm ab 2019 beschlossen. (F. Scholze, FB 7.2, frank.scholze@ptb.de)

### **Vierter Internationaler Workshop zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante**

In der Tradition der vorangegangenen Workshops zum Boltzmann-Projekt, die 2005 und 2006 in der PTB und 2008 am LNE-INM/CNAM in Paris stattfanden, lud in diesem Jahr das INRiM in Turin zum vierten Workshop ein. In 22 Fachvorträgen wurden die Fortschritte bei der Präzisionsbestimmung der Boltzmann-Konstante mit unterschiedlichen Methoden einschließlich der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie in der PTB vorgestellt. Im Hinblick auf die Neudefinition der Basiseinheit Kelvin über die Festlegung des Wertes der Boltzmann-Konstante stand die Aufstellung fundierter Unsicherheitsbudgets für die genauesten Methoden im Mittelpunkt, um die notwendigen Voraussetzungen für die Bewertung der Ergebnisse durch CODATA zu schaffen. Hierbei wurden wichtige Erkenntnisse über die zu erwartenden Leistungsgrenzen herausgearbeitet. Im Anschluss an den Workshop wurde für das internationale, von der EU im 7. Rahmenprogramm in erheblichem Umfang geförderte iMERA-Plus Boltzmann-Projekt Halbzeitbilanz gezogen. Die Fortschritte wurden auch in einer Arbeitsgruppe des Internationalen Komitees für Thermometrie (CCT TG-SI) diskutiert. Bisher zeichnet sich ab, dass alle beteiligten Methoden Ende 2010 hochwertige Ergebnisse liefern werden, jedoch reichen die Unsicherheiten für die Neudefinition des Kelvin noch nicht aus. (J. Fischer, Ch. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)



# Medizinphysik und metrologische Informationstechnik



Berichte der Abteilungen

# Medizinphysik metrologisch Information

Es liegt auf der Hand, dass die Abteilung *Medizinphysik und metrologische Informationstechnik* Metrologie für die Gesellschaft leistet. Erst auf den zweiten Blick wird das Engagement der Abteilung für die Wirtschaft deutlich und soll daher den Schwerpunkt der folgenden Darstellung prägen. Schließlich ist die PTB dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) zugeordnet.

Das BMWi wiederum stützt den Transfer des in den Bundesbehörden akkumulierten Innovationspotentials in wirtschaftsdienliche Produkte durch das MNPQ-Programm (Messen, Normen, Prüfen, Qualitätssicherung). Anhand einiger MNPQ-Projekte der Abteilung soll die Vielfältigkeit der Umsetzung und des Nutzens dieses Transfers exemplarisch veranschaulicht werden.

**Titelbild:**

Erstes Beispiel einer quantitativen Spulencharakterisierung am neuen 7-Tesla Magnetresonanztomographen in Berlin-Buch. Das Bild zeigt in Falschfarbendarstellung die gemessene Verteilung der Hochfrequenzfeldstärke in einem homogenen Phantom für eine kommerzielle MRT-Kopfspule. Der Ring vollständiger Auslöschung bei etwa halbem Radius ist ein typischer Effekt der hohen Feldstärke.

## Magnetresonanzhochfrequenzspulen

Die fränkische RAPID Biomedical GmbH fertigt Hochfrequenzspulen für Magnetresonanztomographen (MRT) in Kleinserie oder als Sonderanfertigungen und bedient dabei insbesondere Forschungskunden. Weil man für eine Vielzahl unterschiedlicher Geräte entwickelt, können Erfolgs- und Qualitätskontrolle häufig erst vor Ort am Kunden-MRT erfolgen. Gegebenenfalls erforderliche Nachbesserungen sind dann zeitaufwendig und teuer.

Das Projekt soll das langjährige Know-how der PTB auf dem Gebiet von MRT-Spulen für RAPID nutzbar machen. Gemeinsam werden Lösungen, die in der PTB für Forschungszwecke entwickelt wurden, so überarbeitet, dass sie in das Kleinunternehmen übertragen und dort wirtschaftlich eingesetzt werden können. Ziel ist es, eine verlässliche Qualitätskontrolle bereits wesentlich früher in den Entwicklungsprozess einfließen zu lassen.

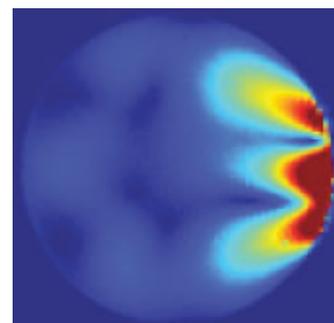
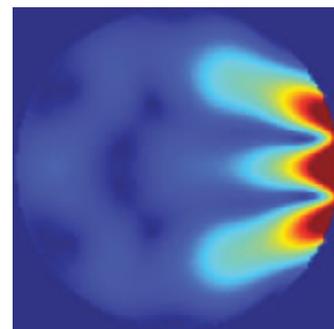
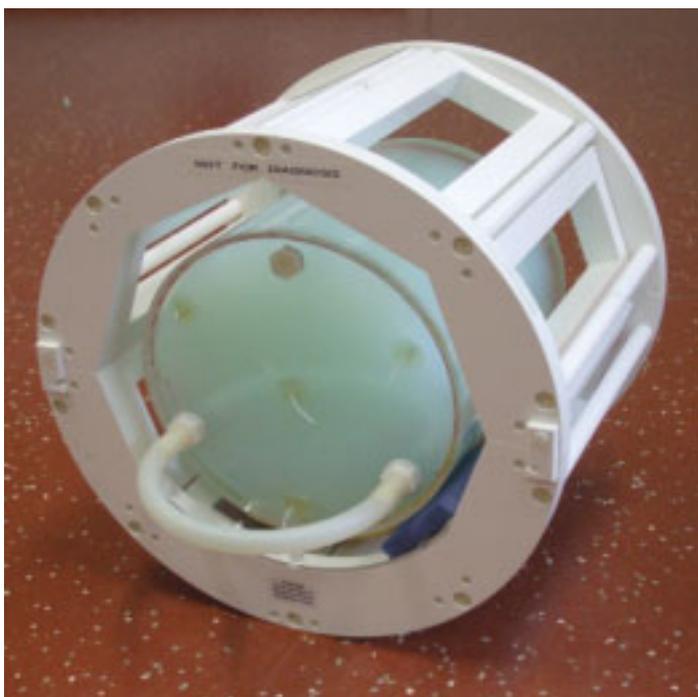
Parallel werden Patientensicherheitskonzepte für Mehrkanal-Sendespulen entwickelt und bei RAPID implementiert. Für diesen neuartigen Spulentyp gibt es noch keine etablierten Vorgaben für die sichere Anwendung am Menschen. Die Entwicklung und Umsetzung eines solchen Konzepts soll das Unternehmen nicht nur rechtlich absichern, sondern möglichst in eine international sichtbare Technologieführerschaft in Sicherheitsfragen münden.

# Physik und Medizinstechnik

In der praktischen Projektarbeit nehmen numerische Simulationen der Hochfrequenzfelder, die von einer Spule erzeugt werden, großen Raum ein. Wichtig ist die experimentelle Validierung solcher Simulationen durch geeignete Messverfahren. Die exzellente Übereinstimmung von Messungen und Rechnungen in Testkörpern zeigt Bild 1 am Beispiel eines Spulenelements für die Kopfbildgebung bei 7 Tesla. Bei der Übertragung dieser Herangehensweise auf den realen Menschen ist weniger die Komplexität der Anatomie das Problem als vielmehr der Umstand, dass Geometrie und Zusammensetzung des Körpergewebes für den individuellen Patienten vorab nicht exakt bekannt sind. Hier muss man sich mit Computermodellen

behelfen, wie sie z. B. von der schweizerischen *ITIS Foundation for Research on Information Technologies in Society* bereitgestellt werden. Bild 2a zeigt den in Gewebetypen segmentierten Kopf des „Duke“ aus der Virtual Family des ITIS und die auf Basis dieses Modells berechnete magnetische Feldverteilung einer 3-Tesla-Kopfspule. Derartige Rechnungen können dann mit Messungen an realen Versuchspersonen verglichen werden.

Bild 1: 8-Element-Kopfspule (links) für die 7-Tesla-MRT mit homogenem Testkörper („Phantom“). Simulierte (r. o.) und gemessene (r. u.) Verteilung einer bestimmten magnetischen Hochfrequenzkomponente für ein isoliertes Spulenelement.



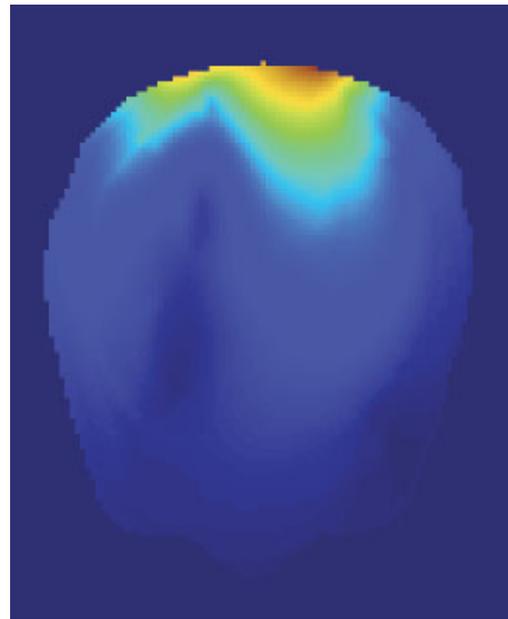
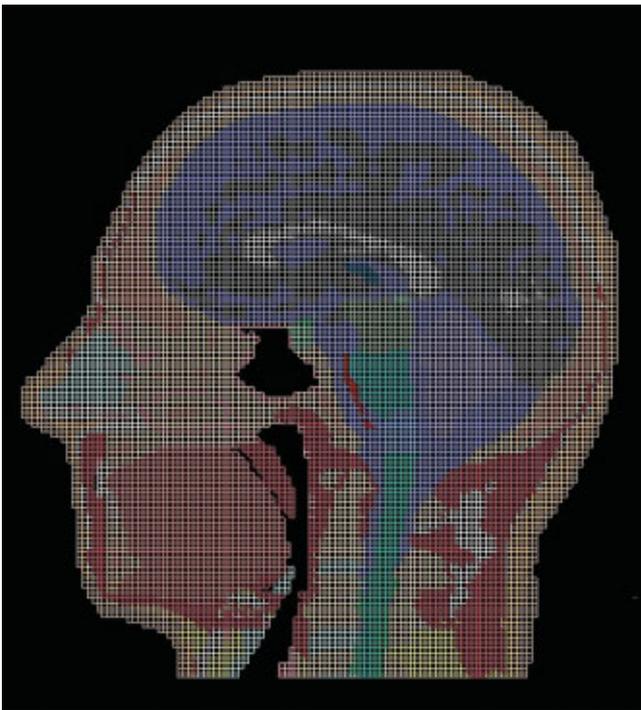


Bild 2: Im Computermodell „Duke“ (links) der schweizerischen ITIS Foundation wurden die Bild-daten eines erwachsenen Mannes in verschiedene Gewebetypen segmentiert. Berechnetes magnetisches Hochfrequenzfeld (rechts) einer 7-Tesla-Kopfspule im Kopf des „Duke“.

### Kassensystem

Die ursprünglich für Messgeräte entwickelten Sicherungsverfahren sind inzwischen im Rahmen des Projektes INSIKA (Integrierte Sicherheitslösung für messwertverarbeitende Kassensysteme) auf messwertverarbeitende Kassensysteme sowie auf allgemeine Registrierkassen übertragen worden (Bild 3).

Durch die Stützung auf elektronische Signaturen wird ein hoher Manipulationsschutz erreicht. Die Signaturen werden von Smart Cards erzeugt, die von einer autorisierten zentralen Stelle ausgegeben werden. Die so geschützten Daten können nicht unerkannt verändert werden. Selbst bei einer Manipulation oder beim Verlust der Daten ist durch technische Vorkehrungen eine summarische Abschätzung von Zählerwerten oder Umsätzen möglich. Die Lösung basiert auf bewährter, moderner Kryptographie, ist vergleichsweise einfach zu implementieren und anderen, klassischen Lösungen in Handhabung und Wirtschaftlichkeit deutlich überlegen. Für Gerätehersteller ist die Lösung auch deshalb

interessant, weil sich die für die Signaturbildung benötigte Smart Card auf verschiedene Weise integrieren lässt und die geräteinterne Datenhaltung nur marginal erweitert werden muss. Damit ist es möglich, einen großen Teil bereits installierter Systeme nachzurüsten. Das gesamte Sicherungskonzept ist so ausgelegt, dass andere Systemkomponenten nicht berührt sind und damit technische Innovationen nicht behindert werden. Wegen der kostengünstigen Lösung existieren keine Marktbarrieren und ist die Technik für alle Unternehmensgrößen nutzbar. Unternehmen, die Geräte mit der integrierten INSIKA-Lösung verwenden (z. B. Handelsunternehmen, Gaststätten), können nachweisbar belegen, dass sie den Aufzeichnungspflichten für Geschäftsvorgänge nachkommen. Das System ist revisionssicher.

Im Jahre 2009 wurde die Öffentlichkeit im Rahmen des 246. PTB-Seminars „Revisions-sicheres System zur Aufzeichnung von Kassenvorgängen und Messinformationen“ detailliert über das Konzept informiert. Seit dieser Zeit sind die technischen Spezifikationen veröffentlicht und können von jedem interessierten Unternehmen angefordert werden.

Bild 3: Registrierkasse mit signaturbasierter Datensicherung



### Durchflusszytometer

Ein weiteres Beispiel für gelungenen Technologietransfer ist die Weiterentwicklung eines kommerziellen Routine-Durchflusszytometers zur Präzisionsbestimmung von Zellkonzentrationen als Referenzmessverfahren. Zur externen Qualitätssicherung hämatologischer Laboratorien werden von medizinischen Standesorganisationen Ringversuche zum Kleinen Blutbild durchgeführt, für die derzeit die PTB Referenzwerte ermittelt. In dem vom BMWi geförderten Projekt wird zusammen mit der Fa. Partec GmbH, Münster, die Entwicklung eines kommerziell verfügbaren Referenzinstrumentes zur Blutzellzählung durchgeführt, mit dem Ziel, den Aufbau von Referenz- und Kalibrierlaboratorien außerhalb der PTB zu ermöglichen.

Sehr interessant dürften für die Hersteller von Durchflusszytometern auch miniaturisierte mikrofluidische (Lab-on-the-chip) Durchflusszytometer sein, die von der PTB zusammen mit dem Fachgebiet „Mikro- und Feingeräte“ der TU Berlin entwickelt wurden.

### Fluoreszenzkalibratoren

Die konfokale Lasermikroskopie ist eine weit verbreitete Technik zur Untersuchung biologischer Proben. In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass neben der qualitativen mikroskopischen Bildgebung die quantitative Bestimmung verschiedener Parameter in

biologischen Proben von immer größerer Wichtigkeit ist. Für die Gewinnung quantitativer und vergleichbarer Resultate ist allerdings eine Kalibrierung der auf dem Markt befindlichen Geräte nötig. In dem vom BMWi geförderten Technologie-Transfer-Projekt zwischen der PTB und der Fa. PicoQuant GmbH, Berlin, werden spezielle Kalibratoren auf der Basis einzelner Farbstoffmoleküle entwickelt und erprobt, um quantitative fluoreszenzmikroskopische Messverfahren realisieren zu können (Bild 4).

Natürlich wird auch mit anderen Förderprogrammen der Technologietransfer unterstützt. So förderte das Programm ProFit der Investitionsbank Berlin ein Kooperationsprojekt zur Fluoreszenzbildgebung, welches rheumatische Entzündungen der Fingergelenke in einem sehr frühen Stadium sichtbar macht. Es arbeitet mit einem Fluoreszenz-Farbstoff, der von nah-infrarotem Licht angeregt wird, ist absolut unschädlich und zudem einfach, schnell und preiswert einzusetzen. Eine orientierende klinische Studie, durchgeführt von der Fa. mivenion, Berlin, der PTB und den HELIOS Kliniken, verläuft sehr erfolgreich. Nun sollen weitere klinische Studien folgen, an denen unter Federführung der Firma mivenion bundesweit mehrere Kliniken beteiligt sind. Zur Herstellung weiterer Geräte für die Fluoreszenz-Rheumabildgebung hat mivenion die Lizenzrechte von der PTB erworben. Inzwischen sind die ersten Geräte

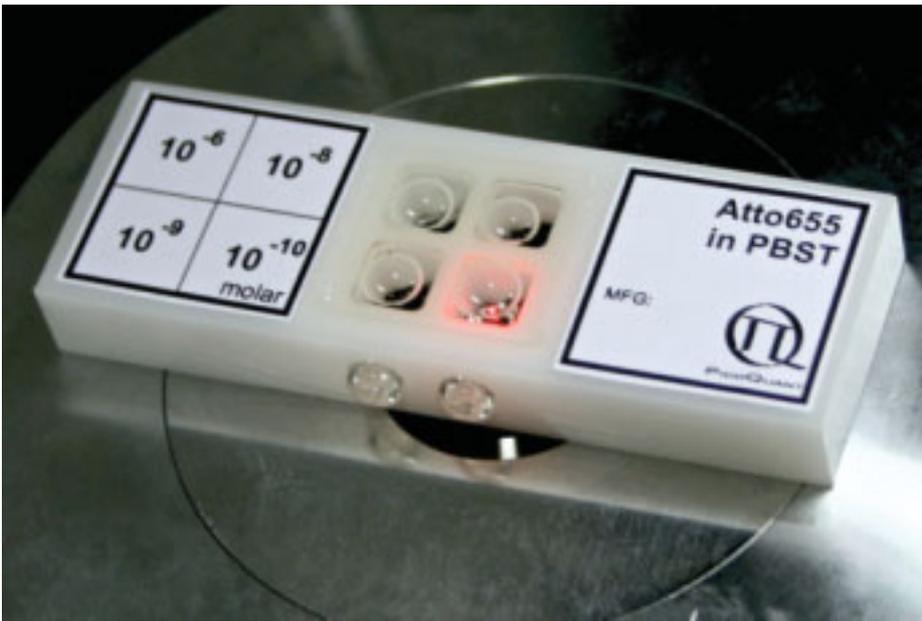


Bild 4: Die Referenzprobe ist ein einfach zu benutzender, versiegelter Delrin-Container, welcher ein oder zwei Referenzfarbstofflösungen (Atto655, Atto488) mit bekannter molekularer Helligkeit und Fluoreszenzlebensdauer enthält. Die vier in der Abbildung sichtbaren Kammern enthalten verschiedene Konzentrationen ( $10^{-6}$ ,  $10^{-8}$ ,  $10^{-9}$ ,  $10^{-10}$  Molar), welche es ermöglichen, die Referenzprobe sowohl zur Justage als auch zur alltäglichen Kontrolle oder zum Vergleich verschiedener Instrumente zu verwenden.

bereits an rheumatologische Kliniken und niedergelassene Ärzte geliefert worden. Auch die gesetzlichen Krankenkassen haben schon Interesse an dem Bildgebungsverfahren gezeigt. Es könnte eine Hoffnung für Millionen Rheumakranke sein.

### Regenerative Medizin

Europäisch gefördert im Rahmen des EMRP (European Metrology Research Programme), werden derzeit Arbeiten zur Metrologie auf zellulärer Ebene für die regenerative Medizin durchgeführt, um Hersteller und Entwickler von künstlichem Gewebe und ähnlichen Produkten des „tissue engineering“ bei der Qualitätssicherung zu unterstützen. Die PTB betreibt in dem Projekt die Entwicklung durchflusszytometrischer Verfahren zur Vorselektion von z.B. endothelialen Stammzellen durch Zellsortierung sowie mikroskopischer Verfahren zur Kontrolle des Zellwachstums auf ausgewählten Oberflächen und Gewebegerüsten. Dem Verbundprojekt gehören weiterhin Arbeitsgruppen des National Physical Laboratory (NPL, UK), 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, Finland) an.

### Mathematische Modellierung

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert seit Sommer 2008 das Verbundvorhaben „CDuR32“, in dem

Mittels fluoreszenz-korrelationsspektroskopischer Messungen kann die kombinierte Anregungs-/ Detektionseffizienz über die molekulare Helligkeit sowie das konfokale Volumen mittels der Diffusionszeit gemessen werden, während zeitaufgelöste Einzelphotonenzählung die Bestimmung der Fluoreszenzlebensdauer ermöglicht.

neue Technologien für die Produktion der nächsten Chipgeneration entwickelt werden. Es geht um die Entwicklung und Verbesserung von mathematischen Auswerteverfahren für die Scatterometrie.

In der Halbleitertechnik und auch in vielen anderen Feldern der Technik werden immer kleinere Strukturen erzeugt. So entstehen neuartige Produkteigenschaften und der Gebrauchswert wird bei gleichzeitig reduziertem Material- und Energieeinsatz gesteigert.

Das klassische Verfahren, um kleine Strukturen sichtbar zu machen, ist die Mikroskopie. Die erreichbare Auflösung ist jedoch begrenzt. Da die nano-strukturierten Objekte aber viel kleiner sind als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes, wird ein effektiveres Messprinzip benötigt. Dafür ist entweder Licht viel kleinerer Wellenlänge zu nutzen oder man sucht Zugang mit Hilfe nicht-abbildender Verfahren. Mit der Scatterometrie, bei der die Streuung von Licht an Nano-Strukturen untersucht wird, verbindet die PTB beide Ansätze. Dazu wird sichtbare oder UV-Strahlung auf die

Probe gerichtet und die räumliche Verteilung der gestreuten Strahlung gemessen (Bild 5). Die PTB betreibt für diese Anwendung zwei verschiedene Scatterometer, die mit Licht verschiedener Wellenlängen arbeiten, ein sogenanntes EUV-Scatterometer, welches bei Wellenlängen zwischen 12 nm und 14 nm betrieben wird, und ein DUV-Scatterometer, das Licht einer Wellenlänge von 193 nm verwendet.

Um jedoch aus dem Streulicht die kritischen Abmessungen des Oberflächenprofils z.B. einer Halbleiterphotomaske abzuleiten, müssen komplexe mathematischer Verfahren kombiniert werden: Zunächst geht es darum, die Maxwell-Gleichungen für die Lichtausbreitung in Materie für ein gegebenes Profil- und Materialmodell numerisch sehr genau zu lösen, um damit Streulichtverteilungen in Abhängigkeit von Modellparametern zu berechnen. Dann werden die Profilparameter iterativ so lange variiert, bis das gemessene Streulicht möglichst gut reproduziert wird (Bild 6).

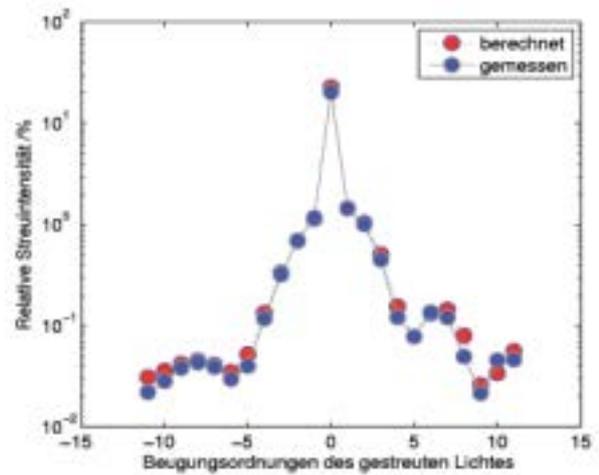
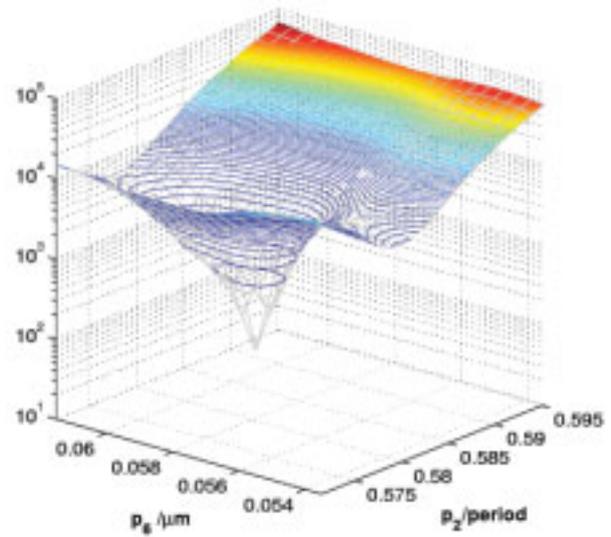
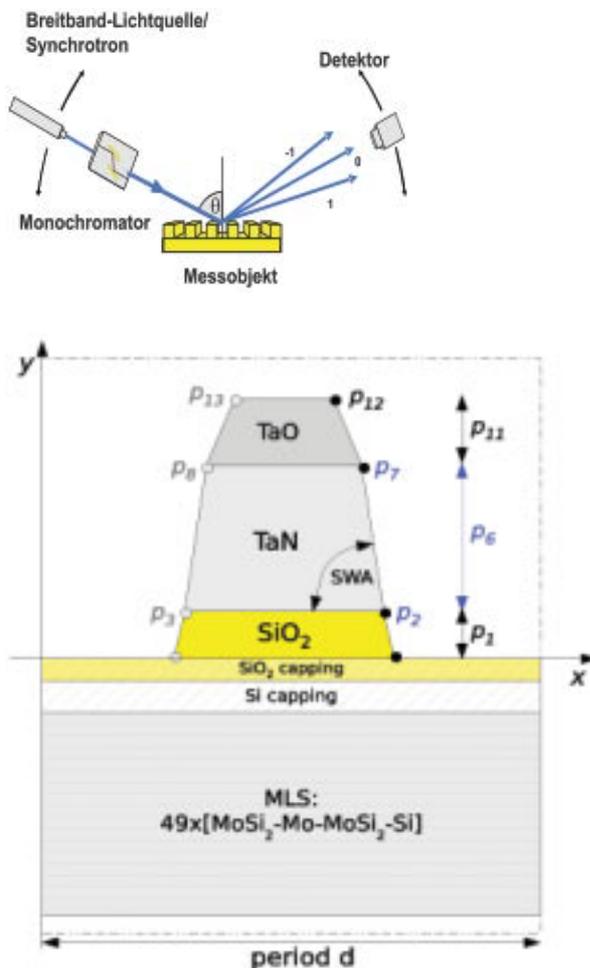


Bild 6: Ergebnis einer Profilrekonstruktion: Für das berechnete optimale Profil werden die gemessenen mit den berechneten Streuintensitäten der Messung verglichen. Die minimalen Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Werten geben einen ersten Hinweis auf die Genauigkeit der bestimmten Parameter. Oben: Summe der Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Werten im Parameterraum. Unten: Direkter Vergleich von simulierten und gemessenen Werten für die bestimmten Geometrieparameter.

Bild 5: Schema einer indirekten Messung zur Bestimmung der Objektgeometrie durch Streudaten (links oben) und typisches Profil einer EUV-Maske (unten).

Mathematische Modelle und Berechnungen sind insbesondere auch notwendig, um die Präzision bzw. Messunsicherheit der gemessenen Strukturparameter anzugeben. Monte-Carlo- und Kovarianz-Verfahren werden dabei zur Bestimmung der Messunsicherheit der rekonstruierten Profilparameter eingesetzt.

### Magnetische Nanopartikel

Zu guter Letzt soll ein Beispiel beleuchtet werden, das deutlich macht, wie aus einem Messsystem der Grundlagenforschung auf der Basis einer Hochtechnologie (Supraleitungselektronik) eine produktnahe Lösung in konventioneller Technologie entsteht.

Schon in den neunziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde in der PTB die SQUID-Messtechnik zur Charakterisierung magnetischer Nanopartikel entwickelt. In einem im Verbund mit der Schering AG durchgeführten Forschungsvorhaben wurde das Potential magnetischer Nanopartikel zum hochempfindlichen Nachweis biochemischer Bindungsreaktionen erkundet. In diesem Zusammenhang sicherte sich die PTB gemeinsam mit der Schering AG bereits damals die Schutzrechte für den sogenannten magnetischen Relaxationsimmunoassay (MARIA).

Seitdem wurden in der Abteilung 8 das Verfahren und die Messtechnik der Magnetrelaxometrie auf der Grundlage der SQUID-Messtechnik kontinuierlich im Rahmen interdisziplinärer, durch Drittmittel geförderter Forschungsprojekte weiterentwickelt (Bild 7). Standen dabei zunächst die physikalischen und messtechnischen Grundlagen im Vordergrund, verschob sich das Gewicht der Arbeiten zusehends auf die Anwendung im medizinischen Bereich, als Verfahren für den quantitativen Nachweis von magnetischen Nanopartikeln in biologischem Gewebe bei der Entwicklung neuartiger Nanopartikel-basierter Diagnose- und Therapieformen.

Magnetische Nanopartikel werden zur Zeit klinisch als Kontrastverstärker in der Magnetresonanzbildgebung und in der Therapie für die Hyperthermie eingesetzt. Neuere Bestrebungen gehen dahin, funktionalisierte magne-

tische Nanopartikel, die über ihre spezifischen Liganden selbsttätig ein Ziel im Organismus finden, einzusetzen, um eine noch bessere Effektivität von z.B. Hyperthermie und Drug Targeting zu erreichen.

Allerdings erfordert die *In-vivo*-Anwendung der magnetischen Nanopartikel die Überwachung ihrer kolloidalen Stabilität. Zur Qualitätskontrolle vor der eigentlichen medizinischen Anwendung ist ein schnelles empfindliches Messverfahren zur Analyse des Aggregations- und Bindungsverhaltens magnetischer Nanopartikel unerlässlich, das insbesondere auch in nichttransparenten Medien (Patientenblut) einsetzbar ist.

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundvorhabens wurde in den vergangenen drei Jahren das in der PTB in den vergangenen Jahren entwickelte Know-how einem



Bild 7: In der PTB entwickeltes SQUID-MRX-Spektrometer

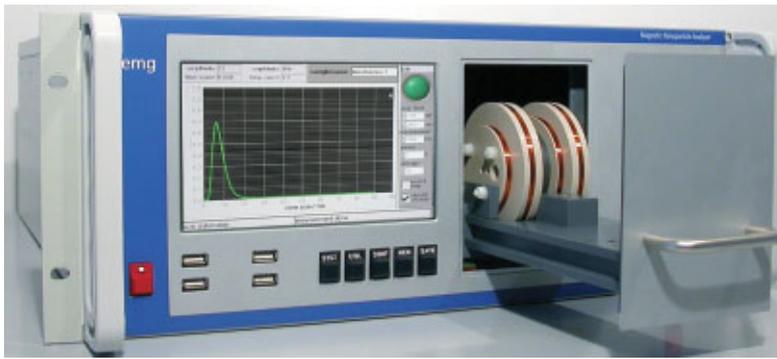


Bild 8: Der Technologietransfer durch die PTB unterstützte maßgeblich die Entwicklung eines kommerziellen MRX-Gerätes durch die TU Braunschweig in Kooperation mit der Magnicon GbR.

Industriepartner vermittelt, der damit in die Lage versetzt wurde, ein eigenständiges Messgerät auf der Basis von kostengünstigen Fluxgatesensoren zu entwickeln. Dieses Gerät steht in Kürze Herstellern und medizinischen Anwendern zur grundlegenden Charakterisierung von magnetischen Nanopartikeln, zur Verfügung (Bild 8).

Das letzte Beispiel zeigt sehr schön, wie vielschichtig die Wege des Technologietransfers sein können und dass es lohnt, in der Forschung und Entwicklung einen langen Atem zu haben.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Numerische Berechnung von Messunsicherheiten

In einer aktuellen Ergänzung zum Leitfaden für die Messunsicherheitsbestimmung in der Metrologie wird ein Monte-Carlo-Verfahren zur numerischen Berechnung von Messunsicherheiten eingeführt. (G. Wübbeler, FB 8.4, [gerd.wuebbeler@ptb.de](mailto:gerd.wuebbeler@ptb.de); C. Elster, FB 8.4, [clemens.elster@ptb.de](mailto:clemens.elster@ptb.de))

#### Analyse dynamischer Messungen

Ein Verfahren zur Bestimmung von Messunsicherheiten für die Analyse dynamischer Messungen ist so erweitert worden, dass damit auch dynamische Messabweichungen bei linearen, zeit-invarianten, dynamischen Systemen berücksichtigt werden können. (S. Eichstädt, FB 8.4, [sascha.eichstaedt@ptb.de](mailto:sascha.eichstaedt@ptb.de); C. Elster, FB 8.4, [clemens.elster@ptb.de](mailto:clemens.elster@ptb.de))

#### Bewertung eines aktuellen Leitfadens zur Messunsicherheitsbestimmung

Die Ergänzung zum „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM-S1)“, in der ein numerisches Monte-Carlo-Verfahren zur Berechnung von Messunsicherheiten beschrieben wird, wurde dahingehend bewertet, ob dieses Verfahren einer Bayes'schen Methode entspricht. (C. Elster, FB 8.4, [clemens.elster@ptb.de](mailto:clemens.elster@ptb.de))

#### Einfluss von systematischen Unsicherheiten und Modellfehlern in der EUV-Scatterometrie

Die scatterometrischen Messverfahren der PTB ermöglichen eine indirekte Messung kritischer Strukturgrößen von lithographischen Masken mit einer Genauigkeit im Nanometerbereich. Um den Einfluss der Schwankung von Modellparametern auf die Messunsicherheit zu quantifizieren, wurden Monte-Carlo-Simulationen bei der Auswertung der Messungen durchgeführt. (H. Groß, FB 8.4, [hermann.gross@ptb.de](mailto:hermann.gross@ptb.de); M. Bär, FB 8.4, [markus.baer@ptb.de](mailto:markus.baer@ptb.de))

#### Simulation der Ausbreitung aufprallender und freier Strahlen im Rahmen des Explosionsschutzes

Die Ausbreitung und Durchmischung fluider Strahlen mit unterschiedlichen Bestandteilen wurde mit numerischen Simulationen modelliert. (G. Lindner, FB 8.4, [gert.lindner@ptb.de](mailto:gert.lindner@ptb.de); R. Model, FB 8.4, [regine.model@ptb.de](mailto:regine.model@ptb.de))

#### Risikobeurteilung metrologischer Software über Maßzahlen

Im Rahmen der vom JCGM/BIPM eingerichteten Ad-hoc-Gruppe „Measurement Software“ ist in Zusammenarbeit von PTB und NPL ein risiko-orientierter Ansatz zur Entwicklung und Bewertung metrologischer Software entwickelt worden. (N. Greif, FB 8.5, [norbert.greif@ptb.de](mailto:norbert.greif@ptb.de))

#### Messung neuronaler Ströme mittels Niedrigfeld-MR

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts „Bernstein Fokus Neurotechnologie“ soll der Einfluss neuronaler Ströme auf das Magnetresonanzsignal im niedrigen Feld untersucht werden. (R. Körber, FB 8.2, [rainer.koerber@ptb.de](mailto:rainer.koerber@ptb.de))

### Metrologie für die Wirtschaft

#### Klinische Studie zum fluoreszenzgestützten Nachweis rheumatischer Erkrankungen erfolgreich abgeschlossen

Ein Projekt zur Früherkennung von Rheuma wurde in Kooperation mit der mivenion GmbH und den Helios Kliniken erfolgreich abgeschlossen. (B. Ebert, FB 8.3, [bernd.ebert@ptb.de](mailto:bernd.ebert@ptb.de); R. Macdonald, FB 8.3, [rainer.macdonald@ptb.de](mailto:rainer.macdonald@ptb.de))

#### AP39-TSP: eine molekulare Probe zur Bildgebung rheumatoider Arthritis in Sprunggelenken *in vivo*

Mit einem für die molekulare Bildgebung entwickelten hochempfindlichen Laser-Bildgebungssystem wurde erstmalig die ED-B-Expression in entzündeten Gelenken *in vivo* analysiert. (B. Ebert, FB 8.3, [bernd.ebert@ptb.de](mailto:bernd.ebert@ptb.de))

**MNPQ-Projekt „AHD-Methode zur Bestimmung der Hämoglobin-Konzentration“**

Im Rahmen eines MNPQ-Projektes in Zusammenarbeit mit der Medisynthana Diagnostics GmbH & Co. KG wurden Arbeiten zur Validierung der AHD-Methode als verbessertes Routine- und neues Referenzverfahren zur Bestimmung der Hämoglobin-Konzentration in Blut aufgenommen. (S. Schädel-Ebner, FB 8.3, sandra.schaedel-ebner@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

**Auflösungsvermögen und Grenzen der Fluoreszenz-Lebensdauer-Korrelations-Spektroskopie (FLCS)**

In einem Kooperationsprojekt mit der Fa. PicoQuant GmbH Berlin wurde nachgewiesen, dass FLCS korrekte Konzentrationen im Bereich von pikomolaren bis mikromolaren Konzentrationen liefert und dass Konzentrationen und Diffusionskoeffizienten selbst für binäre Mischungen von spektral ununterscheidbaren Farbstoffen mit verschiedenen Fluoreszenzlebensdauern mit FLCS verlässlich extrahiert werden können. (S. Rüttinger, FB 8.3, steffen.ruettinger@ptb.de)

**Validierung eines neuen optischen Ebenheitsreferenzsystems mittels virtueller Experimente**

Ein neues optisches Referenzsystem für die Ebenheitsmessung wurde mittels virtueller Experimente validiert. (M. Stavridis, FB 8.4, manuel.stavridis@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de; G. Ehret, FB 4.2, gerd.ehret@ptb.de; M. Schulz, FB 4.2, michael.schulz@ptb.de)

**Berücksichtigung von Korrelationen bei der Zeitbereichskalibrierung ultra-schneller Sampling-Oszilloskope**

Zur Bestimmung charakteristischer Kenngrößen ultra-schneller Sampling-Oszilloskope wurden mathematische Verfahren wie Entfaltungsalgorithmen und Monte-Carlo-Methoden unter zusätzlicher Berücksichtigung von Korrelationen erweitert und anschließend validiert. (S. Eichstädt, FB 8.4, sascha.eichstaedt@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de; M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

**Modellgestützte dynamische Kalibrierung von Kraftaufnehmern**

Die modellgestützte dynamische Kalibrierung eines Kraftaufnehmers liefert Parameter, die zur Beurteilung der dynamischen Eigenschaften einer Messkette und ihrer Modellierung unmittelbar verwendet werden können. (A. Link, FB 8.4, alfred.link@ptb.de)

**Quantitatives Imaging magnetischer Nanopartikel**

Untersuchungen mit Hilfe der Multipolentwicklung ergaben, dass durch eine sorgfältige Analyse der Entwicklungsterme über die Bestimmung der Quantität hinaus auch Aussagen über die Lokalisation und die Ausdehnung der Partikelverteilung gewonnen werden können. (W. Haberkorn, FB 8.4, wolfgang.haberkorn@ptb.de; F. Wiekhorst, FB 8.2, frank.wiekhorst@ptb.de)

**Metrologie für die Gesellschaft****Berliner Ultrahochfeld-Facility in Betrieb genommen**

Am 21. Januar 2009 eröffnete Bundesbildungsministerin Prof. Annette Schavan die Berliner Ultrahochfeld-Facility. Die neue Einrichtung auf dem MDC-Campus in Berlin Buch, deren wichtigstes Forschungsgerät ein 7-Tesla-Ganzkörper-Kernspintomograph ist, ist eine gemeinschaftliche Einrichtung von MDC, PTB und Charité. (B. Ittermann, FB 8.1, bernd.ittermann@ptb.de)

**Erster MR-Tomograph der PTB wird abgelöst**

Nach 14 Betriebsjahren wurde der erste Magnetresonanztomograph (MRT) des Hauses, ein Ganzkörper-Scanner vom Typ Bruker Medspec 30/100, außer Betrieb genommen. (B. Ittermann, FB 8.1, bernd.ittermann@ptb.de)

**Herz bildgebung im 7-Tesla-MRT**

Am neuen Berliner 7-Tesla-Kernspintomographen (7-T-MRT) wurden bereits sechs Monate nach Inbetriebnahme die ersten Herzbilder aufgenommen. (B. Ittermann, FB 8.1, bernd.ittermann@ptb.de)

### **7-T-MR-Bildgebung im Kopf mit räumlich selektiver Anregung**

Räumlich selektive Anregung ist eine der spannendsten, neueren Entwicklungen in der Magnetresonanztomographie. Insbesondere zur Bekämpfung bestimmter Bildartefakte in der Ultrahochfeld-MRT bietet diese Technik großes Potential. (F. Seifert, FB 8.1, frank.seifert@ptb.de)

### **UWB-Radar für die hochaufgelöste Detektion kleinster Kopfbewegungen**

Im Rahmen des Forschungsvorhaben ultraMEDIS ist es gelungen, kleinste unfreiwillige Kopfbewegungen, verursacht z. B. durch Atmung und Herzschlag, mittels Ultra breitband(UWB)-Radar verfolgen zu können. (O. Kosch , FG 8.11, olaf.kosch@ptb.de; F. Thiel, FB 8.5, florian.thiel@ptb.de )

### **Magnetresonanzspektroskopische Quantifizierung eines neuronalen Markers im Gehirn: Implikationen für die Genetik psychiatrischer Erkrankungen**

Die Protonen-Magnetresonanzspektroskopie ermöglicht die nichtinvasive Bestimmung von Metabolitkonzentrationen im menschlichen Gehirn. In einer Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern der Berliner Charité wurde am 3-T-MR-Tomographen der PTB die Konzentration des Neuronenmarkers N-Acetylaspartat (NAA) in einer Gehirnregion bestimmt. (F. Schubert, FB 8.1, florian.schubert@ptb.de)

### **SQUID-Messungen zum Gentransfer**

Mit der SQUID-Magnetrelaxometrie konnten magnetische Zellbeladungen im Bereich von wenigen Pikogramm bestimmt werden. (D. Eberbeck, FB 8.2, dietmar.eberbeck@ptb.de)

### **Die klinische Forschergruppe „Magnetische Eisenoxid-Nanopartikel für die Zelluläre und Molekulare MR-Bildgebung (KFO 213)“ an der Charité – Universitätsmedizin Berlin hat die Arbeit aufgenommen**

In dieser von der DFG geförderten interdisziplinären klinischen Forschergruppe arbeiten Arbeitsgruppen der Radiologie, der kardiovaskulären Medizin und den Neurowissenschaften aus der Charité mit Physikern der PTB zusammen. (F. Wiekhorst, AG 21, frank.wiekhorst@ptb.de)

### **Pilotuntersuchungen zur neurovaskulären Kopplung bei Schlaganfallpatienten mittels Kombination von DC-Magnetenzephalographie und zeitaufgelöster Nahinfrarotspektroskopie**

Die Kombination von DC-Magnetenzephalographie (DC-MEG) und zeitaufgelöster Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) erlaubt es, neuronale und vaskuläre Antworten auf z. B. motorische Stimulation simultan zu messen und die neurovaskuläre Kopplung zu untersuchen. (T. Sander, FB 8.2, tilmann.sander@ptb.de; O. Steinkellner, FB 8.3, oliver.steinkellner@ptb.de; H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

### **Quantitative Überprüfung der optischen Perfusionsmessung an Schlaganfallpatienten durch perfusionsgewichtete Magnetresonanzbildgebung**

Die zeitaufgelöste Nahinfrarotbildgebung ermöglicht die Beobachtung der Passage eines Kontrastmittel-Bolus direkt am Kortex von Schlaganfallpatienten. (O. Steinkellner, FB 8.3, oliver.steinkellner@ptb.de; H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

### **Erfolgreiche klinische Erprobung eines Fluoreszenz-Bildgebungsverfahrens zur Erkennung von Brustkrebs**

Im Rahmen einer klinischen Studie an der Charité Berlin wurde ein von der PTB entwickeltes Bildgebungsverfahren zur Erkennung von Brustkrebs erprobt, bei dem mit Hilfe eines Kontrastmittels die Permeabilität der Blutgefäße im Tumor zur Unterscheidung zwischen Karzinomen und gutartigen Läsionen ausgenutzt wird. (D. Grosenick, FB 8.3, dirk.grosenick@ptb.de; A. Hagen, FB 8.3, axel.hagen@ptb.de)

### **Erste Schritte in Richtung quantitativer Fluoreszenzbildgebung**

Durch ein neuartiges Bildgebungsverfahren, bei dem sowohl EMCCD-Kameras als auch Photomultiplier zum Einsatz kommen, konnten durch die Kombination von Tomosynthese und zeitaufgelösten Daten dreidimensionale Darstellungen fluoreszierender Inhomogenitäten in Gewebe-Phantomen erzeugt werden. (A. Hagen, FB 8.3, axel.hagen@ptb.de; D. Grosenick, FB 8.3, dirk.grosenick@ptb.de)

**Neues molekulares Diagnose- und Therapieverfahren für die Medizin**

Schwerpunkt des Projektes ist der Einsatz der genterapeutischen Blockade der Hämsynthese via RNA-Interferenz für Diagnose und Therapie von Tumorerkrankungen. (B. Ebert, FB 8.3, bernd.ebert@ptb.de; J. Voigt, FB 8.3, jan.voigt@ptb.de)

**Verbesserung der Spezifität beim Nachweis roter und weißer Blutzellen in cerebrospinaler Flüssigkeit (Liquor) durch immunologische Markierungen**

Zur Identifikation von roten und weißen Blutzellen in Liquorproben werden auch immunologische Färbemethoden eingesetzt. In Ringversuchsproben hat sich der monoklonale Antikörper CD235a zum Nachweis von Erythrozyten erfolgreich einsetzen lassen. (J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de; M. Kammel, martin.kammel@ptb.de, FB 8.3)

**Verbundvorhaben zur Erarbeitung von Grundlagen mikrofluidischer Durchflusssyztometer erfolgreich beendet**

Das von der Investitionsbank Berlin (IBB) geförderte und vom Europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanzierte Projekt zur Erarbeitung von Grundlagen bei der Fertigung und Anwendung mikrostrukturierter Durchflusssyztometer wurde erfolgreich abgeschlossen. (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)

**Vergleichende Analyse von Wahlgerätekonzepten zur Vorbereitung einer neuen Bundeswahlgeräteverordnung**

In Vorbereitung der Umsetzung des Bundesverfassungsgerichtsurteils zu Wahlgeräten ist eine vergleichende Untersuchung bekannter Wahlgerätekonzepte durchgeführt worden. (N. Greif, FB 8.5, norbert.greif@ptb.de)

**Ein weiterer Baustein für hohe Software-sicherheit im gesetzlichen Messwesen geschaffen**

Ein modernes Verfahren zur Sicherstellung der Integrität und der Authentizität von Software, das auf der Nutzung elektronischer Signaturen basiert, steht in der PTB zur Anwendung bereit. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de; J. Neumann, FB 8.5, joerg.neumann@ptb.de)

**Verifikationsverfahren für Mess- und Kassendaten entwickelt**

Im Rahmen des BMWi-geförderten Vorhabens INSIKA ist die Entwicklung eines Verfahrens abgeschlossen worden, mit dem Mess- und Kassendaten zuverlässig durch Prüfinstanzen verifiziert werden können. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de; J. Wolff, FB 8.5, joerg.wolff@ptb.de)

**Vorgehensweise für die Prüfung von Messgeräten mit Standardbetriebssystemen entwickelt**

Für die in zunehmendem Umfang mit Linux- und Windows-Rechnern ausgestatteten Messgeräte ist eine Prüfstrategie entwickelt worden, um den besonderen Herausforderungen in nachvollziehbarer Form gerecht zu werden. (U. Grottker, FB 8.5, ulrich.grottker@ptb.de)

**Technische Richtlinie für Geldspielgeräte bei der EU notifiziert**

Im Zusammenhang mit einem Erlass des Bundeswirtschaftsministeriums war es erforderlich geworden, die technische Richtlinie für Geldspielgeräte grundlegend zu überarbeiten. (D. Richter, FB 8.5, dieter.richter@ptb.de; R. Kuschfeldt, FB 8.5, reiner.kuschfeldt@ptb.de)

**Qualitative Modellierung und Analyse von Herzrhythmusstörungen**

Mit Hilfe von Computersimulationen ist es möglich, lebensbedrohliche Arrhythmien des Herzsclages zu modellieren und mathematisch zu analysieren. (M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

**Homogenisierung in nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen**

Die Modellierung von nichtlinearen Evolutionsgleichungen in räumlich heterogenen Systemen ist relevant für viele biologische Systeme, z. B. für die Erregungsausbreitung im Herzmuskel (S. Alonso, FB 8.4, sergio.alonso@ptb.de, M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

### **Datenanalyse für MEG**

Im Rahmen eines von der DFG geförderten und gemeinsam mit der TU Berlin (Prof. Orglmeister) durchgeführten Projekts wurde 2009 eine neue Methodik für die räumliche Trennung abhängiger Quellsignale im MEG entwickelt. (F. Kohl, FB 8.4, [florian.kohl@ptb.de](mailto:florian.kohl@ptb.de); G. Wübbeler, FB 8.4, [gerd.wuebbeler@ptb.de](mailto:gerd.wuebbeler@ptb.de); C. Elster, FB 8.4, [clemens.elster@ptb.de](mailto:clemens.elster@ptb.de))

### **Internationale Zusammenarbeit**

#### **Anwendung atomarer Mikro-Magnetometer zur Erfassung des MKGs und magnetischer Relaxationskurven**

Im National Institute of Standards and Technology/USA (NIST) wurden hochempfindliche atomare Mikro-Magnetometer entwickelt, die auf der Technologie miniaturisierter Atomuhren basieren. Ein solches Mikro-Magnetometer des NIST wurde im Berliner magnetisch geschirmten Raum (BMSR-2) evaluiert. (T. Sander-Thömmes, AG 21, [tilmann.sander-thoemmes@ptb.de](mailto:tilmann.sander-thoemmes@ptb.de))

# Anhang

# Der Deutsche Kalibrierdienst

In Deutschland ist die PTB zentraler Ansprechpartner für die Industrie in Fragen der Messtechnik. Die Weitergabe der Einheiten wurde durch die Akkreditierungen des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) größtenteils auf die Ebene der industriellen Messtechnik verlagert. Die 425 DKD-Kalibrierlaboratorien wurden durch die DKD-Akkreditierungsstelle kompetent überwacht und in nationalen und internationalen Gremien vertreten.

DKD-Kalibrierscheine gewährleisten den Nachweis für die messtechnische Rückführung auf nationale oder internationale Normale.

Nach der europäischen Verordnung (EG) Nr. 765/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. Juli 2008 über die Vorschriften für die Akkreditierung und Marktüberwachung im Zusammenhang mit der Vermarktung von Produkten ist die Akkreditierung als eine hoheitliche Aufgabe festgeschrieben und es darf ab 01.01.2010 jeweils nur noch eine Akkreditierungsstelle je EG-Mitgliedsland geben. Dies hat eine tiefgreifende Umstrukturierung der deutschen Akkreditierungslandschaft bewirkt. Im Zuge dessen wurden im Dezember 2009 der Deutsche Kalibrierdienst DKD und die DGA Deutsche Gesellschaft für Akkreditierung GmbH (durch Verschmelzung der Akkreditierungsstellen DACH, DAP und TGA/DATech entstanden) in die DAkKS übergeleitet. Zum Erhalt der Kompetenz wurde das interne Personal der alten Akkreditierungsstellen sowie das externe Personal in Form der Begutachter in die DAkKS überführt.

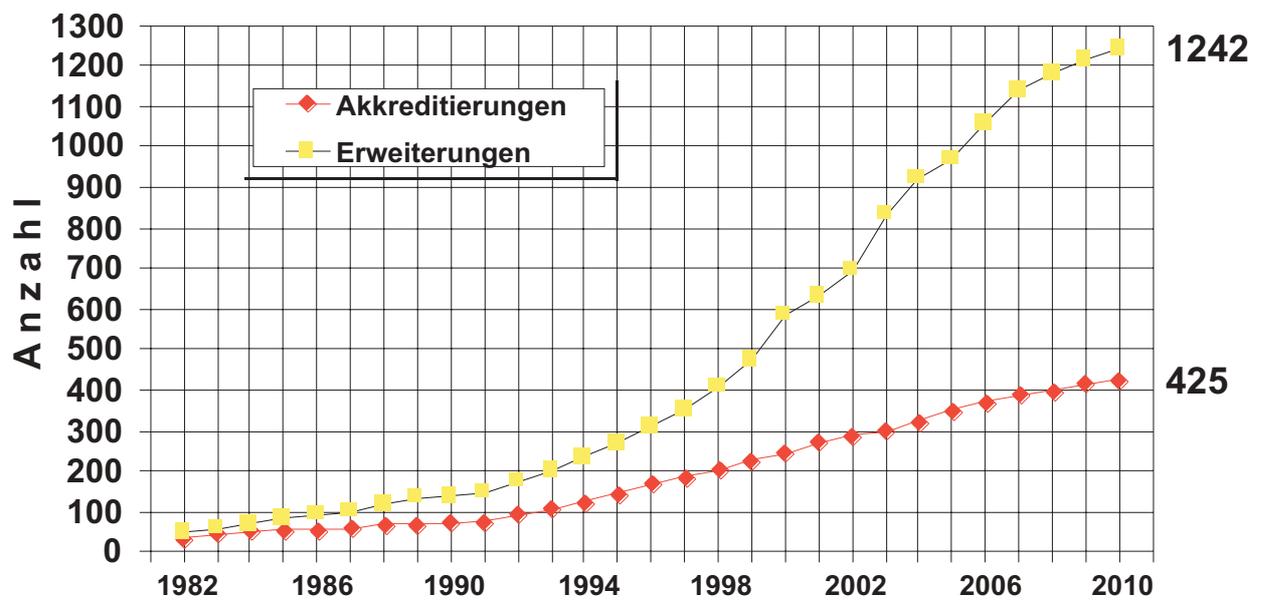
Am 01.01.2010 hat die DAkKS Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH ihre Tätigkeit aufgenommen. Dazu wurde die DAkKS gemäß dem Akkreditierungsstellengesetz als die nationale Akkreditierungsstelle beliehen.

Sie wird in Deutschland alle Akkreditierungen gemäß der EG-VO Nr. 765/2008 im gesetzlich geregelten und gesetzlich nicht geregelten Bereich durchführen. Die DAkKS unterliegt dem deutschen Verwaltungsrecht und wird die Akkreditierungstätigkeiten in Deutschland wie eine Behörde wahrnehmen.

Alle Konformitätsbewertungsstellen (hier: Kalibrierlaboratorien) werden von der DAkKS akkreditiert. Die DAkKS übernimmt gemäß dem AkkStelleG ferner die Überwachungspflichten für alle Akkreditierungen, die vor dem 01.01.2010 erteilt wurden.

Vor dem Hintergrund der Globalisierung und der stark exportorientierten deutschen Wirtschaft wurde die weltweite Anerkennung der DKD-Kalibrierscheine gewährleistet durch die Mitgliedschaft und Anerkennung in der EA (European co-operation for Accreditation) und der ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation). Die EA hat der Übertragung der Mitgliedschaft von DKD und DGA auf die DAkKS auf ihrer 24. Vollversammlung zugestimmt. Damit ist sichergestellt, dass die weltweite Anerkennung von DKD-Kalibrierscheinen, in Zukunft DAkKS-Kalibrierscheinen, weiterhin besteht.

Im Ausland sind derzeit etwa 37 Laboratorien (z. T. nationale Metrologieinstitute) durch den DKD akkreditiert. Die Betreuung von akkreditierten Laboratorien in Staaten des Europäischen Wirtschaftsraumes (EWR) wird gemäß der EG-VO Nr. 765 auf die jeweils zuständigen nationalen Akkreditierungsstellen übertragen. Außerhalb des EWR wird die DAkKS unter Einhaltung der Regeln der EA und der ILAC sich weiterhin mit der Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien befassen, ganz der Tradition des Deutschen Kalibrierdienstes verpflichtet.



Die Entwicklung des DKD und seine Akzeptanz bei den beteiligten Industriefirmen lässt sich nicht nur an der nach wie vor wachsenden Anzahl der akkreditierten Laboratorien ablesen, sondern auch an deren Erweiterungen. Die DKD-Laboratorien passen ihre Kalibriermöglichkeiten laufend den Erfordernissen des Marktes bzw. den gestiegenen Anforderungen an die Messgenauigkeit an. Die derzeitige Gesamtzahl akkreditierter DKD-Laboratorien resultiert aus 24 Neuakkreditierungen im Berichtsjahr, denen 13 Beendigungen von Akkreditierungen gegenüberstehen. (Stand: 30. 9. 2009)



# Kuratorium

## Mitglieder

Präsident des Kuratoriums

**Ministerialdirektor Jürgen Meyer**

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

**Dr.-Ing. Axel Anderlohr**

Geschäftsführer TÜV Pfalz GmbH, Kaiserslautern

**Prof. Dr. rer. nat. Gisela Anton**

Physikalisches Institut IV der Universität Erlangen

**Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Auweter-Kurtz**

Stuttgart

**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**

Geschäftsführung der TST Biometrics GmbH,  
München

**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**

Komm. 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**

BASF SE, Ludwigshafen

**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 Metrologiezentrum,  
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

**Prof. Dr. Hans Schuler**

Vice President Engineering Service,  
BASF SE, Ludwigshafen

**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. e. h. mult. Dr. rer. nat. Martin Winterkorn**

Vorstandsvorsitzender der Volkswagen AG,  
Wolfsburg

**Prof. Dr. rer. nat. Eberhard Umbach**

Präsident des Karlsruher Instituts für Technologie

**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

<b>Präsidium</b>			Fachbereich PST Präsidialer Stab	Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
<b>Präsident</b>	<b>Vizepräsident</b>	<b>Mitglied des Präsidiums</b>		
Prof. Dr. E. O. Göbel ☎ 1000	Prof. Dr. M. Peters ☎ 2000	Dr. J. Stenger ☎ 3000	Dr. R. Wynands ☎ 1009	Dr. Dr. J. Simon ☎ 3005

<b>Abteilung 1 Mechanik und Akustik</b>	<b>Abteilung 2 Elektrizität</b>	<b>Abteilung 3 Chemische Physik u. Explosionsschutz</b>	<b>Abteilung 4 Optik</b>	<b>Abteilung 5 Fertigungsmesstechnik</b>
Dr. R. Schwartz ☎ 1010	Dr. U. Siegner ☎ 2010	Prof. Dr. K.-D. Sommer ☎ 3010	Dr. F. Riehle ☎ 4010	Dr. H. Bosse ☎ 5010

<b>Fachbereich 1.1 Masse</b>	<b>Fachbereich 2.1 Gleichstrom und Niederfrequenz</b>	<b>Fachbereich 3.1 Metrologie in der Chemie</b>	<b>Fachbereich 4.1 Photometrie und an- gewandte Radiometrie</b>	<b>Fachbereich 5.1 Oberflächenmess- technik</b>
Dr. P. Zervos ☎ 1100	Dr. J. Melcher ☎ 2100	Dr. B. Güttler ☎ 3100	Dr. K. Stock ☎ 4100	Dr. L. Koenders ☎ 5100
<b>Fachbereich 1.2 Festkörpermechanik</b>	<b>Fachbereich 2.2 Hochfrequenz und Felder</b>	<b>Fachbereich 3.2 Gasanalytik und Zustandsverhalten</b>	<b>Fachbereich 4.2 Bild- und Wellenoptik</b>	<b>Fachbereich 5.2 Dimensionelle Nanometrologie</b>
Dr. R. Kümme ☎ 1200	Dr. T. Schrader ☎ 2200	Prof. Dr. V. Ebert ☎ 3200	Dr. E. Buhr ☎ 4200	*Dr. H. Bosse ☎ 5010
<b>Fachbereich 1.3 Kinematik</b>	<b>Fachbereich 2.3 Elektrische Energiesmesstechnik</b>	<b>Fachbereich 3.3 Stoffeigenschaften und Druck</b>	<b>Fachbereich 4.3 Quantenoptik und Längeneinheit</b>	<b>Fachbereich 5.3 Koordinatenmess- technik</b>
Dr. F. M. Jäger ☎ 1300	Dr. M. Kahmann ☎ 2300	Dr. H. Bauer ☎ 3300	Dr. P. Becker ☎ 4300	Dr. F. Härtig ☎ 5300
<b>Fachbereich 1.4 Gase</b>	<b>Fachbereich 2.4 Quantenelektronik</b>	<b>Fachbereich 3.4 Grundlagen des Explosionsschutzes</b>	<b>Fachbereich 4.4 Zeit und Frequenz</b>	<b>Fachbereich 5.4 Interferometrie an Maßverkörperungen</b>
Dr. H. Többen ☎ 1400	Dr. A. Zorin ☎ 2400	Dr. H. Bothe ☎ 3400	Dr. E. Peik ☎ 4400	Dr. A. Abou-Zeid ☎ 5400
<b>Fachbereich 1.5 Flüssigkeiten</b>	<b>Fachbereich 2.5 Halbleiterphysik und Magnetismus</b>	<b>Fachbereich 3.5 Zünddurchschlags- prozesse</b>	<b>Fachbereich 4.5 Optische Technologien</b>	<b>Fachbereich 5.5 Wissenschaftlicher Gerätebau</b>
Dr. G. Wendt ☎ 1500	Dr. H. W. Schumacher ☎ 2500	Dr. U. Klausmeyer ☎ 3500	Dr. S. Kück ☎ 4500	Prof. Dr. F. Löffler ☎ 5500
<b>Fachbereich 1.6 Schall</b>	<b>Fachbereich 2.6 Elektrische Quantenmetrologie</b>	<b>Fachbereich 3.6 System- und Eigensicherheit</b>		
Dr. C. Koch ☎ 1600	Dr. F. J. Ahlers ☎ 2600	Dr. U. Johannsmeyer ☎ 3600		
<b>Fachbereich 1.7 Angewandte Akustik</b>		<b>Fachbereich 3.7 Zündquellensicherheit</b>		
Prof. Dr. W. Scholl ☎ 1700		Dr. M. Beyer ☎ 3700		

## Deutscher Kalibrierdienst

Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes	
Dr. M. Wolf ☎ 1900	Aufsicht: BMWi

Benannte Stelle (Nummer 0102) nach  
EG-Richtlinien 94/9/EG, 2009/23/EG,  
2004/22/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 2009

## Vertreter d. Präsidenten in Berlin

Dr. W. Buck  
☎ (Ch) 7454

## Qualitätsmanager

Dr. A. Odin  
☎ 8330

**Abteilung 6  
Ionisierende Strahlung**  
  
Dr. H. Janßen  
☎ 6010

**Abteilung 7  
Temperatur und  
Synchrotronstrahlung**  
  
Dr. W. Buck  
☎ (Ch) 7454

**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  
Röntgenmesstechnik 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  
Radiometrie mit  
Synchrotronstrahlung**  
Dr. G. Ulm  
☎ (Ch) 7312

**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  
Strahlenschutz-  
dosimetrie**  
Dr. P. Ambrosi  
☎ 6300

**Fachbereich 7.3  
Detektorradiometrie  
und Strahlungs-  
thermometrie**  
Dr. J. Hollandt  
☎ (Ch) 7369

**Fachbereich 8.3  
Biomedizinische Optik**  
Prof. Dr. R. Macdonald  
☎ (Ch) 7542

**Fachbereich Q.3  
Gesetzl. Messwesen u.  
Technologietransfer**  
Dr. P. Ulbig  
☎ 8300

**Referat Z.13  
Justitiariat**  
M. Gahrens  
☎ 9130

**Fachbereich 6.4  
Ionenbeschl. u. Refe-  
renzstrahlungsfelder**  
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  
Informations-  
technologie**  
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  
Kryo- und Vakuumphysik**  
Dr. T. Schurig  
☎ (Ch) 7290

**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  
Wärme**  
Dr. T. Lederer  
☎ (Ch) 7230

**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 IB.T  
Technisch-wissensch.  
Infrastruktur Berlin**  
Dr. F. Melchert  
☎ (Ch) 7446

**Referat Z.17  
Ausbildung**  
P. J. Dickers  
☎ 9240

## Ausschüsse

Personal	A-PE	Dr. Weiß	☎ 8010
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) 7360

## Gleichstellungsbeauftragte

B. Behrens ☎ 9133

## Gesamtvertretung der Schwerbehinderten

R. Lütge ☎ 1097

## Vertretung der Schwerbehinderten Braunschweig

R. Lütge ☎ 1097

## Vertretung der Schwerbehinderten Berlin

I. Wichmann ☎ (Ch) 7380

## Zeichenerklärung

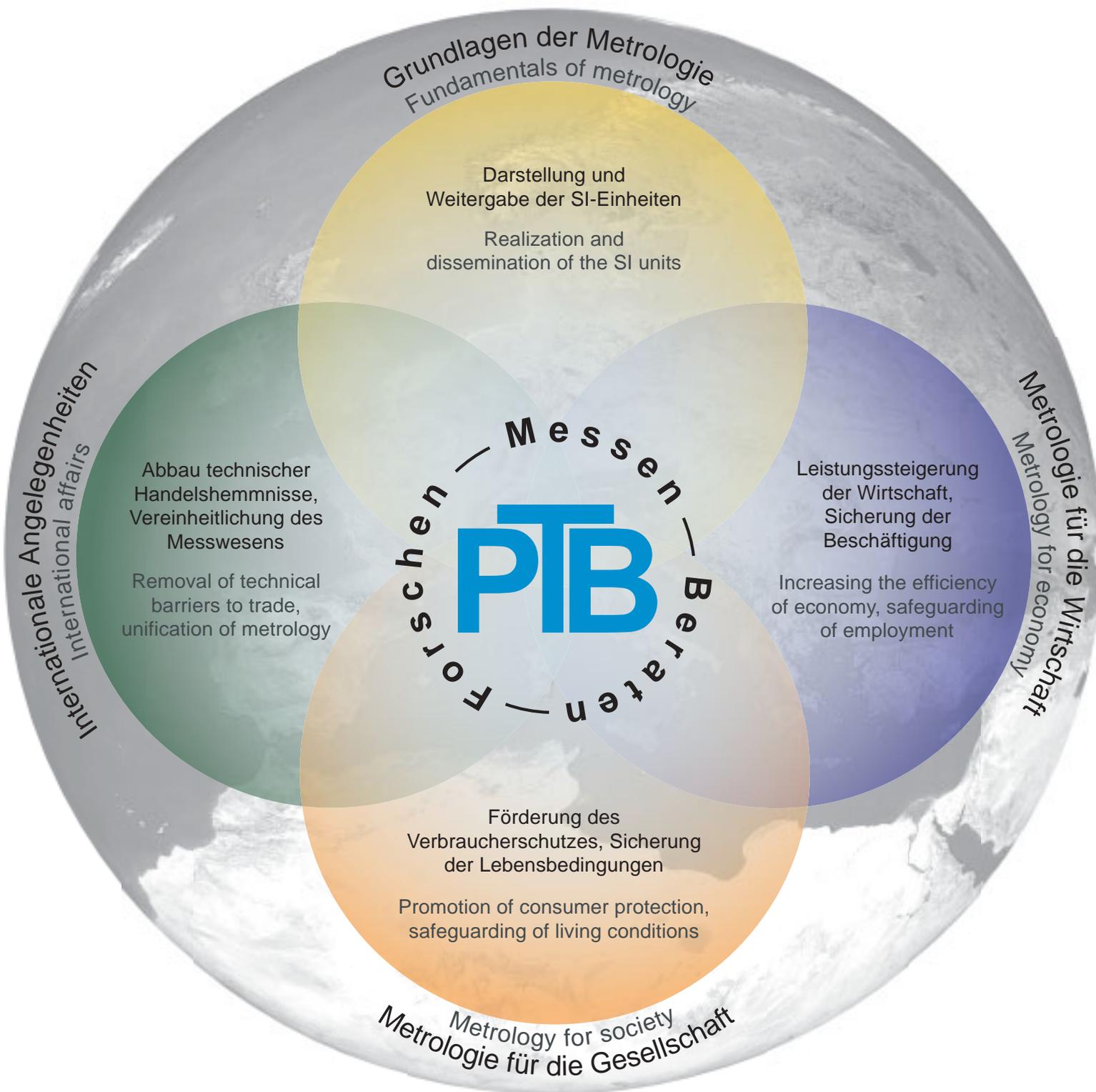
☎(0531) 592-0 Braunschweig/Durchwahl 592 ...

☎(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, s. S. 166) 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 Vermark-

tung durch Innovationen in Anspruch genommen werden können. Eine wichtige Rolle im Knowhow-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 Um-

setzung der Europäischen Messgeräterichtlinie (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.

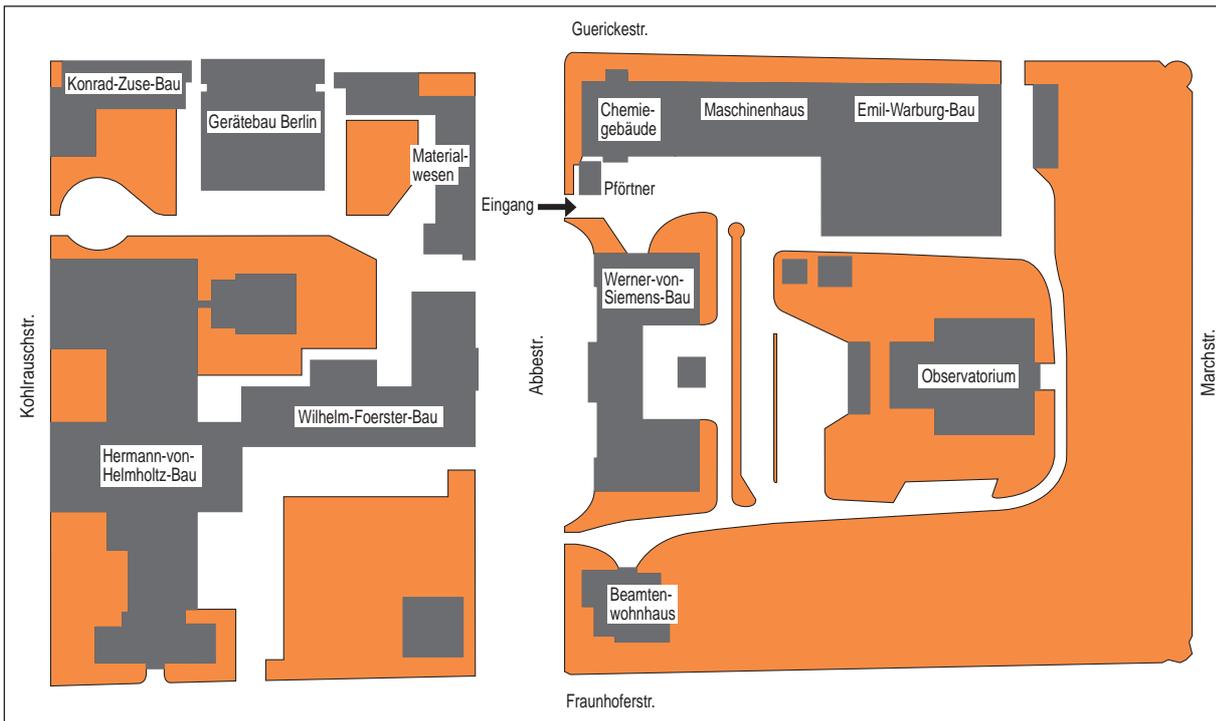
Wesentliches Element der Kooperation mit Partnerinstituten sind internationale „Key Comparisons“ von Normalen und Normalmesseinrichtungen und sich daraus ableitende F&E-Arbeiten. Im Rahmen der internationalen Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Messergebnissen und Zertifikaten der nationalen Metrologieinstitute und der akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien kommt diesen Vergleichen besondere Bedeutung zu.

Die Anforderungen an die Metrologie werden in Zukunft sowohl vom Umfang als auch von der Komplexität her stetig wachsen, sodass ein einzelnes Institut nicht sämtlichen Ansprüchen auf Dauer genügen kann. Koordination und Kooperation bei F&E und Dienstleistungen sind daher unumgänglich. Die rechtsfähige europäische Metrologieorganisation EURAMET stellt hier die erforderlichen Strukturen zur Durchführung eines europäischen Metrologieforschungsprogramms zur Verfügung.

Neben ihrem europäischen Engagement arbeitet die PTB ebenfalls maßgeblich in allen internationalen Metrologieorganisationen mit, zu einem erheblichen Teil in leitender Funktion. Außerdem leistet die PTB einen wesentlichen Beitrag zur internationalen Normung durch Mitarbeit in Gremien von ISO, IEC, CEN, CENELEC. Die weltweite Angleichung von Anforderungen und Prüfvorschriften im gesetzlichen Messwesen dient dem Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse und damit der exportorientierten deutschen Messgeräteindustrie. Mit diesen Zielen arbeitet die PTB aktiv in OIML und WELMEC mit.

Einen erheblichen Umfang nimmt die Technische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern ein. Die PTB gibt ihre Erfahrungen weiter und leistet aktive Hilfe beim Aufbau der technischen Infrastruktur für die Metrologie sowie für das Normen-, Prüf- und Qualitätswesen einschließlich der Akkreditierung und der Zertifizierung. Die finanziellen Mittel werden überwiegend vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) sowie weiteren nationalen und internationalen Gebern, wie der EU und der Weltbank, zur Verfügung gestellt.

# Geländeplan Berlin-Charlottenburg



100 Meter

Legende zum Geländeplan Braunschweig

## Präsidium

Zentralgebäude

## Abteilung Z

**Verwaltung und Betrieb**  
Annahme- und Versandgebäude  
Fahrbereitschaft  
Gästehaus  
Hauptwerkstatt mit Materiallager  
Kasino  
Kohlrausch-Bau  
Vieweg-Bau  
Wache  
Wirtschaftsgebäude  
Zentralgebäude

## Abteilung 1 Mechanik und Akustik

Abbe-Bau  
Bessel-Bau  
Bunsen-Bau  
Gauß-Bau  
Helmholtz-Bau I  
Helmholtz-Bau II  
Leibniz-Bau  
Prandtl-Bau  
Schlichting-Bau  
Willy-Wien-Turm

## Abteilung 2

**Elektrizität**  
Heisenberg-Bau  
Hertz-Bau  
Kohlrausch-Bau  
Meißner-Bau  
Ohm-Bau  
Prandtl-Bau  
Reinraumzentrum  
Schering-Bau  
Gumlich-Haus

## Abteilung 3 Thermodynamik und Explosionsschutz

Abbe-Bau  
Bunsen-Bau  
Explosionsprüfstand  
Nernst-Bau  
Planck-Bau  
Raumzellen-Bau IV  
Sicherheitstechnik  
Weber-Bau

## Abteilung 4

**Optik**  
Bessel-Bau  
Einstein-Bau  
Giebe-Bau  
Kopfermann-Bau  
v.-Laue-Bau  
Paschen-Bau  
Reinraumzentrum  
Vieweg-Bau

## Abteilung 5 Fertigungsmesstechnik

Abbe-Bau  
Bessel-Bau  
Bothe-Bau  
Hauptwerkstatt  
Kohlrausch-Bau  
Meißner-Bau  
Meitner-Bau  
Ohm-Bau  
Paschen-Bau  
Reinraumzentrum

## Abteilung 6

**Ionisierende Strahlung**  
Bothe-Bau  
Chadwick-Bau  
Elster-Geitel-Bau  
Geiger-Bau  
Hahn-Bau  
Meitner-Bau  
Röntgen-Bau

## Abteilung Q Wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben

Annahme- und Versandgebäude  
Betriebswerkstätten  
Bibliothek  
Elektrozentrale  
Feuerwehr  
Kohlrausch-Bau  
Vieweg-Bau  
Zentralgebäude

**PÖ**  
Zentralgebäude

unterstrichen: Sitz Abteilungsleitung