

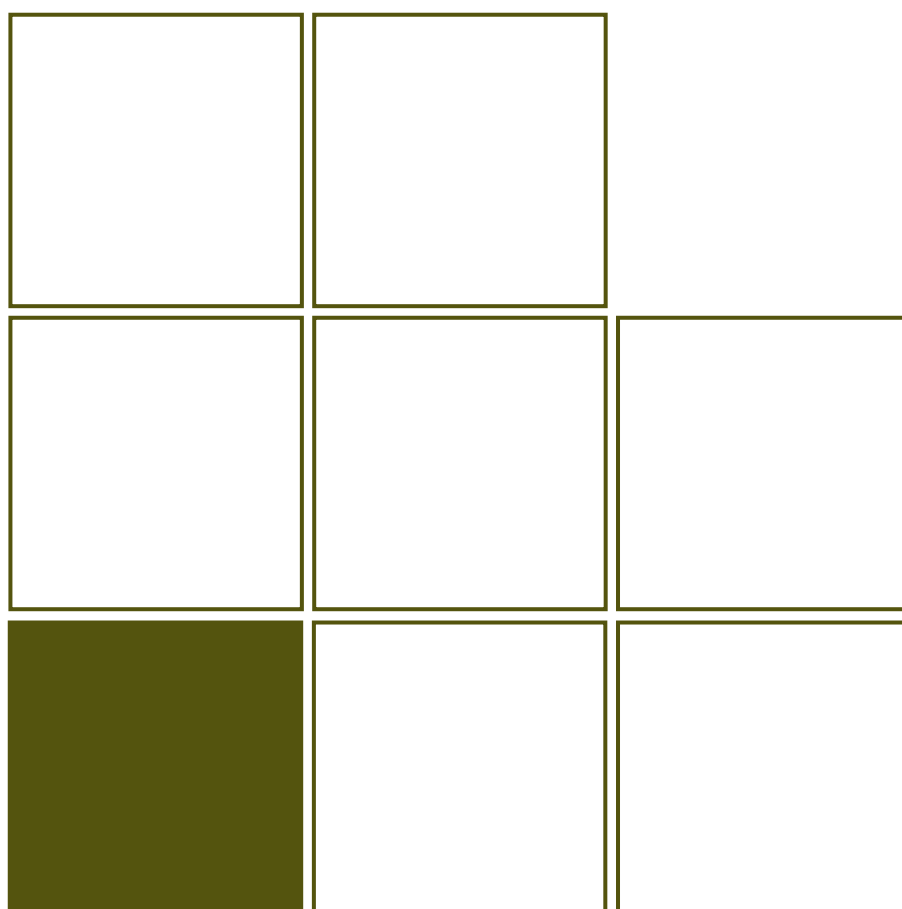


# PTB jahresbericht

Annual Report

2012

Physikalisch-Technische  
Bundesanstalt  
Jahresbericht 2012



# Vorwort

125 Jahre Physikalisch-Technische Reichs- und Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Dieses Jubiläum prägte als alles überragendes Ereignis das vergangene Jahr. 125 Jahre höchste Präzision, Fortschritt und Zuverlässigkeit in der Metrologie, der Wissenschaft vom Messen und dessen Anwendung, bedeuten eine höchst beeindruckende Erfolgsgeschichte, die wir im März in einer denkwürdigen Festveranstaltung mit mehr als 1000 Gästen, davon 240 aus dem Ausland, gebührend würdigten. Im Oktober konnten wir dann auch noch unser „Schmuckkästchen für die Physik“, das rechtzeitig restaurierte „Observatorium“, einweihen. Es war zur Zeit des Erstbezuges im Jahr 1891 das wohl weltweit fortschrittlichste physikalische Labor, ein Gebäude von bestechend ebenmäßiger Symmetrie und Eleganz bei gleichzeitig größtmöglicher Funktionalität, die Wirkungsstätte Hermann von Helmholtz', der zusammen mit Werner von Siemens die PTR gründete und dann ihr erster Präsident wurde.

Das „neue Observatorium“, ein hochmoderner Forschungsbau, und dessen Nutzung für die Entwicklung der Metrologie in der Medizin versinnbildlichen zusammen mit vielen weiteren bestens ausgestatteten Laboratorien der PTB und anderen neuen Tätigkeitsfeldern in den Bereichen Energie, Umwelt oder Nanotechnologie den Wandel in der Metrologie und ihre selbst nach 125 Jahren ungebrochene, ja sogar stetig zunehmende Bedeutung für die Wissenschaft, die Wirtschaft und die Gesellschaft.

Die PTB hat als eines der weltweit führenden nationalen Metrologieinstitute auch im vergangenen Jahr den Wandel nicht nur durch eine Vielzahl hervorragender wissenschaftlicher Ergebnisse geprägt und vorangetrieben, sondern ihn ganz wesentlich auch durch Kalibrierungen und Prüfungen auf höchstem Niveau für Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft sowie durch kompetente Mitarbeit in einer Vielzahl von Gremien, nicht zuletzt auch europaweit und international, gestaltet.

Atomuhrenvergleiche über fast 1000 km lange Datenautobahnen, eine Referenzwand für die mikro-

metergenaue Kalibrierung von dreidimensionalen Längenmesssystemen für die Großgeräteindustrie, innovative Zähler und Abrechnungsmethoden für Elektromobile, absolute Längenmessungen bei ultratiefen Temperaturen für Weltraumanwendungen, ein neues Primärnormal für die Konzentrationsbestimmung von roten Blutkörperchen, detaillierte Rechnungen zum Schutz des Auges vor ionisierender Strahlung, die hochgenaue Vermessung elektromagnetischer Felder von THz-Scannern an Flughäfen, von MRT-Systemen (Magnetic Resonance Tomography) in der klinischen Anwendung oder von Radar-Anlagen in der Luftfahrt sind nur einige wenige Beispiele für Fortschritte in der modernen metrologischen Forschung und Entwicklung, die deren enorme Bandbreite verdeutlichen.

Die Neudefinition der Basiseinheiten, die dann – um die visionären Worte von Max Planck aus dem Jahre 1900 zu zitieren – „für alle Zeiten und für alle, auch ausserirdische und aussermenschliche Culturen“ ihre Bedeutung behalten sollen, ist sicherlich im wahrsten Sinne des Wortes ein Jahrhundertprojekt der Metrologie, zu dem die PTB mit ihren Projekten „Avogadro“, „Boltzmann“, „Ampere und quantenmetrologisches Dreieck“ an vorderster Front beiträgt. Material für vier weitere Kugeln aus angereichertem Silizium, entscheidende Fortschritte bei der Präparation der Kugeln, bei der höchstgenauen Vermessung von Isotopenzusammensetzung, Volumen und Oberflächenbeschaffenheit sowie Anstrengungen, die Gitterkonstante neu zu bestimmen, markieren die Meilensteine zum Ausbau der Führungsrolle der PTB bei der Bestimmung der Planck- bzw. der Avogadro-Konstanten. Desweiteren haben bei der Basiseinheit Ampere neue Methoden zur effizienten Fehlererfassung beim Einzelelektronentransport sowie die erfolgreiche Schließung des sogenannten quantenmetrologischen Dreiecks die PTB ebenfalls in eine Spitzenposition gebracht.

Auch im gesetzlichen Messwesen deutet sich ein wichtiger Durchbruch an in Gestalt der nunmehr nach jahrelangen Bemühungen in Aussicht stehenden Verabschiedung des neuen Mess- und Eichgesetzes für die mehr als 108 Millionen eichpflich-

tigen Messgeräte in Deutschland, zu dem die PTB ganz wichtige Beiträge beigesteuert und mit dem federführenden Referat im Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) hervorragend zusammengearbeitet hat. Es ist vorgesehen, dass das Gesetz, das der PTB zusammen mit dem Einheiten- und Zeitgesetz auch weiterhin eine Schlüsselrolle im gesetzlichen Messwesen zuweist, Anfang des nächsten Jahres in Kraft treten wird. Im sogenannten Regelermittlungsausschuss werden unter dem Vorsitz der PTB die zuständigen Länderbehörden, Konformitätsbewertungsstellen, staatlich anerkannten Prüfstellen, Wirtschaftsverbände und Verbraucherverbände wichtige Entscheidungen für nicht europäisch geregelte Messgeräte treffen.

Drittmittel konnten in nochmals deutlich gesteigertem Umfang eingeworben werden und haben den Aktionsradius der PTB weiterhin wesentlich erweitert. Dies gilt insbesondere für das von der Europäischen Union geförderte Metrologie-Forschungsprogramm sowie im Bereich der Technischen Zusammenarbeit, beides von großer strategischer Tragweite bezüglich der europäischen bzw. internationalen Bedeutung der Metrologie und der PTB. Dies erstreckt sich aber auch auf zahlreiche Einzelvorhaben mit der Industrie, auf Projektförderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) sowie durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Unabdingbare Voraussetzung für den zukünftigen Erfolg der PTB ist zum einen eine ausreichende Zahl von Dauerstellen zur Erfüllung der gesetzlichen Aufgaben. Hier lässt sich immerhin ein Teilerfolg vermelden: 2013 wird der Abbau von Planstellen reduziert, was uns erstmals seit langer Zeit zumindest etwas Gestaltungsspielraum eröffnet. Zum anderen jedoch braucht die PTB adäquate Rahmenbedingungen. Hier markierten das „Wissenschaftsfreiheitsgesetz“, das zum 1.1.2013 in Kraft getreten ist, und der „Pakt für Forschung und Innovation“ (Geltungsdauer 2011 bis 2015) für die außeruniversitären Forschungseinrichtungen den Beginn einer neuen Ära hin zu mehr Autonomie,

Eigenverantwortung und Planungssicherheit. Trotz einvernehmlicher und starker Unterstützung durch alle großen Wissenschaftsorganisationen gelang es nicht, die PTB oder andere Forschungseinrichtungen des Bundes in den Geltungsbereich des Gesetzes einzubeziehen. Es sollen lediglich ähnliche bedarfsgerechte Maßnahmen zur Flexibilisierung gewährt werden, was bisher leider nur bedingt umgesetzt werden konnte. Falls dies auch weiterhin nicht gelingt, ist die Sorge berechtigt, ob sich die PTB auch in Zukunft in einem immer kompetitiver werdenden wissenschaftlichen Umfeld an vorderster Front metrologischer Dienstleistung und Forschung positionieren kann.

Ein spannendes, bewegtes, von erheblichen Fortschritten und beeindruckenden Rückblicken geprägtes Jahr 2012 liegt somit hinter uns. Für mich selbst war es mit einer Vielzahl neuer Eindrücke und persönlicher Kontakte verbunden, aber auch teilweise – wenn überhaupt Zeit zum Nachdenken blieb – mit ein wenig Wehmut, die der nahezu vollständige Abschied aus meiner „bisherigen Welt“ mit sich brachte. Die Faszination der für mich „neuen Welt der Metrologie“, die uneingeschränkt freundliche Aufnahme durch alle „PTBisten“, ihr Engagement, ihre Begeisterung und Hilfsbereitschaft, für die ich mich herzlich bedanke, sowie die hervorragende Arbeit von Ernst Otto Göbel, meinem Vorgänger im Amt, haben mir den Neubeginn jedoch leicht gemacht.



# Foreword

125 years of PTR and PTB: This was the paramount event of 2012 having a profound impact on the past year. 125 years of highest precision, progress and reliability in metrology, the science of measurement and its application represent a highly impressive success story, which we fittingly savoured in March in a commemorative event with more than 1000 guests, 240 of which came from foreign countries. Then in October, we were also able to dedicate our “physics jewel case”, the “Observatory”, which was restored in time. At the time of its first occupancy in 1891, it was the most progressive physics laboratory in the world, a building of impressively well-proportioned symmetry and elegance, while at the same time possessing the greatest possible functionality, the domain of Hermann von Helmholtz’ who, together with Werner von Siemens, founded the PTR and became its first president.

The “new Observatory”, a highly modern research building, and its use for the development of metrology in medicine, symbolizes, together with many additional, best-equipped PTB laboratories and other new fields of activity in the realms of energy, environment or nanotechnology, the change in metrology and its unbroken, yes, even continually increasing importance for science, the economy and society, even after 125 years.

PTB, as one of the worldwide leading national metrology institutes, impacted and promoted the change also in the past year not only through numerous outstanding scientific findings, but rather shaped it quite considerably through calibrations and testing at the highest level for society, the economy and science as well as through competent collaboration in numerous committees, not least, also Europe-wide and internationally.

Atomic clock comparisons over information super-highways almost 1000 km long, a reference wall for the micrometre-precise calibration of three-dimensional length measurement systems for the large-scale equipment industry, innovative counters and accounting methods for electromobility, absolute length measurements at ultra-low temperatures for

aerospace applications, a new primary standard to determine the concentration of red blood cells, detailed computations for protecting the eyes against ionizing radiation, the highly precise measurement of the electromagnetic fields of THz scanners at airports, of MRT systems (Magnetic Resonance Tomography) in clinical application, or of radar installations in aviation are only a few examples of progress in modern metrological research and development which illustrate their enormous spectrum.

The redefinition of the base units, which will then retain their validity – to quote the visionary words of Max Planck from the year 1900 – “for all time and for all, even extraterrestrial and “extra-human” cultures”, is certainly in the truest sense of the word a millennium project of metrology, in which PTB is participating with its projects “Avogadro”, “Boltzmann”, “Ampere and Quantum Metrology Triangle” in a cutting-edge manner. Material for four additional spheres made of isotope-enriched silicon, decisive progress in the preparation of the spheres, in the highly accurate measurement of the isotopic composition, volume and surface quality, as well as the efforts to redetermine the lattice constant mark the milestones for expanding the leading role of PTB in the determination of the Planck, i.e. the Avogadro constants. Moreover, with respect to the base unit ampere, new methods for efficient error detection in single-electron transport as well as the successful closure of the so-called quantum metrology triangle have set new standards in this field.

Also in legal metrology, an important breakthrough is indicated in the form of the now prospective passing – after efforts made over the course of years – of the new Weights and Measures Act for the more than 108 million measuring instruments subject to mandatory verification in Germany, to which PTB has made very important contributions and worked together outstandingly with the leading department in the Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW – Federal Ministry of Economics and Technology). It is intended that the Act which, together with the Units and Time Act, continues to

assign PTB a key role in legal metrology, will come into force at the beginning of next year. In the so-called “Regelermittlungsausschuss”, with PTB presiding, the responsible federal state authorities, conformity assessment bodies, state-approved test centres, trade and consumer associations will make important decisions regarding non-European-regulated measuring instruments.

It was again possible to significantly increase the fundraising of third-party funds and, therefore, PTB's area of operation continued to be considerably expanded. This applies particularly to the Metrology Research Programme funded by the European Union as well as to the field of Technical Cooperation, both of which are of great strategic importance in terms of the European and the international significance of metrology and of PTB. However, this is also extended to numerous individual projects with industry, to project funding by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG – German Research Foundation), the Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW – Federal Ministry of Economics and Technology) as well as by the Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF – Federal Ministry of Education and Research).

The indispensable precondition for the future success of PTB is, on the one hand, a sufficient number of permanent posts to fulfil its legal tasks. Here, at least partial success can be announced: in 2013, the cutback of established posts will be reduced which will, for the first time in a long time, open up to us at least some organizational leeway. On the other hand, however, PTB needs adequate framework conditions. Here the “Wissenschaftsfreiheitsgesetz” (Academic Freedom Act), which came into force on 1.1.2013, and the “Pakt für Forschung und Innovation” (Pact for Research and Innovation) (period of validity: 2011 to 2015) for non-university research institutions marked the beginning of a new era for more autonomy, direct responsibility and planning reliability. In spite of the mutual and strong support from all the large scientific organizations, it was not possible to include PTB or other federal research institutions in the scope of application of the law.

It is merely a case of granting similar needs-based measures for greater flexibility; previously this could unfortunately only be implemented to a limited extent. In case this continues to be unsuccessful, the concern is justified whether PTB will also in future be able to maintain its cutting-edge technological position in metrological service and research in an increasingly competitive scientific environment.

Thus, we have left behind us 2012, an exciting, eventful year characterized by considerable progress and impressive retrospective views. In my case, it was associated with numerous new impressions and personal contacts, but also partially – when any time remained at all for reflection – with a little nostalgia which the nearly complete taking leave of my “previous world” brought about. The fascination of the – for me – new “world of metrology”, the unreserved friendly reception from all “PTBists”, their dedication, their enthusiasm and helpfulness, for which I would like to extend my warmest thanks, as well as the outstanding work of Ernst Otto Göbel, my predecessor in office, have indeed made the new beginning easy for me.



Dieser gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2012. 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 bibliografische Angaben zu sämtlichen Veröffentlichungen und Vorträgen von PTB-Mitarbeitern gesammelt werden.

### **Jahresbericht im Internet**

- Vorwort
- Nachrichten des Jahres
- Aus den Abteilungen
  - Abteilungsleiterberichte
  - Nachrichten
  - Tätigkeitsbereiche
  - Forschungsvorhaben
  - Kooperationen
- Kuratorium
- Organigramm (Stand: Dezember 2012)
- 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	8 -
Fachabteilungen • Scientific Divisions	8 -
Kuratorium • Advisory Board	20 -
Präsidium • Presidential Board	22 -
Technologietransfer • Technology Transfer	25 -
Qualitätsmanagement • Quality Management	26 -
Gesetzliches Messwesen • Legal Metrology	28 -
Technische Zusammenarbeit • Technical Cooperation	30 -
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit • Press and Information Office	32 -
Promotionen • Doctorates	35 -
Zahlen und Fakten • Figures and facts	36 -
Berichte der Abteilungen -	
Mechanik und Akustik	45 -
Elektrizität	59 -
Chemische Physik und Explosionsschutz	71 -
Optik	81 -
Fertigungsmesstechnik	95 -
Ionisierende Strahlung	107 -
Temperatur und Synchrotronstrahlung	119 -
Medizinphysik und metrologische Informationstechnik	135 -
Anhang -	
Kuratorium	153 -
Organigramm	154 -
Arbeitsgebiete	156 -
Geländepläne	160 -



# Nachrichten des Jahres • News of the Year

## Einzelelektronenströme nachgezählt

Einzelelektronenpumpen ermöglichen die Erzeugung eines Stromes durch kontrollierten Einfang und Transport einzelner Elektronen. Der PTB gelang es nun erstmals, die Einfangstatistik einer Halbleiter-Einzelelektronenpumpe durch Nachweis einzelner Elektronen mit einer speziellen Detektorschaltung zu überprüfen.

Im zukünftigen SI-System sollen die physikalischen Einheiten mit Hilfe elementarer Naturkonstanten wie der Planck-Konstante  $h$  oder der Elektronenladung  $e$  festgelegt werden. Die Basiseinheit der elektrischen Stromstärke, das Ampere, kann dann über eine sogenannte Einzelelektronenpumpe realisiert werden. Die Einzelelektronenpumpe besteht aus einer winzigen halbleitenden Insel mit zwei Zuleitungen. Im Pumpbetrieb wird zunächst ein Elektron von links von der einen Zuleitung auf die Insel geladen und anschließend nach rechts in die andere Zuleitung ausgeworfen. Wird dieser Vorgang periodisch mit der Taktfrequenz  $f$  wiederholt, so entsteht ein Strom  $I = ef$ . Der Strom ist somit nur noch durch die Naturkonstante der Elektronenladung  $e$  und die Taktfrequenz  $f$  bestimmt. Halbleiterbasierte Einzelelektronenpumpen gelten aktuell als die vielversprechendsten Kandidaten für die zukünftige Realisierung des Ampere.

Bisher wurde zur Charakterisierung einer solchen Einzelelektronenpumpe die Pumpe mit einer gegebenen Frequenz  $f$  kontinuierlich betrieben und der erzeugte Strom möglichst genau gemessen. Bei dieser Art der Messung wird aber stets über sehr viele Taktzyklen gemittelt, und die Informationen zu einzelnen, selten auftretenden Pumpfehlern gehen verloren. Die tatsächliche Anzahl dieser Pumpfehler ist für metrologische Anwendungen allerdings von entscheidender Bedeutung. Im Berichtsjahr konnte von der PTB erstmals eine Detektorschaltung zusammen mit Einzelelektronenpumpen auf einem Chip integriert und getestet werden (Bild). Mit der Detektorschaltung war es möglich, einzelne Fehler solcher Pumpen nachzuweisen und zu analysieren.

Die Detektorschaltung basiert auf sogenannten Einzelelektronendetektoren. Diese Detektoren reagieren so empfindlich auf elektrische Ladungen, dass sie sogar das einzelne, pro Taktzyklus von der Pumpe eingefangene und transportierte Elektron eindeutig nachweisen können. Mithilfe die-

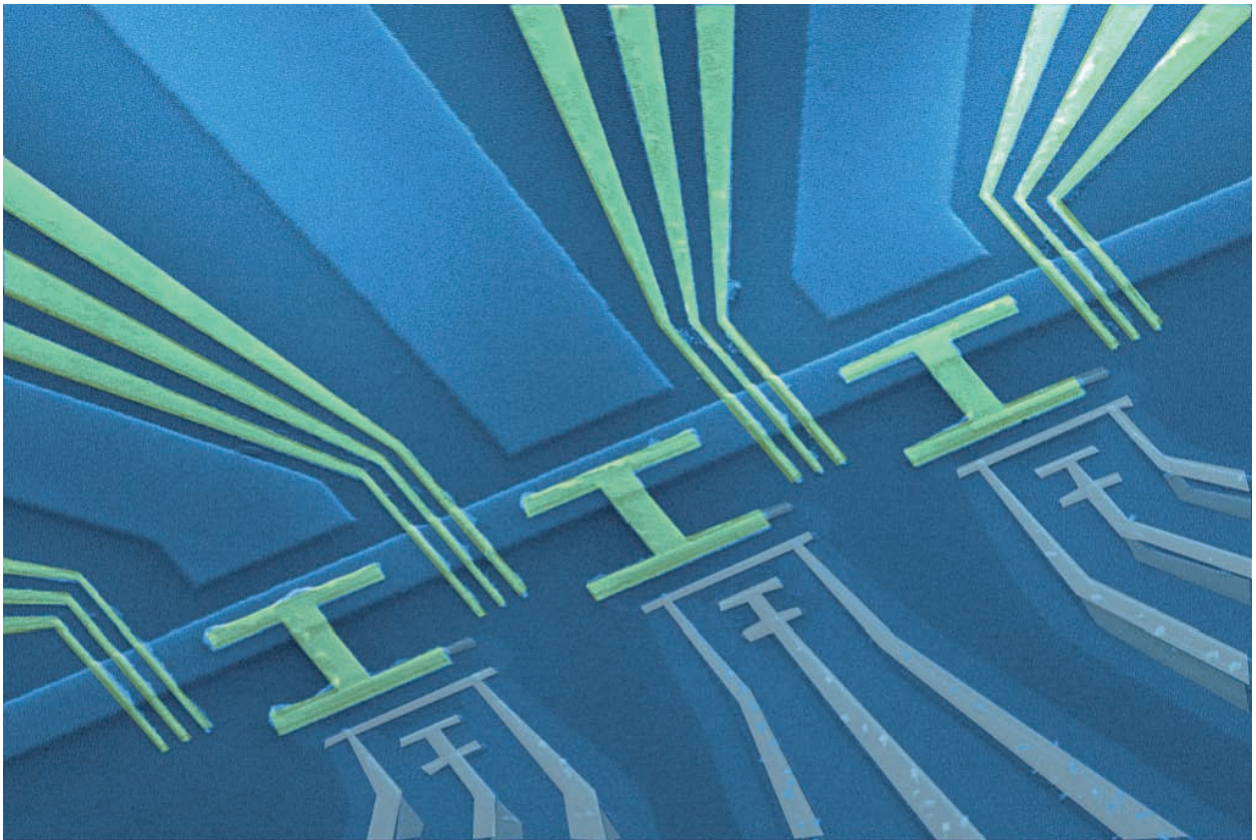
## Single-electron current count checked

Single-electron pumps allow a current to be generated by trapping and transporting single electrons in a controlled manner. PTB has now succeeded in verifying the trapping statistics of a semiconductor single-electron pump for the first time by detecting single electrons with the aid of a special detector circuit.

In the future SI system, the physical units are to be defined by means of elementary fundamental constants such as Planck's constant  $h$  or the charge of an electron  $e$ . The base unit of electric current, the ampere, can then be realized via a so-called "single-electron pump". The single-electron pump consists of a microscopic semiconducting island with two current leads. In pumping operation, first an electron coming from the current lead on the left is loaded onto the island and then released into the other current lead. If this procedure is repeated periodically at a clock frequency  $f$ , a current  $I = ef$  is generated. The current is then only determined by the fundamental constant of the charge of an electron  $e$ , and the clock frequency  $f$ . At present, semiconductor-based single-electron pumps are considered the most promising candidates for the future realization of the ampere.

In the past, to characterize such a single-electron pump, the pump had to be operated continuously with a given frequency  $f$ , and the current generated thereby had to be measured as precisely as possible. Such a measurement, however, always implies an averaging over numerous clock cycles, so that the data concerning single, rarely occurring pump errors are eventually lost. The actual number of these pump errors is, however, of vital importance for metrological applications. In the year under report, PTB was able, for the first time, to integrate and test a detector circuit together with a single-electron pump on one chip (see figure). The detector circuit allowed single errors of such pumps to be detected and analyzed.

The detector circuit is based on so-called "single-electron detectors". These detectors react so sensitively to electric charges that they can even definitely detect the only electron that is trapped and transported by the pump per clock cycle. With the aid of this detection method, the error rate of the pump has now been measured precisely as a function of various external parameters. Excellent agreement



Schaltung zur Detektion einzelner Elektronen einer halbleitenden Einzelelektronenpumpe. Auf dem Chip sind vier Pumpen mit je drei Steuerelektroden (gelb), die einen Halbleiterdraht (blau) kreuzen, angeordnet. Die Detektion der gepumpten Elektronen erfolgt mit drei Einzelelektronendetektoren (grau).

ser Detektionsmethode wurde nun die Fehlerrate der Pumpe in Abhängigkeit verschiedener äußerer Parameter exakt vermessen. Der Vergleich der gemessenen Fehlerrate mit theoretischen Vorhersagen ergab eine hervorragende Übereinstimmung und belegte damit die Gültigkeit des verwendeten Modells. Zudem zeigte sich, dass unter den gegebenen Messbedingungen die thermische Verteilung der Elektronen auf der Insel keinen signifikanten Einfluss auf die Fehlerrate hat. Diese Ergebnisse sind ein wichtiger Schritt für die zukünftige Entwicklung eines halbleiterbasierten Einzelelektronen-Stromstandards.

Circuit for the detection of single electrons of a semiconducting single-electron pump. Four pumps are integrated onto the chip; each of them has three gate electrodes (yellow) crossing a semiconductor wire (blue). The pumped electrons are detected with the aid of three single-electron detectors (grey).

was yielded when comparing the measured error rate with theoretical predictions; this confirmed the validity of the model used. In addition, it turned out that under the given conditions of measurement, the thermal distribution of the electrons on the island did not have a significant influence on the error rate. These results are a decisive step towards the future development of a semiconductor-based single-electron current standard.

## Laser-Hygrometer der PTB im Stratosphärenreinsatz

Die Messtechnik der PTB reicht bis in die Stratosphäre. Gemeinsam mit dem Forschungszentrum Jülich (FZJ) wurde ein hochpräzises und vor allem kalibrationsfreies Laser-Hygrometer entwickelt, das durch seine genauen und schnellen Wassermessungen in der Atmosphäre beispielsweise neuartige Untersuchungen zur Erfassung und zum besseren Verständnis der Wolken und der Wolkenbildungsdynamik ermöglicht. Das Hygrometer kommt in dem neuen Forschungsflugzeug „HALO“ (High Altitude and Long Range Research Aircraft) zum Einsatz und wurde bei einer ersten Messkampagne über eine Flugstrecke von 100 000 km bereits erfolgreich erprobt.

Bei fast allen atmosphärischen Messkampagnen gilt der Wasserdampfgehalt als besonders wichtige Messgröße. Zum einen ist Wasserdampf selbst das wichtigste Treibhausgas und ebenfalls klimawirksam in der kondensierten Form als Wolke, zum anderen müssen viele Gasanalyse-Verfahren auf den Wasserdampfgehalt korrigiert werden. Das von PTB und FZJ entwickelte Mehrkanal-Hygrometer „HAI“ ermöglicht erstmals die simultane Mehrphasen-H<sub>2</sub>O-Messung mit nur einem Messprinzip, d. h. einer extraktiven Bestimmung des Gesamtwassergehalts, bei der alle Wassermoleküle in Form von Eis, Wassertröpfchen und Wasserdampf über einen Lufteinlass in eine geschlossene Messzelle geführt werden, sowie gleichzeitig eine probennahmefreie In-situ-Bestimmung nur des Wasserdampfs mittels einer offenen Multireflex-Zelle auf der Außenhaut des Flugzeuges. Um den gesamten großen Wasserdampfbereich zwischen Troposphäre (ca. 20 000 ppmv) und Stratosphäre (4 ppmv) abzudecken, wurde erstmals ein Zwei-Wellenlängen-Hygrometer entwickelt, das parallel mit zwei Lasern bei 1,4 µm bzw. 2,6 µm arbeitet. Außerdem ist HAI außerordentlich schnell und kann mit einer Messfrequenz von über 100 Hz Daten erfassen.

Blick in die HALO-Kabine während einer Messkampagne; der Pfeil zeigt auf das eingebaute HAI-Instrument.



## PTB's new laser hygrometer in operation in the stratosphere

PTB's metrologic capabilities reach up to the stratosphere! Within the scope of a cooperation with Forschungszentrum Jülich, a high-precision – and, above all, calibration-free – laser hygrometer was developed; due to its precise and fast water measurements in the atmosphere it allows, for example, novel investigations to detect clouds and to improve the understanding of clouds and their evolution dynamics. The hygrometer is used on board the new research aircraft “HALO” (High-Altitude and Long-Range Research Aircraft) and was successfully tested on the occasion of a first measurement campaign over a distance of 100,000 km.

For nearly all atmospheric measurement campaigns, the water vapour content is considered a particularly important measurement quantity. On the one hand, water vapour itself is the most important greenhouse gas and also has an impact on the climate in its condensed form, namely via clouds; on the other hand, numerous gas-analytical procedures have to be corrected for the water vapour content. The multi-channel hygrometer “HAI” developed by PTB and Forschungszentrum Jülich (FZJ) allows for the first time the simultaneous multi-phase H<sub>2</sub>O measurement with one single measurement principle, i.e. an extractive determination of the total water content where all water molecules in the form of ice, water droplets and water vapour are led into a closed measuring cell via an air inlet vent at the same time as a sample-free, in-situ determination of the sole water vapour by means of an open multi-

reflex cell located on the outer shell of the aircraft. In order to cover the large water vapour range between the troposphere (approx. 20,000 ppmv) and the stratosphere (4 ppmv), a double-wavelength hygrometer was developed for the first time; it works simultaneously with two lasers at 1.4 µm or 2.6 µm, respectively. In addition, HAI is also exceptionally fast and can acquire data with a measuring frequency of more than 100 Hz.

View of the HALO cabin during a measurement campaign. The arrow points at the integrated HAI instrument.

## Forschungsvorhaben zur Messkapselproblematik von Wasser- und Wärmezählern erfolgreich abgeschlossen

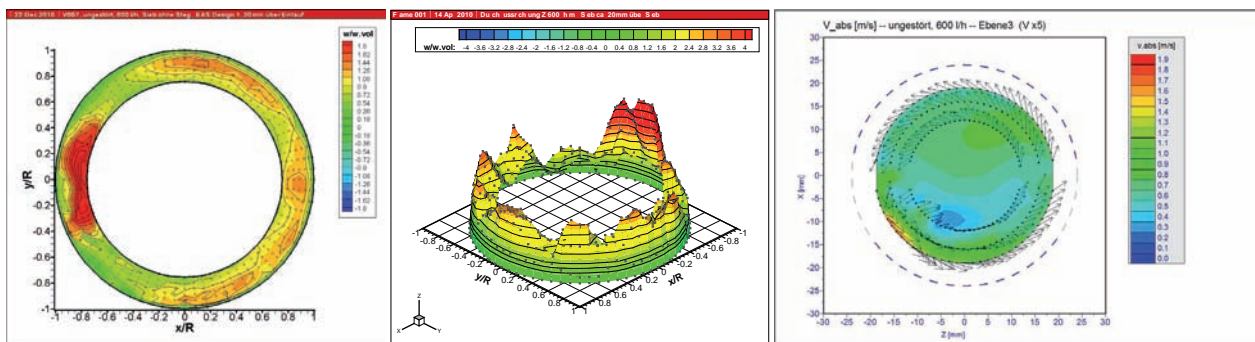
Wasser- und Wärmezähler unterliegen als eichpflichtige Messgeräte den messtechnischen Anforderungen der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID). Ob diese Geräte auch in Messkapselausführung diesen Anforderungen genügen, wurde nun in einem umfangreichen Forschungsvorhaben überprüft. Im Ergebnis konnte mit umfangreichen Untersuchungen an vielen verschiedenen Konfigurationen eindeutig gezeigt werden, dass auch Ein- und Mehrstrahl-Messkapselzähler den messtechnischen Anforderungen der MID entsprechen und ohne Bedenken im eichpflichtigen Verkehr eingesetzt werden können. Das Forschungsvorhaben wurde von der PTB gemeinsam mit dem Verband der deutschen Wasser- und Wärmezählerindustrie (VDDW) sowie der Arbeitsgemeinschaft Heiz- und Wasserkostenverteilung (ARGE HKV) durchgeführt.

Untersucht wurden Messkapselzähler verschiedener Ausführungen und Größen bezüglich ihres Verhaltens gegenüber Strömungsstörungen, wobei neben den in den internationalen Vorschriften standardisierten Störkörpern (Drallerzeugern und Blenden) auch extreme Einschnürungen und Abdeckungen der ankommenden Strömung in die Untersuchungen einbezogen wurden, wie sie z. B. durch Verschmutzungen oder nicht vollständig geöffnete Ventile und Klappen in der Praxis auftreten können. Erstmals wurde zusätzlich die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) als berührungslose Methode zur Messung und Darstellung von Geschwindigkeitsverteilungen im Inneren der wasserdurchströmten Zähler eingesetzt.

## Research project on the measuring cartridge issue of water and heat meters successfully completed

Water and heat meters are subject to legal verification and therefore have to meet the requirements of the European Measuring Instruments Directive (MID). Whether also the measuring cartridge version of these instruments complies with these requirements has now been checked within the scope of an extensive research project. Extensive investigations were carried out on various configurations. The results clearly showed that also single- and multi-jet cartridge meters comply with the requirements of the MID and can, thus, be used in applications subject to legal control without concern. The research project was carried out jointly by PTB and the Verband der Deutschen Wasser- und Wärmezählerindustrie (VDDW) as well as the Arbeitsgemeinschaft Heiz- und Wasserkostenverteilung (ARGE HKV).

Measuring cartridge meters of various designs and sizes were investigated as to their behaviour in the event of flow disturbances; for this purpose, not only the bluff bodies (swirl generators and diaphragms) standardized in international norms were used for the investigations, but also powerful means of flow constriction and covering of the incoming flow, which may occur in practice due to impurities or valves that are not fully open. For the first time, laser Doppler anemometry (LDA) was used inside the water meter in operation (with water flowing through it), as a non-contact method for the measurement and realization of velocity profiles.



Beispiele für im Inneren von Messkapselzählern laseroptisch bestimmte Geschwindigkeitsverteilungen bei einem Durchfluss von jeweils 600 l/h im Ringspalt zwischen Gehäuse und Messkapsel eines Mehrstrahl-Flügelradzählers (links und Mitte) sowie im Flügelradbecher eines Einstrahl-Flügelradzählers (rechts)

Examples of velocity profiles measured inside measuring cartridge water meters by means of laser-optical methods at a flowrate of 600 l/h each time in the circular gap between the housing and the measuring cartridge of a multiple-jet impeller meter (left and centre), as well as in the impeller cavity of a single-jet impeller meter (right)

## Lichtverschiebungsfreie Anregung des Oktupolübergangs in $^{171}\text{Yb}^+$

Optische Frequenznormale nutzen gespeicherte Atome oder Ionen mit Referenzübergängen im optischen Spektralbereich, deren natürliche Linienbreite sehr klein und deren Frequenz möglichst unabhängig von den auf die Atome einwirkenden externen Feldern ist. In der PTB wurde ein optisches Frequenznormal entwickelt, das den Oktupolübergang in einem einzelnen Ytterbium-Ion nutzt. Die Frequenz dieses Übergangs wurde absolut mit einer durch die Cäsiumfontänen-Referenz begrenzten relativen Unsicherheit von  $8 \cdot 10^{-16}$  gemessen. Das Ergebnis stimmt mit einer fast zeitgleich am National Physical Laboratory (Teddington, UK) durchgeführten Messung sehr gut überein.

Nach den Regeln der Quantenmechanik ist die Anregung eines Oktupolübergangs hochgradig verboten und gelingt nur mit einer entsprechend hohen spektralen Anregungsleistung. Das hat dann eine Verschiebung der beobachteten Resonanzfrequenz vom ungestörten Wert zur Folge. Bisher mussten Absolutfrequenzmessungen deshalb als Extrapolation mit unterschiedlichen Anregungsintensitäten und unabhängiger präziser Messung der relativen Intensität durchgeführt werden. Abhilfe bietet die Anregung nach dem sogenannten „Hyper“-Ramsey-Verfahren: Kürzlich war in einer Zusammenarbeit von russischen, amerikanischen und PTB-Wissenschaftlern theoretisch gezeigt worden, dass eine Abfrage des Uhrenübergangs mit einem speziellen Muster von Frequenz- und Phasensprüngen die ungestörte atomare Übergangsfrequenz direkt wiedergeben kann. Dieses Verfahren wurde jetzt in der PTB erstmalig zur Anregung des  $\text{Yb}^+$ -Oktupolübergangs eingesetzt, und die vorhergesagte Unterdrückung der Lichtverschiebung konnte dabei experimentell nachgewiesen werden. Kombiniert man die gegenwärtig maximal erreichbare spektrale Auflösung mit einer optimierten Experimentsteuerung, lässt sich der Beitrag der Lichtverschiebung zur systematischen Unsicherheit des  $\text{Yb}^+$ -Oktupol-Frequenznormals auf unter  $10^{-17}$  reduzieren.

Ein spezielles Muster der Frequenz des Anregungslichtes mit definierten Phasensprüngen erlaubt in der  $\text{Yb}^+$ -Einzelionen-uhre die Unterdrückung der Lichtverschiebung und damit eine höhere Genauigkeit.

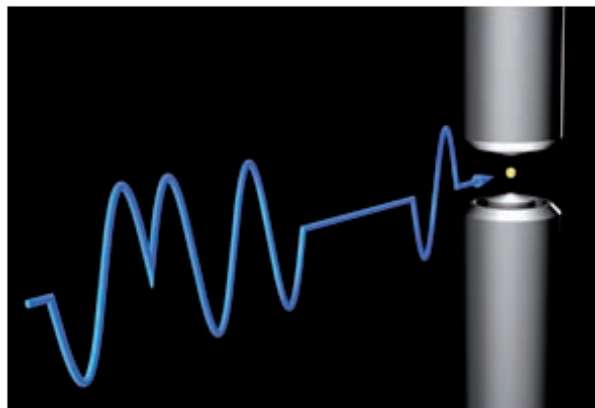
## Light-shift-free excitation of the octupole transition in $^{171}\text{Yb}^+$

Optical frequency standards are based on trapped atoms or ions with reference transitions in the optical spectral range whose natural linewidth is very small and whose frequency is, as far as possible, independent of the external fields acting on the atoms. At PTB, an optical frequency standard has been developed which exploits the “octupole transition” in a single ytterbium ion. The frequency shifts of this transition has been determined, and its frequency has been measured absolutely with a relative uncertainty of  $8 \cdot 10^{-16}$  which is limited by the caesium fountain reference. The result is in very good agreement with a measurement which was performed at the National Physical Laboratory (Teddington, UK) at virtually the same time.

According to quantum mechanics, the excitation of an octupole transition is highly forbidden and can only be achieved with a correspondingly high spectral excitation intensity. This causes the observed resonance frequency to shift from the unperturbed value. To date, absolute frequency measurements therefore had to be performed as extrapolation with different excitation intensities and independent, precise measurement of the relative intensity. Excitation according to the so-called “hyper”-Ramsey procedure provides a solution to this problem; within the scope of a cooperation between Russian, American and PTB scientists, it has recently been demonstrated that the interrogation of the clock transition with a special sequence of frequency- and phase jumps can render the undisturbed atomic transition frequency directly. This procedure has now been used for the first time at PTB to excite the  $\text{Yb}^+$  octupole transition; it allowed the suppression of the light shift to be demonstrated experimentally. By combining the maximum spectral resolution currently achievable with an optimized control of the experiment, it is possible to reduce the contribution of the light shift

to the systematic uncertainty of the  $\text{Yb}^+$  octupole frequency standard to less than  $10^{-17}$ .

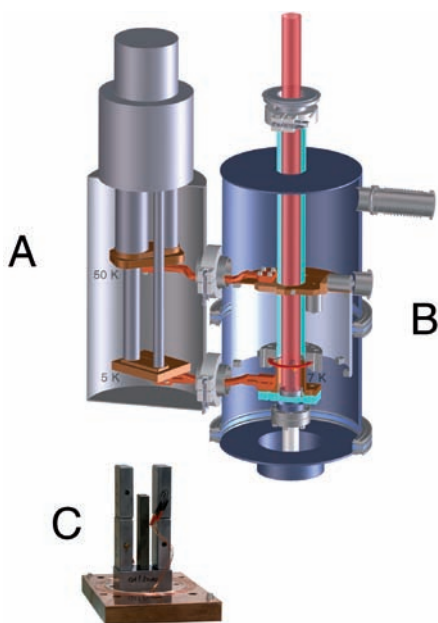
A special sequence of the frequency of the excitation light with defined phase jumps allows the suppression of the light shift inside the  $\text{Yb}^+$  single-ion clock and, thus, leads to greater accuracy.



## Absolute Längenmessungen bei Temperaturen bis hinunter zu 7 K

Die immer genauere Kenntnis der thermischen Ausdehnung von Materialien wird für die Optimierung der Funktion von High-Tech-Geräten in verschiedenen Bereichen benötigt. Für die Europäische Raumfahrtbehörde (ESA) ist das Materialverhalten im Bereich kryogener Temperaturen für die Leistungsfähigkeit von Weltraumteleskopen wichtig. Der große Durchmesser der Primärspiegel der Teleskope und deren Funktionsfähigkeit unter kryogenen Bedingungen erfordert ultra-stabile Komponenten, deren Materialien hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit ihrer Abmessungen sehr genau charakterisiert sein müssen. Die extremen Anforderungen an die Genauigkeit bei der Charakterisierung der thermischen Ausdehnung (Messunsicherheit  $3 \cdot 10^{-9} \text{ K}^{-1}$ ) können nur durch absolute Längenmessungen mittels Interferometrie erfüllt werden. Dieses Messverfahren ist zwar in der PTB für verschiedene Messanwendungen etabliert, war allerdings bislang auf einen Temperaturbereich um  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  begrenzt.

Der PTB gelang es in Zusammenarbeit mit dem TransMIT-Zentrum für Adaptive Kryotechnik und Sensorik im Rahmen eines von der ESA geförderten Projektes, ihr neu aufgebautes Ultrapräzisionsinterferometer so weiterzuentwickeln, dass es auch bei kryogenen Temperaturen bis hinunter zu 7 K eingesetzt werden kann. Eine der größten Herausforderungen in diesem Projekt bestand in der Etablierung von Methoden zur Auswertung nichtstationärer Interferogramme, aus denen sich die absolute Länge von Probekörpern bis 50 mm im gesamten Temperaturbereich von 300 K bis 7 K auf ca. 1,5 nm genau bestimmen lässt. Die ersten Messungen wurden an Proben aus zwei verschiedenen Materialien durchgeführt, die als Substrate in Weltraumteleskopen in Frage kommen.



## Absolute length measurements at temperatures down to 7 K

In order to optimize the functioning of high-tech devices in various fields, increasingly precise knowledge of the thermal expansion of materials is required. For the European Space Agency (ESA), the behaviour of materials in the range of cryogenic temperatures is important for the performance of space telescopes. The large diameter of the primary mirrors of the telescopes and their operativeness at cryogenic conditions require ultra-stable components made of materials that must have been characterized very precisely with regard to the temperature dependence of their dimensions. The extreme requirements placed on the accuracy for the characterization of the thermal expansion (measurement uncertainty  $3 \cdot 10^{-9} \text{ K}^{-1}$ ) can only be met by absolute length measurements by means of interferometry. This measurement procedure has been established at PTB for various measurement applications. It was, however, limited to a temperature range around  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Within the scope of a project funded by ESA, PTB has, in cooperation with the TransMIT-Center of Adaptive Cryotechnology and Sensors, succeeded in clearly enlarging the temperature range of its newly set up ultra-precise interferometer also at cryogenic temperatures of down to 7 K. One of the greatest challenges within the scope of this project consisted in establishing methods to evaluate non-stationary interferograms from which the absolute length of test pieces of up to 50 mm can be determined over the whole temperature range from 300 K to 7 K with 1.5 nm accuracy. The first measurements have been performed with samples made of two different materials which come into question as substrates in space telescopes. In a subsequent step, the newly attained possibilities with the ultraprecision interferometer will be exploited to define extremely accurate standards to be used as a reference for indirect measurement procedures.

Der erweiterte Messpfad des Ultrapräzisionsinterferometers. A: zweistufiger Pulsrohrkühler, speziell gebaut und angepasst von TransMIT. B: erweiterter Messpfad zum Anschluss an das Ultrapräzisionsinterferometer. C: zu vermessende Maßverkörperungen (Probe in der Mitte) und Proben zur Aufnahme der Temperatursensoren (links und rechts)

Extended measurement path of the UPI. A: two-stage pulse-tube cooler, custom-built and adapted by TransMIT. B: extended measurement path for connection to the UPI. C: material measures (sample in the centre) to be measured and samples for accommodating the temperature sensors (left and right)

## Neubestimmung der Avogadro-Konstanten auf Basis einer dekontaminierten $^{28}\text{Si}$ -Kugel

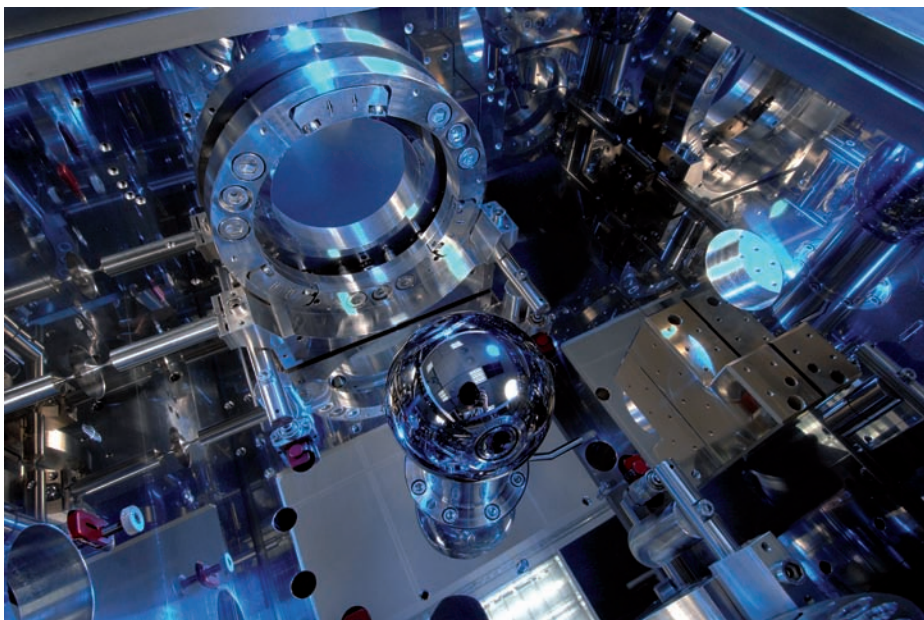
Im Rahmen der vorgeschlagenen Neudefinition des SI-Einheitensystems ist beabsichtigt, auch die SI-Einheit der Masse, das Kilogramm, künftig auf Basis einer Naturkonstanten zu definieren. Hierzu wird die Planck-Konstante  $h$  in Betracht gezogen, deren Wert derzeit im Wesentlichen durch die experimentelle Bestimmung der Avogadro-Konstanten  $N_A$  vorgegeben wird. Die PTB hat dazu im Rahmen des internationalen Avogadro-Projektes mit wesentlichen Messgrößen zu einer Reduzierung der relativen Messunsicherheit von  $N_A$  auf  $3 \cdot 10^{-8}$  beigetragen (metrologia 2011). Ein substantieller Fortschritt konnte hierbei für die Messung der Kristalleigenschaften erreicht werden. Leider waren die Messungen an den zwei im Australian Centre for Precision Optics (ACPO) polierten Si-Kugeln AVO28-S5 und AVO28-S8 durch eine herstellungsbedingte geringe Kontamination der Oberflächen mit Kupfer und Nickel beeinflusst. Diese Metalle in Form von Silizidverbindungen wirken sich dabei in erster Linie auf die Massebestimmung aus, aber auch an den Ergebnissen der interferometrischen Messungen für die Volumenbestimmung mussten Korrekturen vorgenommen werden.

Durch mehrstufige Versuche konnte die unerwünschte Kontamination der beiden  $^{28}\text{Si}$ -Kugeln durch Metallsilizide um wenigstens zwei Größenordnungen reduziert werden. Dabei wurde eine mögliche Beeinträchtigung der Rundheit der  $^{28}\text{Si}$ -Kugeln in Kauf genommen. Anschließend im Kugelinterferometer der PTB durchgeführte Messungen zeigten, dass die Rundheitsabweichungen bei einer der Kugeln (AVO28-S8) geeignet sein würden, eine

## Redefinition of the Avogadro constant based on a decontaminated $^{28}\text{Si}$ sphere

Within the scope of the suggested redefinition of the SI system of units, it is envisaged to base also the future definition of the SI unit of mass, the kilogram, on a fundamental constant. To this end, Planck's constant,  $h$ , is considered; currently, its value is mainly defined by the experimental determination of the Avogadro constant,  $N_A$ . In this context, PTB has, within the scope of the international Avogadro Project, contributed with essential measurands to reducing the relative measurement uncertainty of  $N_A$  to  $3 \cdot 10^{-8}$  (metrologia 2011). Considerable progress has been achieved for the measurement of the crystal properties like lattice constant and molar mass. Unfortunately, the measurements carried out on the two Si spheres AVO28-S5 and AVO28-S8 polished by the Australian Centre for Precision Optics (ACPO) were influenced by a production-related slight contamination of the sphere surfaces with copper and nickel. These metals, in the form of silicide compounds, mainly affect mass determination, but also corrections on the results of the interferometric measurements for volume determination were necessary.

By means of multi-stage tests, it was possible to reduce the undesired contamination of the two  $^{28}\text{Si}$  spheres by metal silicides by at least two orders or magnitude. Hereby, a potential impairment of the roundness of the  $^{28}\text{Si}$  spheres was accepted. Subsequent measurements carried out in PTB's sphere interferometer showed that, after decontamination, the roundness errors of one of the spheres (AVO28-S8) would still be suitable for a completely new measurement of the Avogadro constant. After



Si-Kugel im Kugelinterferometer der PTB

Si-sphere in PTB's sphere interferometer

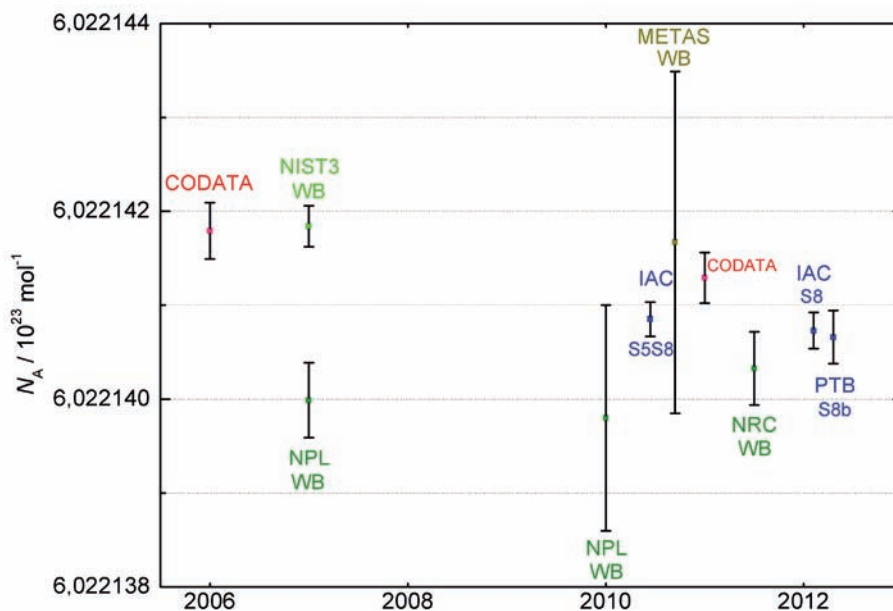
vollständige Neumessung der Avogadro-Konstanten nach Dekontamination zu erlauben. Nach Durchführung der Masse-, Oberflächen- und Volumenbestimmungen wurde mit den neu bestimmten Messwerten auch ein neuer Avogadro-Wert berechnet. Während die Masseabnahme (von 8,7 mg) und die Durchmesserreduktion (von 273 nm) für sich allein nur annähernd konsistente Werte liefern, ermöglicht erst die genaue Bestimmung der Oberflächenschichten die für die jeweilige Messgröße (Masse, Durchmesser) spezifische Korrektur.

Im Ergebnis zeigte sich, dass durch die Dekontamination die Unsicherheit für die Massebestimmung erfolgreich reduziert werden konnte; allerdings führte der notwendige Ätzprozess zu einer Zunahme lokaler Störungen in der Durchmesser- und Volumenmessung der Kugel. In der Folge vergrößerte sich die Gesamtmessunsicherheit für die Volumenmessung. Der Zahlenwert der aus der (jetzt mit AVO28-S8b bezeichneten) dekontaminierten Kugel berechneten Avogadro-Konstanten  $N_A = 6,022\,140\,66(28) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  liegt allerdings in sehr guter Übereinstimmung mit dem in metrologia publizierten Wert für die AVO28-S8 Kugel ( $N_A = 6,022\,140\,76(19) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ).

Dies bestätigt zum einen die Größe der angebrachten Korrekturen für die kontaminierte Kugel, zum anderen ist aber auch begründbar, dass mit einer weiteren Verbesserung der Kugeltopografie eine deutliche Reduzierung der Gesamtmessunsicherheit für die interferometrische Volumenmessung zu erwarten ist. Mit den zu erwartenden Verbesserungen bei der künftig in der PTB durchgeführten Kugelpolitur rückt damit eine relative Gesamtmessunsicherheit für das Avogadroprojekt von  $< 2 \cdot 10^{-8}$  in greifbare Nähe.

Verschiedene Messergebnisse für die Avogadrokonstante durch Wattwaagen-Experimente (WB) und das internationale Avogadro-Projekt (IAC)

Different measurement results for the Avogadro constant by means of experiments with watt balances (WB) and the international Avogadro Project (IAC)



determining the mass, the surface and the volume of the sphere, also a new Avogadro value was determined with the newly determined values. Whereas the mass reduction (amounting to 8.7 mg) and the diameter reduction (amounting to 273 nm) taken separately provided approximately consistent values, only the precise determination of the surface layers allows the correction specific to each of the measurands (mass, diameter).

The result showed that the decontamination allowed the uncertainty of the mass determination to be successfully reduced, but the etching process led to an increase in local disturbances of the diameter topography of the sphere. Due to this, the total uncertainty of the volume measurement increased. The numerical value of the Avogadro constant calculated on the basis of the decontaminated sphere (now designated as AVO28-S8b)  $N_A = 6.022\,140\,66(28) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  is, however, in excellent agreement with the value published in metrologia for the AVO28-S8 sphere ( $N_A = 6.022\,140\,76(19) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ).

This, on the one hand, confirms the order of the corrections applied in the case of the contaminated sphere; on the other hand, it is also justifiable that a further improvement of the sphere's topography can be expected to bring about a clear reduction of the total measurement uncertainty for the interferometric volume measurement. Taking the expected improvements into account for the future polishing of the sphere, which will take place at PTB, a relative total uncertainty for the Avogadro Project of  $< 2 \cdot 10^{-8}$  is close at hand.



### Untertagelaboratorium UDO an einem neuen Standort

Die PTB konnte im September 2012 ihr neues Untertagelaboratorium auf der 430-m-Sohle im Salzbergwerk Braunschweig-Lüneburg der european salt company (esco) in Grasleben bei Helmstedt einweihen. Erste Messungen des Strahlungspegels im UDO II genannten Laboratorium ergaben weniger als 2 nSv/h und eine geringe Radon-Aktivitätskonzentration der Luft. Es sind damit ähnlich gute Bedingungen wie im UDO in der Asse gegeben.

Über einen Zeitraum von fast 20 Jahren, von 1991 bis 2011, hatte die PTB das Untertagelaboratorium für Dosimetrie und Spektrometrie (UDO) im Salzstock der Asse betrieben – zunächst auf der 925-m-Sohle und später auf der 490-m-Sohle. Das Labor zeichnete sich an beiden Standorten durch einen der niedrigsten Strahlungspegel weltweit aus, der mit 1 nSv/h nur etwa 1 % der Ortsdosisleistung über Tage ausmachte. Dafür war neben der Abschirmung der Höhenstrahlung durch das Deckgestein vor allem das extrem aktivitätsarme Steinsalz verantwortlich, von dem das Labor umgeben war.

Mit der Einstufung der Schachanlage Asse II als kerntechnische Anlage im Sinne des Atomgesetzes und dem damit einhergehenden Betreiberwechsel im Januar 2009 war die Nutzung des UDO-Labors in der Asse nur noch eingeschränkt möglich. Im Frühjahr 2011 musste UDO ganz aufgegeben werden.

Die Aufgaben, welche die PTB im UDO wahrgenommen hatte, sind jedoch von bleibender gesellschaftlicher Bedeutung für die korrekte Kalibrierung von Dosimetriesystemen, die europaweit für die Umgebungsüberwachung bei niedrigen Dosisleistungen, wie sie in der natürlichen Umwelt typisch sind, eingesetzt werden. Mit UDO II sind vergleichbar gute Messbedingungen – an neuem Ort – längerfristig wieder hergestellt.

Innenansicht des UDO II mit Photonen-Kalibriereinrichtung. Der eigentliche Fußboden aus aktivitätsarmem Edelstahl (im Bild noch nicht zu sehen) wird zur Zeit auf das mit Salz verfüllte Holzständerwerk aufgebracht.

### Underground laboratory UDO at a new location

In September 2012, PTB inaugurated its new underground laboratory (UDO II) at the 430 m level below ground in the Braunschweig-Lüneburg salt mine of the *european salt company* (esco) in Grasleben near Helmstedt. First measurements of the radiation level at UDO II yielded less than 2 nSv/h and a low radon activity concentration in the air. Thus, similarly good conditions to UDO in the Asse salt mine are found.

Over a period of almost 20 years, from 1991 to 2011, PTB operated the underground laboratory for dosimetry and spectrometry (UDO) in the Asse salt mine – initially at the 925 m level below ground and, later on, at the 490 m level below ground. At both sites, the laboratory was characterized by one of the lowest radiation levels worldwide, which – with 1 nSv/h – only amounted to approximately 1 % of the area dose rate on the surface. Besides the shielding of the cosmic radiation by the cover rock, this was especially due to the rock salt with an extremely low activity which surrounded the laboratory.

Following the classification of the Asse II mine as a nuclear installation in the context of the Atomic Energy Act, and the resulting change of the operator in January 2009, the utilization of the UDO laboratory in the Asse was possible only to a limited extent. In spring 2011, UDO had to be given up completely.

The tasks PTB had performed at UDO, however, will remain important to society for the correct calibration of dosimetry systems which are used throughout Europe for environmental monitoring at low exposure rates as they typically occur in the natural environment. With UDO II, comparably good measurement conditions have been restored at a new site for a longer term.



Internal view of UDO II with photon calibration facility. The actual floor (not yet to be seen in the photo) is made of low-activity stainless steel and is currently being mounted on the wood frame filled with salt.

## Großflächiger Röntgendetektor für niedrige Photonenenergien

In Kooperation mit der PTB hat die Schweizer Firma Dectris eine vakuumtaugliche Version des Hybrid-Pixel-Detektors für Röntgenstrahlung, Pilatus, entwickelt. Damit lassen sich beispielsweise Experimente zur Größenbestimmung von Nanopartikeln mit Röntgenkleinwinkelstreuung (Small Angle X-ray Scattering, SAXS) auch an den Absorptionskanten der leichten Elemente Calcium, Schwefel, Phosphor oder Silizium bei Photonenenergien unterhalb von 5 keV mit hoher Dynamik und guter Ortsauflösung durchführen. Insbesondere ist dies für die Untersuchung biologischer Proben von Bedeutung, zum Beispiel im Rahmen von Projekten des Europäischen Metrologie-Forschungsprogramms EMRP, bei denen im PTB-Labor am Elektronenspeicherring BESSY II komplizierte biologische Nanoobjekte und Nanopartikel in komplexen biologischen Matrizen durch SAXS-Messungen mit Synchrotronstrahlung dimensionell charakterisiert werden sollen. Das weltweit erste Gerät eines vakuumtauglichen Pilatus-Detektors wurde dazu als PTB-Größtgerät erfolgreich in Betrieb genommen.

In Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin und dem Institut für molekulare Pharmakologie der ungarischen Akademie der Wissenschaften konnten am Vierkristall-Monochromator-Strahlrohr im PTB-Labor bei BESSY II erste SAXS-Bilder von einer multilamellaren Liposom-Probe bei einer Photonenenergie von 3 keV aufgenommen werden. Der neue Detektor besteht aus 10 Modulen, die bei einer Pixelgröße von 172  $\mu\text{m}$  eine Gesamtfläche von 17 cm  $\times$  18 cm ergeben. Er soll auch für Weitwinkelstreuung, Kleinwinkelstreuung in Reflexion unter streifendem Einfall und andere Röntgentechniken eingesetzt werden.

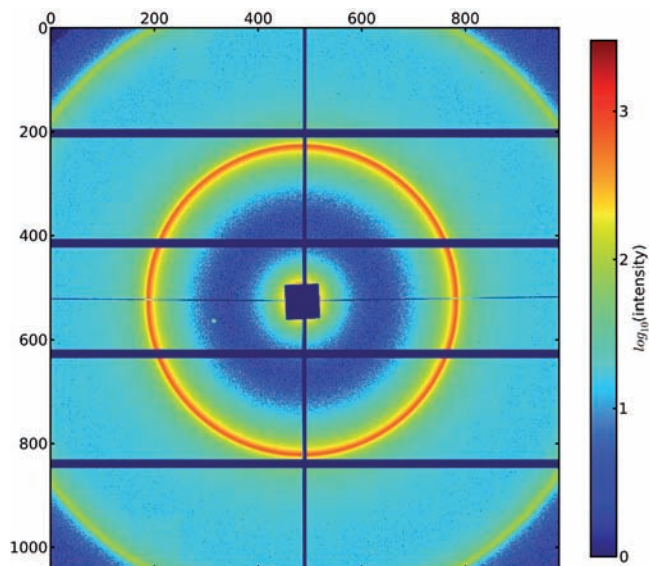
Röntgenkleinwinkelstreubild einer multilamellaren Liposom-Probe, aufgenommen bei einer Photonenenergie von 3 keV am FCM-Strahlrohr der PTB bei BESSY II

X-ray small-angle scattering image of a multilamellar liposome probe, recorded at a photon energy of 3 keV at PTB's FCM beamline at BESSY II

## Large-area X-ray detector for low photon energies

In cooperation with PTB, the Swiss company Dectris has developed a vacuum-compatible version of the "Pilatus" hybrid pixel detector for X-rays. This device now allows, for example, experiments for the size determination of nanoparticles to be carried out with Small-Angle X-ray Scattering (SAXS) also at the absorption edges of the light elements calcium, sulphur, phosphor or silicon at photon energies below 5 keV with high dynamics and good spatial resolution. This is of particular importance for the investigation of biological samples, for example within the scope of projects of the European Metrology Research Programme (EMRP), in the case of which complicated biological nano-objects and nanoparticles are to be dimensionally characterized in complex biological matrices in the PTB laboratory at the electron storage ring BESSY II, using SAXS measurements with synchrotron radiation. For this purpose, PTB has successfully commissioned the world's first device of a vacuum-compatible Pilatus detector as a PTB facility of the largest scale.

In cooperation with the Helmholtz-Zentrum Berlin and the Institute for Molecular Pharmacology of the Hungarian Academy of Sciences, the first SAXS images of a multilamellar liposome sample were recorded on the Four-Crystal Monochromator (FCM) beamline in the PTB laboratory at BESSY II at a photon energy of 3 keV. The new detector consists of 10 modules which furnish – with a pixel size of 172  $\mu\text{m}$  – a total area of 17 cm  $\times$  18 cm. It is also to be used for wide-angle scattering (WAXS), small-angle scattering (GISAXS) in reflection under grazing incidence, and other X-ray techniques.



## Funktionelle Magnetresonanztomographie

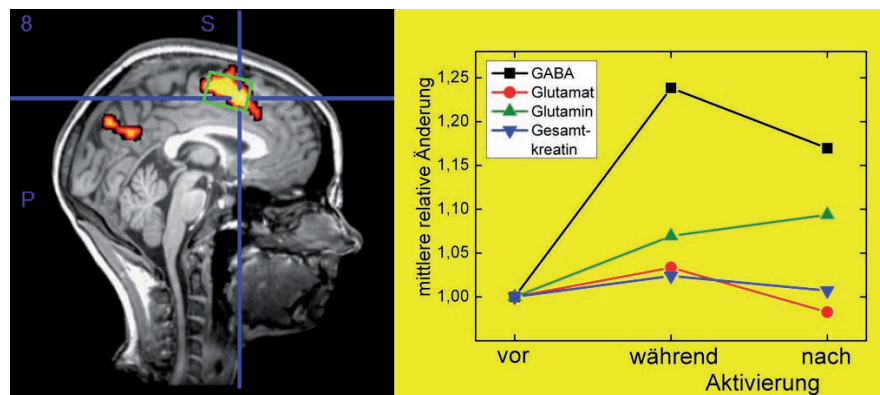
In einem Kooperationsprojekt der PTB mit der Charité-Universitätsmedizin Berlin wurde mithilfe der Magnetresonanztomographie (MRS) erstmals gezeigt, wie sich die Konzentrationen von Neurotransmittern während der kognitiven Aktivierung einer Gehirnregion verändern.

Die Koordination zwischen anregenden (glutamatergen) und hemmenden (GABAergen) Neuronen ist ein für die neuronale Aktivität fundamentaler Prozess, ihre Aufklärung eine wissenschaftliche und messtechnische Herausforderung. Das in der PTB durchgeführte Experiment zielte auf die Messung der Assoziation zwischen den Konzentrationen der Neurotransmitter Glutamat und GABA und der Gehirnaktivität während einer kognitiven Aufgabe. Dazu führten 19 Probanden im 3-Tesla-Tomografen der PTB den Stroop-Test durch, in dem die Schriftfarbe von Farbwörtern zu benennen ist. Wenn die präsentierte Information widersprüchlich ist, also z. B. beim Schriftzug „blau“, löst dieser Konflikt eine Aktivierung im Präfrontalkortex aus. Mittels funktioneller MRT wurde bei jedem Individuum die aktivierte Region identifiziert, in der dann während des erneuten kognitiven Tests MR-spektroskopische Messungen durchgeführt wurden. Eine neu etablierte MRS-Sequenz erlaubte die Quantifizierung von GABA und Glutamat sowie dessen engem Verwandten, dem Glutamin. Damit gelang erstmals der Nachweis, dass sich während der neuronalen Aktivierung die Konzentrationen aller drei Neurotransmitter signifikant verändern, während dies bei der Kontrollsubstanz Kreatin nicht der Fall war.

Die Erkenntnisse über das Wechselspiel der Botenstoffe bei neuronaler Stimulation tragen zum Verständnis des menschlichen Gehirns und seiner psychischen Erkrankungen auf biochemischer Grundlage bei.

Links: durch den kognitiven Test aktivierte Hirnregionen eines Probanden; grün: Zielvolumen für die MRS. Rechts: auf den Anfangswert normierte Mittelwerte der Metabolitkonzentrationen über alle Probanden

Left: brain regions of a volunteer that are activated by the cognitive test; green: target volume for MRS; right: mean values over all volunteers of the metabolite concentrations normalized to the initial value



## Functional magnetic resonance spectroscopy

Within the scope of a cooperation project between PTB and the Charité University Hospital in Berlin, magnetic resonance spectroscopy (MRS) was used for the first time to demonstrate how the concentrations of neurotransmitters change while a brain region is cognitively activated.

Coordination between exciting (glutamatergic) and inhibitory (GABAergic) neurons is a fundamental process for neuronal activity – and clarifying this coordination process is a scientific and metrological challenge. The experiment carried out at PTB was aimed at measuring the association between the concentrations of the neurotransmitters glutamate and GABA and the brain activity during a cognitive task. For this purpose, 19 volunteers performed the stroop test in PTB’s 3-tesla tomograph; in this test, the volunteers had to name the colour in which a colour word was written. If the information presented was contradictory (e.g. “blue”), this conflict triggered off an activation in the prefrontal cortex. In each person, the activated region was identified by means of functional MRI and in this region, MR-spectroscopic measurements were then carried out during a new cognitive test. A newly established MRS sequence allowed GABA and glutamate, as well as their close relative glutamine, to be quantified. This provided the first proof that the concentrations of these three neurotransmitters change significantly during neural activation, whereas no changes were observed in the case of the control substance, creatine.

The findings on the interaction of the messengers in the event of neuronal stimulation contribute to understanding the human brain – and the mental illnesses that can affect it – based on biochemistry.

## Bayes'sche Verfahren zur Messunsicherheitsbestimmung bei Regressionsproblemen

Regressionsprobleme treten in der Metrologie häufig auf, so z. B. bei vielen Kalibrieraufgaben. Zu deren Behandlung werden derzeit zumeist „Least-Squares“-Methoden verwendet. Eine Alternative hierzu stellen Bayes'sche Verfahren dar. Der Vorteil dieser Verfahren gegenüber „Least-Squares“-Methoden ist, dass Vorinformation in natürlicher Weise berücksichtigt wird und dass Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die interessierenden Größen errechnet werden können. In der PTB werden daher Verfahren auf Basis der Bayes'schen Statistik für die Behandlung von Regressionsproblemen in der Metrologie entwickelt.

Ein Beispiel für ein solches Regressionsproblem ist die Magnetfeldfluktuationsthermometrie, für die die PTB ein spezielles Bayes'sches Auswertverfahren entwickelt hat. In der Abbildung sind Wahrscheinlichkeitsverteilungen dargestellt, die mit dem neuen Verfahren errechnet wurden und eine zuverlässigere Bestimmung von Messunsicherheiten ermöglichen.

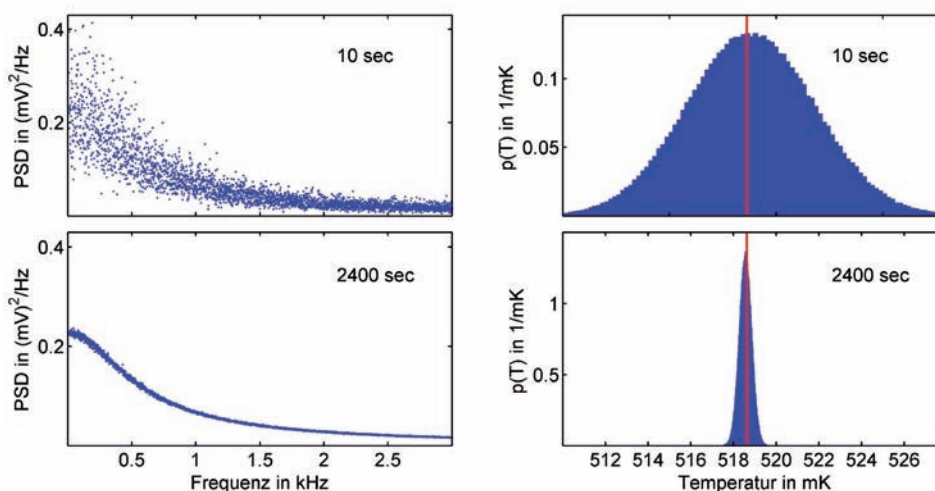
Die Entwicklung von Verfahren zur Messunsicherheitsbestimmung bei Regressionsproblemen ist auch ein zentrales Thema des von der PTB koordinierten EMRP-Projekts „Novel mathematical and statistical approaches to uncertainty evaluation“, das am 1. August 2012 startete. An diesem Projekt sind 11 europäische Partner sowie 6 weitere Kooperationspartner aus Asien, Nord- und Südamerika beteiligt.

## Bayesian methods for uncertainty evaluation in regression problems

Regression problems often occur in metrology, e.g. in numerous calibration tasks. Currently, so-called “least-squares” methods are mainly used to solve these problems. Alternatively, Bayesian methods can be employed. In contrast to “least-squares” methods Bayesian procedures allow prior information to be taken into account in a natural manner. In addition, they enable the calculation of probability distributions for the measurands concerned. Hence, procedures based on Bayesian methods are being developed at PTB for uncertainty evaluation in regression problems.

An example for a regression problem is given by magnetic field fluctuation thermometry for which PTB has developed a specific Bayesian analysis scheme. The figure shows the probability distributions determined by the new method which enables a more reliable evaluation of measurement uncertainties.

The development of methods for uncertainty evaluation for regression problems also is a central topic within the EMRP Project “Novel mathematical and statistical approaches to uncertainty evaluation”, which is coordinated by the PTB and which was launched on 1 August 2012. Eleven European partners, as well as six international collaborators from North America, South America, and Asia, among others are involved in this project.



Spektren von beobachteten Magnetfeldfluktuationen (links) und hieraus bestimmte Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die zu bestimmende Temperatur (rechts) für zwei Messungen unterschiedlicher Länge. Die rote Linie markiert eine hochgenaue und sehr aufwendige Referenzmessung.

Measured magnetic field fluctuation spectra (left) and resulting probability distributions for the sought temperature (right) for two measurements of different length. The red line indicates a time consuming high precision reference measurement.

### Die 63. Sitzung des Kuratoriums der PTB

Die alljährliche Sitzung des Kuratoriums der PTB fand in diesem Jahr am 24. und 25. Mai in Braunschweig statt. Die Kuratoren und Gäste wurden das erste Mal vom neuen Präsidenten der PTB, Prof. Dr. Joachim Ullrich, begrüßt. Im Anschluss daran gab es wie in jedem Jahr für die Kuratorinnen und Kuratoren die Gelegenheit, eine Auswahl von Messplätzen der PTB zu besichtigen und so einen Einblick in einige aktuelle Forschungs- und Dienstleistungsaufgaben zu bekommen. Im weiteren Verlauf des Nachmittags des ersten, traditionell fachlich geprägten Tages fand ein PTB-öffentliches Kolloquium statt, in dem Nachwuchswissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ihr Arbeitsgebiet vorstellten. In diesem Jahr gab es ein breites Themenspektrum mit Vorträgen von Makram Anwar Zebian über „Gehörgangssonden zur Messung otoakustischer Emissionen“, von Dr. Erik Benkler zum Thema „Schnelle optische Synthesizer“ und von Franziska Renner über ein „Benchmark-Experiment zur Verifikation von Strahlungstransportrechnungen für die Dosimetrie“. Danach bestand Gelegenheit zu intensiven Diskussionen der Kuratoren in den Fachabteilungen.

Die Kuratoriumssitzung am 25. Mai 2012 wurde von dem Präsidenten des Kuratoriums, Dr. Sven Halldorn (BMW), eröffnet, der insbesondere den neuen Präsidenten der PTB begrüßte. In seiner Rede sicherte Dr. Halldorn zu, dass das BMW die PTB bei ihrem Bemühen um ein Nachfolgeprogramm EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research) zum sehr erfolgreich laufenden EMRP (European Metrology Research Programme) unterstützen wird. In Zukunft werde sich die PTB vermehrt neuen großen gesellschaftlichen Herausforderungen stellen müssen, die wie die Energiewende spezielle Anforderungen an die Metrologie stellen. Dr. Halldorn betonte, dass die PTB auch in Zukunft eine wichtige Rolle im gesetzlichen Messwesen und im Bereich der Normung

### The 63<sup>rd</sup> meeting of the Kuratorium (Advisory Board) of PTB

The annual meeting of the Kuratorium (Advisory Board) of PTB took place this year in Braunschweig on 24 and 25 May. The members of the Kuratorium and guests were welcomed for the first time by the new President of PTB, Prof. Dr. Joachim Ullrich. Following this, as happens every year, the members of the Kuratorium had the opportunity to visit a selection of PTB's measurement facilities and thus to gain an insight into some of the ongoing research and service tasks. Later in the afternoon of the first – traditionally technically oriented – day, a PTB open colloquium was held, in which young scientists presented their fields of work. This year there was a wide range of subjects with presentations by Makram Anwar Zebian on “Ear canal probes for measuring otoacoustic emissions”, by Dr. Erik Benkler on the subject of “Fast optical synthesizers” and by Franziska Renner about a “Benchmark experiment for the verification of radiation transport calculations for dosimetry”. There was subsequently time for the members of the Kuratorium to hold intensive discussions in PTB's specialist divisions.

The meeting of the Kuratorium on 25 May 2012 was opened by the President of the Kuratorium, Dr. Sven Halldorn (BMW), who particularly welcomed PTB's new President. In his speech Dr. Halldorn promised that the BMW would support PTB in its efforts for a follow-up programme to the very successful ongoing EMRP (European Metrology Research Programme), namely the EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research). In future PTB will have to increasingly face large new social challenges which – like the *energy transition* (transformation of the energy system away from nuclear power) – place special demands on metrology. Dr. Halldorn emphasized that PTB – also in future – will continue to play an important role in legal metrology and in the field of standardization. To successfully implement its wide range of tasks, PTB needs



Dr. Claudia Swart (PTB) erläutert Mitgliedern des Kuratoriums das Aufgabengebiet Elementspeziesanalytik für Metallproteine („Metallomics“).

Dr. Claudia Swart (PTB) explains the field of work “element speciation analysis for metalloproteins (metalloomics)” to the members of the Kuratorium.



Gruppenbild der Teilnehmer an der Tagung des Kuratoriums der PTB 2012

Group photo of the participants at the PTB Kuratorium meeting in 2012

einnehmen werde. Für die erfolgreiche Umsetzung ihres breiten Aufgabenspektrums brauche die PTB gute Rahmenbedingungen, äquivalent zu denen, die außeruniversitären Forschungseinrichtungen mit dem Wissenschaftsfreiheitsgesetz eröffnet werden. Dafür werde sich das BMWi einsetzen.

Im Anschluss daran gab Prof. Ullrich einen Überblick über die wesentlichen Arbeiten der PTB im vergangenen Jahr. Dabei berichtete er über den aktuellen Stand bei der Neudefinition der Basiseinheiten und erläuterte ausführlich die Planungen der PTB für die Fortführung der Arbeiten, die im Rahmen des Avogadro-Projekts begonnen wurden. Dabei wird die Avogadro-Konstante mit bisher unerreichter Genauigkeit bestimmt, was gleichzeitig einen Weg zur Neudefinition und primären Darstellung des Kilogramms eröffnet. Prof. Ullrich berichtete weiterhin, dass das EMRP zu einer wesentlichen Säule der Forschungsaktivitäten der PTB geworden sei. Die durch den kontinuierlichen Stellenabbau bedingte weitere Erhöhung der Zahl der nicht permanent beschäftigten Mitarbeiter wird in den nächsten Jahren zunehmend Probleme aufwerfen, da nicht mehr genug Mitarbeiter für die Durchführung der vorgegebenen Dienstleistungsaufgaben vorhanden sind.

**Im Kuratorium der PTB wird es folgende personelle Veränderungen geben:**

Dr. Wolfgang Schwitz scheidet aus dem Kuratorium aus, der Ergänzungsausschuss hat drei neue Mitglieder zur Berufung in das Kuratorium vorgeschlagen, die vom Kuratorium befürwortet werden. Die Ernennung der neuen Kuratoren Dr. Kayser-Pyzalla, Dr. Burger und Dr. Petit durch das BMWi ist mittlerweile erfolgt.

good framework conditions, equivalent to those which are opened to non-university research institutions with the “*Wissenschaftsfreiheitsgesetz*” (Academic Freedom Act). The BMWi will advocate this.

Following this, Prof. Ullrich gave an overview of the most important work performed by PTB in the past year. In his speech he reported on the current status of the redefinition of the base units and explained in detail PTB’s planning for the continuation of the work that was started in the scope of the Avogadro Project. Within this project, the Avogadro constant is being determined with an accuracy which has so far not yet been attained, which is simultaneously opening a way for the re-definition and the primary realization of the kilogram. Prof. Ullrich furthermore reported that the EMRP has become one of the main pillars of the research activities of PTB. The continued increase in the number of non-permanent staff members due to the continuous cut-backs in permanent staff will – in the coming years – increasingly create problems, as sufficient staff numbers will no longer be available to carry out the service tasks which have to be fulfilled.

**The following changes to the members of PTB’s Kuratorium will take place:**

Dr. Wolfgang Schwitz has retired from the Kuratorium; the Extension Committee has suggested three new members to be appointed to the Kuratorium, who have been endorsed by the Kuratorium. The appointment of the new members of the Kuratorium, Dr. Kayser-Pyzalla, Dr. Burger and Dr. Petit, has since been made by the BMWi.

### Verabschiedung von Prof. Dr. Ernst O. Göbel

Im Rahmen einer Festveranstaltung am 20. Januar 2012 wurde in Anwesenheit von Bundeswirtschaftsminister Dr. Philipp Rösler der langjährige Präsident der PTB, Prof. Dr. Ernst O. Göbel, nach 16-jähriger Amtszeit offiziell verabschiedet und sein Nachfolger, Prof. Dr. Joachim Ullrich, in sein Amt eingeführt. In Anwesenheit zahlreicher prominenter Gäste aus der Politik und der Wissenschaftslandschaft, wie dem Nobelpreisträger Prof. Dr. Klaus von Klitzing, wurde von zahlreichen Rednern, darunter die Universitätspräsidenten Prof. Dr.-Ing. Jürgen Hesselbach (TU Braunschweig) und Prof. Dr.-Ing. Erich Barke (Leibniz Universität Hannover) die Arbeit von Prof. Göbel in den letzten 16 Jahren gewürdigt. „Professor Göbel hat in seinen 16 Jahren als Präsident der PTB ihren Ruf als exzellentes Forschungsinstitut der Metrologie sowie als zuverlässiger und kompetenter Dienstleister in allen Fragen der Messtechnik national und international gefördert. Dafür gebührt ihm höchste Anerkennung“, sagte Bundeswirtschaftsminister Rösler in seiner Rede bei der Festveranstaltung.

Prof. Göbels Nachfolger im Amt ist der Physiker Prof. Dr. Joachim Ullrich, der vom Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK), Heidelberg, zur PTB wechselte. Bundesminister Rösler: „Mit Professor Ullrich konnten wir nun einen herausragenden Physiker als Nachfolger für das Amt gewinnen. Er wird der 14. Präsident in der 125-jährigen Geschichte der PTB.“ Prof. Ullrich, Jahrgang 1956, war am MPIK zehn Jahre Direktor und Wissenschaftliches Mitglied und leitete dort die Abteilung „Experimentelle Mehrteilchen-Quantendynamik“. Seine physikalische Heimat hat Prof. Ullrich in der Atom-, Molekül- und Laserphysik sowie in der Präzisions-Spektroskopie. „Ich wünsche meinem Nachfolger alles Gute, viel Erfolg in seinem neuen Amt und stets ein gutes Gespür für den richtigen metrologischen Kurs“, sagte Prof. Göbel.

Der neue Präsident der PTB, Prof. Dr. Joachim Ullrich, zusammen mit Bundeswirtschaftsminister Dr. Philipp Rösler und dem ehemaligen Präsidenten der PTB, Prof. Dr. Ernst O. Göbel (von links)

The new President of PTB, Prof. Dr. Joachim Ullrich, with the Federal Minister of Economics, Dr. Philipp Rösler, and the former President of PTB, Prof. Dr. Ernst O. Göbel (from the left)

### Retirement ceremony for Prof. Dr. Ernst O. Göbel

Within a ceremony on 20 January 2012 in the presence of the Federal Minister of Economics Dr. Philipp Rösler, Prof. Dr. Ernst O. Göbel, who had been President of PTB for 16 years, was given his official farewell and his successor, Prof. Dr. Joachim Ullrich, took office. In the presence of numerous prominent guests from politics and the scientific community, such as the Nobel Prize winner Prof. Dr. Klaus von Klitzing, Prof. Göbel's work in the last 16 years was honoured by numerous speakers, including the university presidents Prof. Dr.-Ing. Jürgen Hesselbach (TU Braunschweig) and Prof. Dr.-Ing. Erich Barke (Leibniz Universität Hannover). „Professor Göbel has in his 16 years as President of PTB nationally and internationally promoted its reputation as an excellent research institute in the field of metrology as well as a reliable and competent service provider in all issues related to metrology. For this, he deserves our highest recognition,“ said Minister Rösler in his speech at the event.

Prof. Göbel's successor as president is the physicist Prof. Dr. Joachim Ullrich, who left the Max Planck Institute for Nuclear Physics (MPIK), Heidelberg, for PTB. Federal Minister Rösler said: „With Professor Ullrich we have now been able to attract an excellent physicist as the successor to the office of president. He will be the 14th president in the 125-year history of PTB.“ Prof. Ullrich, born in 1956, director and scientific member of the MPIK for ten years, headed the „Experimental Few-Particle Quantum Dynamics“ Division there. Prof. Ullrich's background in physics lies in atomic, molecular and laser physics as well as in precision spectroscopy. „I wish my successor all the best, along with much success in his new office and hope that he always has a good sense of the right metrological course,“ said Prof. Göbel.



## Verleihung des Helmholtz-Preises 2012

Der Helmholtz-Preis 2012 wurde am 27. März 2012 in der Stadthalle Braunschweig im Anschluss an das diesjährige Helmholtz-Symposium an Sven Sturm, Anke Wagner und Prof. Dr. Klaus Blaum, Max Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg, und Johannes Gutenberg-Universität, Mainz, für die Bestimmung des g-Faktors von hochgeladenen Ionen verliehen. Die von den Preisträgern durchgeführten Messungen erlauben die Überprüfung von Vorhersagen der Quantenelektrodynamik, der fundamentalen Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung, mit in gebundenen Systemen bisher nicht erreichter Präzision.

Mit dem mit 20 000 € dotierten Helmholtz-Preis des Helmholtz-Fonds e. V. und des Stifterverbands für die Deutsche Wissenschaft werden alle 2 bis 3 Jahre hervorragende wissenschaftliche und technologische Forschungsarbeiten aus dem Fachgebiet Präzisionsmessung in Physik, Chemie und Medizin ausgezeichnet.

Vor der Preisverleihung fand ein ganztägiges Helmholtz-Symposium mit 650 Teilnehmern statt. In sieben Fachvorträgen gaben internationale Expertinnen und Experten einen Überblick über aktuelle Fragen der Metrologie. Dabei ging es um grundlegende Überlegungen zu den Konsequenzen nach einer Neudefinition der SI-Basiseinheiten, um anwendungsspezifische Fragen im Bereich Metrologie für die Medizin und um Präzisionsmessungen für die Überprüfung fundamentaler Fragen der modernen Physik, wie sie z. B. mit Gravitationswellendetektoren beantwortet werden können. So wurde ein weiter Bogen gespannt und dem Motto „Metrology, the Universe and Everything“ Rechnung getragen.

Verleihung des Helmholtz-Preises 2012 (von links nach rechts): Anke Wagner, Dr. Nathalie von Siemens (Schatzmeisterin des Helmholtz-Fonds), Sven Sturm, Prof. Dr. Klaus Blaum, Prof. Dr. Joachim Ullrich (Präsident der PTB)

Awarding of the Helmholtz Prize 2012 (from left to right): Anke Wagner, Dr. Nathalie von Siemens (Treasurer of the Helmholtz Fund), Sven Sturm, Prof. Dr. Klaus Blaum, Prof. Dr. Joachim Ullrich (President of PTB)



## Awarding of the Helmholtz Prize 2012

In Braunschweig's Civic Centre (Stadthalle Braunschweig) on 27 March 2012 following this year's Helmholtz Symposium, the Helmholtz Prize 2012 was awarded to Sven Sturm, Anke Wagner and Prof. Dr. Klaus Blaum of the Max Planck Institute for Nuclear Physics in Heidelberg and of the Johannes Gutenberg University Mainz for the determination of the g-factor of highly charged ions. The measurements carried out by the award winners allow the verification of predictions of quantum electrodynamics, the fundamental theory of electromagnetic interaction, with a precision as yet unattained in bound systems.

The Helmholtz Prize of the Helmholtz-Fonds e.V. (Helmholtz Fund) and the Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft, endowed with € 20 000, is awarded every 2 to 3 years for outstanding scientific and technological research in the field of precision measurement in physics, chemistry and medicine.

Before the prize was awarded, a one-day Helmholtz Symposium with 650 participants took place. In seven lectures international experts gave an overview of current metrological issues. These included fundamental considerations on the consequences of a redefinition of the SI base units, application-specific questions in the field of metrology for medicine as well as precision measurements for the verification of fundamental questions of modern physics, for instance, how they can be addressed with gravitational wave detectors. A wide range of subjects was thus covered and the theme "Metrology, the Universe and Everything" was reflected.



### Besuch von Staatssekretär Beerfeltz in der PTB

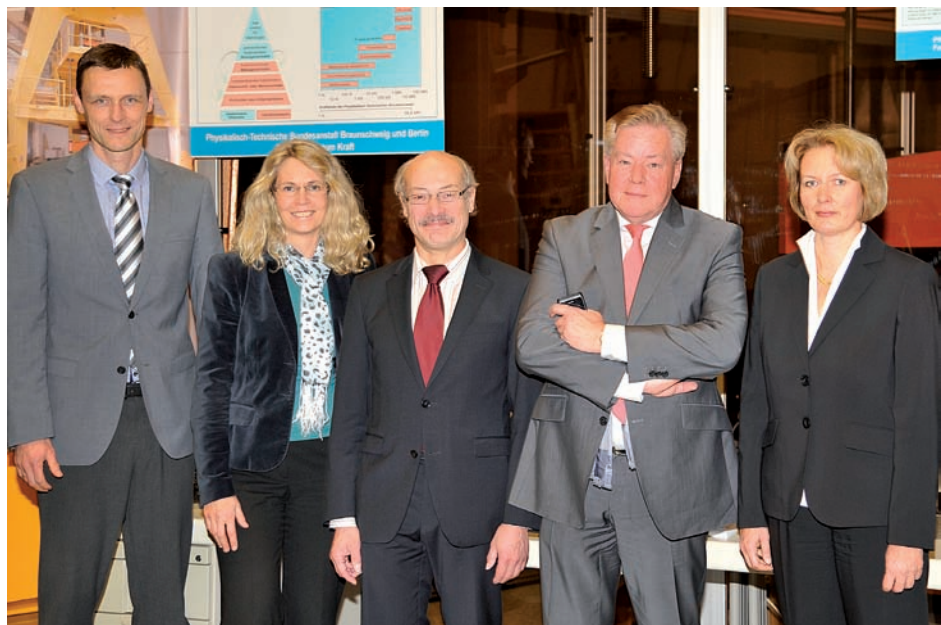
Am 1. November 2012 besuchte Hans-Jürgen Beerfeltz, Staatssekretär des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), die PTB. Im Rahmen einer Diskussion mit dem Präsidium und durch den Besuch von zwei Fachbereichen informierte er sich über Ziele und Aufgaben der PTB. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf den internationalen Aktivitäten. Die PTB führt seit über 40 Jahren mit finanzieller Unterstützung durch das BMZ Projekte in Partnerländern durch, die den Auf- und Ausbau einer Qualitätsinfrastruktur zum Ziel haben. Staatssekretär Beerfeltz nutzte die Gelegenheit, die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der PTB, die in diesem Bereich tätig sind, kennenzulernen und bekam einen näheren Einblick in einige der Projekte. „Mit der PTB verfügt Deutschland als einziger bilateraler Geber über eine international anerkannte Fachinstitution, die für uns technische und politische Beratung im Bereich Qualitätsinfrastruktur durchführt. Es ist beeindruckend, dass die PTB den Dreiklang von Wissenschaft, Wirtschaft und Entwicklung engagiert verbindet und weltweit Verantwortung übernimmt. Nur wenn Länder Normen und technische Regulierungen harmonisieren und gegenseitig anerkennen, wird die Globalisierung für alle zur Erfolgsgeschichte“, sagte Staatssekretär Beerfeltz.

### Visit of State Secretary Beerfeltz to PTB

On 1 November 2012 Hans-Jürgen Beerfeltz, State Secretary of the Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Federal Ministry for Economic Cooperation and Development – BMZ), visited PTB. During a discussion with the Presidential Board and through visiting two of PTB's departments, he got an impression of the aims and tasks of PTB, with special emphasis on the international activities. PTB has undertaken projects in partner countries for over 40 years with the financial support of BMZ. These projects aim at developing and extending a quality infrastructure. State Secretary Beerfeltz used the opportunity to get to know PTB's staff members who are active in this field and was given a close insight into some of the projects. "With PTB, Germany has, as the only bilateral donor, an internationally recognized specialized institution which conducts technical and political consulting services in the area of quality infrastructure for us. It is impressive that PTB combines the triad of science, the economy and development with commitment and has taken on responsibility for this worldwide. Only when countries harmonize and mutually recognize standards and technical regulations, will globalization become a success story for everyone," said State Secretary Beerfeltz.

Staatssekretär Beerfeltz (2. von rechts) beim Besuch der PTB vor der 2-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung zusammen mit (von links nach rechts) Dr. Stenger, Dr. Schmiege (BMZ), Prof. Dr. Ullrich und Dr. Stoldt

State Secretary Beerfeltz (2nd from right) during his visit to PTB in front of the 2 MN force standard machine together with (from left to right) Dr. Stenger, Dr. Schmiege (BMZ), Prof. Dr. Ullrich and Dr. Stoldt



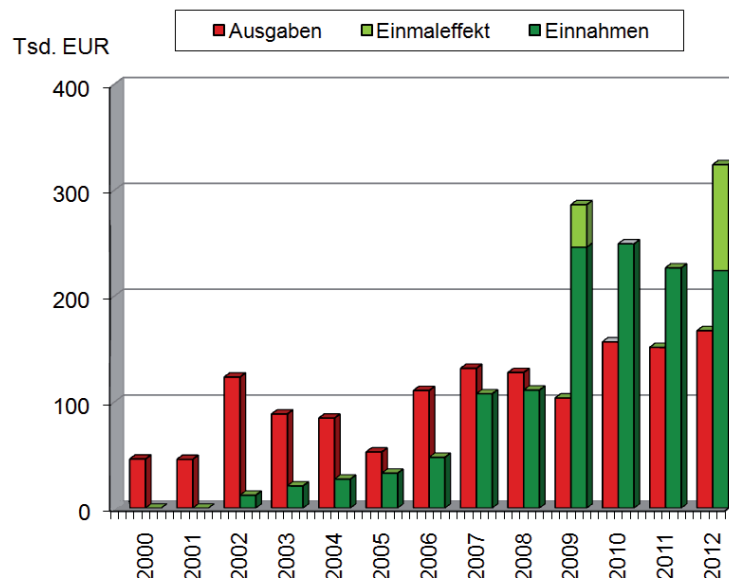
### Professionelle Patentverwertung führt zu deutlichen Lizenzeinnahmen

Die Patentverwertung der PTB führt zu neuen Geschäftsfeldern für die Lizenznehmer und zu deutlichen Lizenzeinnahmen für die PTB. So konnte im Jahre 2012 das Ergebnis des Vorjahres erneut übertroffen werden, sodass sich die Lizenzeinnahmen aus den vergangenen vier Jahren nunmehr auf 1,1 Millionen € summieren.

Die Zahl der aktiv betreuten Vorgänge beläuft sich auf 150. Mit 60 Lizenzverträgen für Patente oder Technologien ist die Verwertungsrate ungewöhnlich hoch. Diese PTB-Technologien ermöglichen Lizenznehmern den Aufbau neuer Geschäftsfelder, zumeist im Bereich der Ultrapräzisionsmesstechnik. Die erfolgreichsten lizenzierten Technologien finden breitgefächerte Anwendungen in vielen zukunftssträchtigen Branchen. Hierzu zählen Medizintechnik, Dosimetrie, Koordinatenmesstechnik, Bauphysik und Prozesstechnologie. Sie leisten damit ihren Beitrag zur Schaffung und dem Erhalt von Arbeitsplätzen, insbesondere im Bereich der mittelständischen Industrie.

Seit vier Jahren liegen die Überschüsse nun deutlich über den externen Kosten. Die Abbildung zeigt auch den typischen Versatz zwischen dem Beginn der Patentierung und den erzielten ersten Erlösen aus fünf Jahren. Als Einmaleffekt sind Verkäufe und im letzten Jahr überdurchschnittliche Einnahmen aufgrund des tragischen Fukushima-Unfalles im Bereich hochgenauer Neutronendosimeter farblich hervorgehoben. Die Lizenzeinnahmen finanzieren damit die Patentkosten und die ausgeschüttete Erfindervergütung. Zukünftig ist eine noch engere Verzahnung der industrienahe Forschung der PTB-Fachabteilungen mit der Patentverwertung geplant. Das wesentliche volkswirtschaftliche Ziel ist dabei, die Ergebnisse der akademischen Forschung schneller und gezielter in die industrielle Anwendung zu bringen.

Externe Patentkosten und Einnahmen aus Lizenzverträgen



### Professional patent exploitation leads to considerable revenues from licenses

Patent exploitation of PTB enables the licencees to develop new fields of business and generates considerable licence revenues for PTB. In 2012, the outcome of the previous year was exceeded again, resulting in a total amount of 1.1 million euros for the last four years.

The number of actively supported licensing procedures amounts to 150. With 60 licensing agreements for patents or technologies, the exploitation rate is unusually high. These PTB technologies allow the licence holders to establish new fields of business, mostly in the area of ultra-precision metrology. The most successful licensed technologies are utilized in many promising sectors and in multi-faceted applications. These include medical engineering, dosimetry, coordinate metrology, building physics and process technology. They thus contribute to the creation and preservation of jobs, especially in the field of medium-sized enterprises.

For four years now, the surpluses have been clearly higher than the external costs. The figure shows the typical mismatch between the beginning of the patenting and the first proceeds of five years. The one-off effects have been highlighted in colour, these include patent sales and, in the last year, above-average revenues in the area of high-precision neutron dosimeters due to the tragic accident in Fukushima. Thus, the revenues from licences finance the patent costs and the inventors' bonuses. In future, an even closer dovetailing of industry-oriented research of the diverse PTB departments with patent exploitation is planned. The essential macroeconomic ob-

jective is to apply the results of the academic research more rapidly and in a more targeted way to industrial applications.

External patent costs and revenues from licence agreements

### **Erfolgreiche Re-Evaluierung des Qualitätsmanagements der PTB durch EURAMET im Rahmen des CIPM-MRAs**

Seit Unterzeichnung des multilateralen Abkommens des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht (CIPM-MRA) im Oktober 1999 sind die PTB und ihre designierten Institute (Bundesanstalt für Materialforschung- und -prüfung, Umweltbundesamt und Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit) anerkannte und geschätzte Teilnehmer dieses Abkommens. Alle Teilnehmer müssen den dauerhaften und wirksamen Betrieb eines Qualitätsmanagementsystems nachweisen. Durch ein international vereinbartes Review-Verfahren wird das jährlich überprüft. Nach jeweils fünf Jahren wird eine vollständige Evaluierung des QM-Systems gefordert.

Die Re-Evaluierung der metrologischen Laboratorien Deutschlands wurde im März 2012 von EURAMET TC-Quality durchgeführt. Dabei haben die deutschen Institute unter Leitung der PTB erfolgreich nachgewiesen, dass die Anforderungen des CIPM-MRA hinsichtlich des QM-Systems in vollem Umfang erfüllt werden. Voraussetzungen dieser Bestätigung durch EURAMET sind ein Bericht zur QM-Entwicklung im Zeitraum 2007–2011 sowie die Jahresberichte. Abschluss des Verfahrens bildete eine mündliche Präsentation. In einer ausführlichen Diskussion wurden die Schwerpunkte der Weiterentwicklung des QM-Systems durch die PTB vorgestellt. Die BAM ergänzte diese Ausführung bzgl. der Herstellung von Referenzmaterialien in der Chemie.

Die erfolgreiche Evaluierung durch EURAMET ist die Voraussetzung für die uneingeschränkte weltweite Anerkennung der Ergebnisberichte für mehr als 1600 Kalibrier- und Messmöglichkeiten des deutschen Metrologiesystems. Zur umfassenden Information stehen den Kunden und Partnern der PTB neben diesen Mess- und Kalibriermöglichkeiten auch das vollständige QM-Handbuch der PTB sowie die Selbsterklärung zum Qualitätsmanagement im Internet zur Verfügung

### **Successful re-evaluation of PTB's quality management by EURAMET within the scope of the CIPM-MRA**

Since the signing of the Mutual Recognition Arrangement of the *International Committee for Weights and Measures – CIPM-MRA* in October 1999, PTB and its designated institutions (the *Federal Institute for Materials Research and Testing – BAM*, the *Federal Environment Agency – UBA* and the *Federal Ministry of Consumer Protection and Food Safety – BVL*) have been acknowledged and valued participants of this arrangement. All participants must provide evidence of the permanent and effective operation of a quality management system (QMS). This is verified every year by an internationally agreed-upon review procedure. Every five years, a comprehensive evaluation of the QMS is required.

This re-evaluation of the German metrological laboratories was carried out by EURAMET TC Quality in March 2012. The German institutions under the direction of PTB thereby successfully proved that the requirements of the CIPM-MRA with regard to quality management are entirely fulfilled. The preconditions of this confirmation by EURAMET are a report on the QMS development within the period of 2007–2011 and the Annual Reports. The procedure was concluded by an oral presentation. In a comprehensive discussion, the focal points of the further development of the quality management were presented by PTB. *BAM* supplemented this presentation with information on the manufacturing of reference materials in chemistry.

The successful evaluation by EURAMET is the precondition for the unlimited worldwide recognition of certificates for more than 1,600 calibration and measuring capabilities of the German metrology system. In order to keep the customers and partners of PTB comprehensively informed, PTB's complete quality manual and the self-declaration on quality management – besides these metrological and calibration capabilities – are also made available on the Internet.

## Begutachtung der messtechnischen Rückführung im Eichwesen

Der PTB obliegt nach § 6 Absatz 2 des Einheiten- und Zeitgesetzes (EinhZeitG) die Aufgabe, die Einheitlichkeit des Messwesens in Deutschland zu sichern, wenn sie diese gesetzliche Aufgabe zusammen mit Dritten erfüllt. Dies gilt zum Beispiel bei der Zusammenarbeit mit den deutschen Eichbehörden. Zur Sicherung der Einheitlichkeit gehört insbesondere die Begutachtung der messtechnischen Rückführung durch die PTB.

In 7 der insgesamt 13 Eichbehörden wurde diese Begutachtung in diesem Jahr erfolgreich durchgeführt. Dabei stand die kompetente Anwendung der messtechnischen Rückführung nach dem Stand der Technik im Mittelpunkt. Insgesamt sind 10 Bundesländer in die Begutachtung einbezogen; für weitere 4 Bundesländer ist sie in Vorbereitung. Darüber hinaus bauen die Eichbehörden, unter Beteiligung der PTB, ein System von Peer Reviews auf, um die dauerhafte Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen nachzuweisen.

Die Bestätigung technischer Kompetenz durch die PTB wird den zukünftig erforderlichen Kompetenznachweis gegenüber der Europäischen Kommission und den übrigen Mitgliedsstaaten der Europäischen Union erleichtern. Darüber hinaus ist die Begutachtung der messtechnischen Rückführung durch die PTB die Voraussetzung, dass Eichscheine auch als Rückführungsnachweise in akkreditierten Institutionen genutzt und von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) anerkannt werden können. Damit kann einer Doppelbelastung der Wirtschaftsteilnehmer durch eine Eichung und eine zusätzliche Kalibrierung von Messgeräten vermieden werden.

## Assessment of the metrological traceability in legal metrology

According to section 6, subsection 2 of the Units and Time Act, PTB has the task of ensuring the uniformity of metrology in Germany when PTB performs this legal task together with third parties. This applies, e.g., to the cooperation with the German verification authorities. Ensuring the uniformity includes, in particular, the assessment of the metrological traceability by PTB.

In seven of the, in total, 13 verification authorities, this assessment was successfully carried out in 2012. The focus was, thereby, on the competent application of the metrological traceability according to the latest state of the art. Altogether, 10 federal states are involved in the assessment; for 4 other federal states, the assessment is just being prepared. Furthermore, the verification authorities – with the participation of PTB – set up a system of peer reviews to be able to prove the permanent compliance with the legal requirements.

The confirmation of technical competence by PTB will simplify the proof of competence which will be required in future for the European Commission and the other Member States of the European Union. Furthermore, the assessment of the metrological traceability by PTB is the precondition for the verification certificates to be used also as proof of traceability in accredited institutions and for them to be accepted by the *German Accreditation Body* (*Deutsche Akkreditierungsstelle – DAkkS*). This can help to avoid the economic agents being charged double by a verification and an additional calibration of measuring instruments.

### Normung als wichtiges Regelungselement im gesetzlichen Messwesen in Europa

Die Europäische Messgeräte-Richtlinie [1] regelt im Rahmen des neuen Konzepts (New Approach) [2] das harmonisierte Inverkehrbringen von 10 Messgerätekategorien auf den europäischen Binnenmarkt. Die wesentlichen Anforderungen an die Messgeräte werden in der Richtlinie selbst verbindlich festgelegt und sollen ein hohes Schutzniveau bieten und gewährleisten.

Die technischen Spezifikationen werden in harmonisierten Normen oder normativen Dokumenten festgelegt, deren Anwendung freiwillig bleibt, und dem Hersteller steht es stets frei, andere technische Spezifikationen zu benutzen, um den Anforderungen zu entsprechen.

Bei Messgeräten, die nach harmonisierten Normen oder normativen Dokumenten hergestellt worden sind, wird davon ausgegangen, dass sie die entsprechenden wesentlichen Anforderungen der Messgeräte-Richtlinie erfüllen.

Damit das neue Konzept funktioniert, müssen die Normen gewisse Qualitätsgarantien hinsichtlich der in den Richtlinien aufgestellten wesentlichen Anforderungen bieten. Für den technischen Inhalt dieser Normen tragen die europäischen Normungsorganisationen die volle Verantwortung.

Die Suche nach technischen Lösungen bleibt im Prinzip den interessierten Parteien überlassen. Das neue Konzept sieht jedoch kein Verfahren vor, nach dem der Inhalt harmonisierter Normen oder normativer Dokumente, die ordnungsgemäß nach dem Normungsverfahren verabschiedet wurden, von staatlichen Behörden auf nationaler oder Gemeinschaftsebene geprüft und genehmigt würde.

Sowohl die europäische Normung als auch das normungspolitische Konzept der Bundesregierung [3] stützt sich auf die von der Welthandelsorganisation anerkannten Grundsätze auf dem Gebiet der Normung. Die Erarbeitung von Normen und Standards soll festgelegten Prinzipien folgen, damit sie der Gesetzgeber heranziehen kann. Wichtige Prinzipien sind die Mitarbeit aller betroffenen Kreise, das Konsensprinzip, die Transparenz, Zugänglichkeit und Widerspruchsfreiheit des Normenwerks sowie die Einbindung der Öffentlichkeit bei der Erarbeitung von Normen. Die ausgewogene Mitwirkung aller Kreise (wie Vertretern von großen, mittleren und kleinen Unternehmen der Industrie, Dienstleistern,

### Standardization as an important regulation tool of legal metrology in Europe

The European Measuring Instruments Directive [1] regulates, within the scope of the New Approach [2], the harmonized placing of 10 measuring instrument categories on the EU Single Market. The essential requirements placed on these measuring instruments are laid down bindingly in the Directive itself and are intended to provide and guarantee a high level of protection.

The technical specifications are laid down in harmonized standards or in normative documents whose application remains voluntary, and the manufacturers are always free to use other technical specifications in order to comply with the requirements.

For measuring instruments that have been manufactured in accordance with the harmonized standards or with the normative documents, it is presumed that they fulfil the respective essential requirements of the Measuring Instruments Directive.

To make the New Approach work, the standards must warrant a certain quality which is in compliance with the essential requirements laid down in the Directives. The European organizations for standardization have the complete responsibility for the technical content of these standards.

In principle, the search for technical solutions is left to the interested parties, and there is no provision in the New Approach which would stipulate that the content of harmonized standards or normative documents which have been duly adopted in accordance with the standardization procedure has to be tested and approved by public authorities at the national or at the European Community level.

Both European standardization and the standardization strategy of the German Federal Government [3] are based on the standardization principles approved by the World Trade Organization. The elaboration of standards shall follow pre-defined principles so that the legislator can refer to them. Important principles are: the collaboration of all the parties concerned; the principle of the unanimous vote; transparency; accessibility; consistency of the set of standards; and the involvement of the public in the elaboration of the standards. The balanced participation of all the circles concerned (such as, e.g., the representatives of large, medium-sized and small industrial enterprises, the representatives of the service providers, of the authorities, of the so-

Behörden, Sozialpartnern sowie des Verbraucher-, Umwelt- und Arbeitsschutzes) in den Lenkungs- und Arbeitsgremien der Normung und Standardisierung muss nicht nur formal, sondern tatsächlich ermöglicht werden. Sie ist Voraussetzung für die Legitimation, Akzeptanz und Anwendung von Normen und Standards und soll daher gefördert werden.

Durch die Beteiligung der Behörden am Normungsprozess sollte es möglich sein, sicherzustellen, dass öffentliche Belange beim Normungsauftrag angemessen berücksichtigt werden.

Als harmonisierte Normen brauchen die europäischen Normungsorganisationen nicht unbedingt neu erarbeitete Normen vorzulegen. Sie können auch auf bestehende Normen zurückgreifen, die sie nach einer Prüfung und eventuellen Überarbeitung als den Anforderungen des Normungsauftrags genügend beurteilen, oder bestehende Normen entsprechend ändern. Ferner ist es möglich, dass sie internationale oder nationale Normen zu europäischen Normen erklären und diese der Kommission als harmonisierte Normen vorlegen.

Eine harmonisierte Norm muss die wesentlichen Anforderungen der jeweiligen Richtlinie erfüllen. Eine europäische Norm kann Bestimmungen enthalten, die sich nicht nur auf wesentliche Anforderungen, sondern auch auf andere Bestimmungen beziehen. In einem solchen Fall sind diese Bestimmungen deutlich von denen zu unterscheiden, die mit den wesentlichen Anforderungen im Zusammenhang stehen.

Zudem deckt eine harmonisierte Norm nicht unbedingt alle wesentlichen Anforderungen ab. In einem solchen Fall wäre der Hersteller verpflichtet, andere einschlägige technische Spezifikationen heranzuziehen, um allen wesentlichen Anforderungen der Richtlinie gerecht zu werden.

[1] RICHTLINIE 2004/22/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 31. März 2004 über Messgeräte

[2] Blue Guide – Leitfaden für die Umsetzung der nach dem neuen Konzept und dem Gesamtkonzept verfassten Richtlinien (2000)

[3] Normungspolitisches Konzept der Bundesregierung (2009)

cial partners, of consumer protection, of environmental protection and of occupational safety) in the steering and working committees of standardization must be made possible not only formally but also in practice. This is the precondition for the legitimation, acceptance and application of standards and must therefore be supported.

By involving the authorities in the standardization process it should be possible to ensure that public interests will be adequately considered in the standardization process.

The European organizations for standardization must not necessarily submit newly elaborated standards as harmonized standards. They can also choose existing standards which – after they have these examined and, possibly, revised – they consider to be sufficient for the requirements of the standardization order, or which they can modify accordingly. Furthermore, it is possible for them to declare international or national standards as European standards and to submit them to the Commission as harmonized standards.

A harmonized standard must comply with the essential requirements of the respective Directive. A European standard can contain provisions which not only refer to the essential requirements but also to other provisions. In that case, these other provisions must be clearly distinguished from the provisions which are related to the essential requirements.

Furthermore, a harmonized standard might not necessarily cover all the essential requirements. The manufacturer would then be obliged to consult other relevant technical specifications in order to do justice to all the essential requirements laid down in the Directive.

[1] DIRECTIVE 2004/22/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL dated 31 March 2004 on measuring instruments

[2] Blue Guide – Guide to the implementation of directives based on the New Approach and the Global Approach (2000)

[3] Standardization strategy of the German Federal Government (2009)

### A Quantum of QI

Das 125-jährige Jubiläum der PTB und das 50-jährige Bestehen des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) waren zwei gute Anlässe, einen großen Workshop zum Thema Qualitätsinfrastruktur (QI) zu veranstalten. Der Einladung der PTB folgten mehr als 200 Metrologen aus 115 Ländern.

Zum Warm-up wurde die Veranstaltungshalle in eine Landkarte verwandelt und alle Teilnehmer wurden aufgefordert, sich zu ihrem Heimat-Kontinent zu begeben. Das bot nicht nur einen ersten Überblick auf die Verteilung der Teilnehmer, sondern bot auch neue Kontaktmöglichkeiten für jüngere Kooperationsmitglieder. Auch die Gruppierung nach Länge der bestehenden Kooperationen war sehr aufschlussreich. Weiter ging es im Sitzungssaal mit einem Einführungsvortrag von Abteilungsleiterin Uta Böllhoff vom BMZ und weiteren Vorträgen. In der anschließenden Podiumsdiskussion ging es um das Thema „Entwicklungskooperationen – wirtschaftliche Entwicklung“. Die sechs Teilnehmer berichteten von ihren Erfahrungen und den Rahmenbedingungen in ihren Ländern.

Während des Programms wurde auch ein Projektvertrag zum Aufbau einer „Qualitätsinfrastruktur für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz in Lateinamerika und der Karibik“ öffentlich unterzeichnet. Oscar Harasic von der Organization of American States (OAS) betonte, dass erneuerbare Energien und Energieeffizienz wichtige Zukunftsthemen in Lateinamerika und in der Karibik seien. Qualität und Qualitätssicherung spielten bei der Technologieentwicklung sowie der Einführung, Verbreitung und Förderung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz eine wichtige Rolle.

Die drei regionalen Qualitätsfachorganisationen für Metrologie Sistema Interamericano de Metrologia (SIM), Normung Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT) und für Akkreditierung InterAmerican Accreditation Cooperation (IAAC) sowie die OAS und die PTB werden in den nächsten

Die Unterzeichnenden des Vertrags Qualitätsinfrastruktur für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz in Lateinamerika und der Karibik

The signatories to the contract “Quality infrastructure for renewable energy sources and energy efficiency in Latin America and the Caribbean”

### A Quantum of QI

The 125<sup>th</sup> jubilee of the PTB and the 50<sup>th</sup> anniversary of the *Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung* (BMZ Federal Ministry of Economic Cooperation and Development) were two good reasons to host a large workshop on the subject of quality infrastructure (QI). PTB’s invitation was accepted by more than 200 metrologists from 115 countries.

As a “warm-up”, the conference hall was quickly transformed into a map and all participants were requested to gather in their home continent. This not only provided an initial overview of the distribution of the participants, it also provided potential new contacts for younger cooperation members. Also the grouping according to the cooperations’ length of time in existence was very revealing. The programme continued in the conference hall with an introductory lecture by Uta Böllhoff of the BMZ and further lectures. The subject of the podium discussion which followed was the topic “Development cooperations – economic development”. The six participants reported on their experiences and the general conditions in their countries.

Within the scope of the varied programme, a project agreement on the establishment of a “Quality infrastructure for renewable energies and energy efficiency in Latin America and the Caribbean” was also publicly signed. Oscar Harasic from the Organization of American States (OAS) underlined the fact that renewable energy sources and energy efficiency will be important issues of the future in Latin America and the Caribbean. Quality and quality assurance play an important role for technology development as well as for the introduction, dissemination and promotion of renewable energy sources and energy efficiency.

The three specialized quality organizations for metrology *Sistema Interamericano de Metrologia* (SIM),





Die PTB bekam während des Workshops „A Quantum of QI“ handschriftliche Glückwünsche aus vielen Ländern.

During the Workshop „A Quantum of QI“ PTB received handwritten greetings from many countries.

Jahren im Rahmen des unterzeichneten Projekts eng zusammenarbeiten. Erklärtes Ziel ist die Stärkung der technischen Basis zur Qualitätssicherung und damit zur erfolgreichen Umsetzung nationaler Energiepolitiken zur Förderung erneuerbarer Energien und der effizienten Energienutzung. Das Vorhaben wird sich zunächst auf Dienstleistungen der Qualitätsinfrastruktur für die Bereiche Solarthermische Anlagen, Energieeffizienz von Haushaltsgeräten sowie Smart Grids konzentrieren. Langfristig sind auch Aktivitäten in den Bereichen Windenergie und energieeffiziente Gebäude vorgesehen.

Viele der Teilnehmer nutzten die Gelegenheit, der PTB in schriftlicher Form zu gratulieren und den Veranstaltern Gedanken, Wünsche oder Ideen mitzuteilen. Anhand der vielen Grüße und Kommentare wurde die hohe Anerkennung der PTB in allen Kontinenten der Erde eindrucksvoll dokumentiert.

„A Quantum of QI“ wurde von allen Teilnehmern genutzt, um neue Kontakte zu knüpfen und bestehende zu pflegen. Dies und die fachlichen Inhalte machten den Workshop zu einer erfolgreichen Veranstaltung, bei der die Welt zu Gast bei Freunden in Braunschweig war.

for standardization *Comisión Panamericana de Normas Técnicas* (COPANT) and for accreditation *InterAmerican Accreditation Cooperation* (IAAC) as well as OAS and PTB will closely cooperate during the coming years within the scope of the signed project. The declared objective is the strengthening of the technical basis for quality assurance and thus for the successful implementation of national energy policies for the promotion of renewable energy sources and the efficient use of energy. The project will initially concentrate on quality infrastructure services in the fields of solar-thermal installations, energy efficiency of domestic appliances as well as smart grids. Long-term activities in the fields of wind energy and energy-efficient buildings are also envisaged.

Many of the participants used the opportunity to congratulate PTB and to convey to the hosts thoughts, requests or ideas in writing. As shown by the many compliments and comments, PTB is held in high esteem in all continents. „A Quantum of QI“ helped all participants to make new contacts and to cultivate existing ones. This and its scientific contents made the workshop a successful event at which guests from all over the world were welcomed in Braunschweig.

Gäste aus aller Welt beim Empfang des Präsidiums in der Braunschweiger Stadthalle



Guests from all over the world at the Presidential Board reception in the Braunschweiger Stadthalle (Braunschweig Civic Centre)



### 125 Jahre genau – die PTB feierte Geburtstag

Wer wissen will, wie man etwas wirklich genau messen kann, ist bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) genau richtig. Und das nicht erst seit heute, sondern seit 125 Jahren genau. Als am 28. März 1887 der erste Etat der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR), der Vorgängerin der PTB, bewilligt wurde, war dies die Geburtsstunde der ersten staatlichen, außeruniversitären Großforschungseinrichtung und der Beginn einer messtechnischen Erfolgsgeschichte, die noch längst nicht zu Ende erzählt ist. Aus diesem Anlass feierte die PTB, das nationale Metrologieinstitut Deutschlands, am 28. März 2012 ihren Geburtstag. Sie tat dies mit einem politischen Festakt in der Braunschweiger Stadthalle und – am Tag zuvor – mit einem wissenschaftlichen Symposium, zu dem Teilnehmer aus der ganzen Welt anreisten.

Genauigkeit ist heutzutage auf allen Ebenen gefragt, um die Entwicklungen in die gewünschten Richtungen zu treiben: ob im industriellen Fertigungsprozess oder für die diagnostischen Methoden der Medizin, ob in der chemischen Analytik oder in der wissenschaftlichen Grundlagenforschung. Die Metrologie, die Wissenschaft des genauen Messens, ist auf all diesen Ebenen und Disziplinen und weit darüber hinaus gefragt. Das wissenschaftliche Symposium „Metrology, the Universe and Everything“ (der Titel lehnte sich augenzwinkernd an Douglas Adams' Buch „Per Anhalter durch die Galaxis“ an) beleuchtete schlaglichtartig dieses weite Aufgabenfeld am 27. März in der Braunschweiger Stadthalle in mehreren Übersichtsvorträgen, ohne dabei den Anspruch zu erheben, letzte Antworten auf allererste Fragen zu

Oben: Tag der offenen Tür in der PTB Braunschweig mit abschließendem Höhenfeuerwerk/“Open Day” at PTB Braunschweig concluding with an aerial firework display

Treffen der PTB-Präsidenten: Prof. Dr. Ernst O. Göbel (PTB-Präsident 1995 – 2011), Prof. Dr. Joachim Ullrich (PTB-Präsident seit 2012), Prof. Dr. Dieter Kind (PTB-Präsident 1975 – 1995)/Meeting of the PTB presidents: Prof. Dr. Ernst O. Göbel (PTB President 1995–2011), Prof. Dr. Joachim Ullrich (PTB President since 2012) and Prof. Dr. Dieter Kind (PTB President 1975–1995)

### 125 years precisely – PTB celebrated its birthday

If you want to know how to measure truly accurately, the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) is precisely the place to be. And this is not just the case nowadays, but rather it has been so for precisely 125 years. When the first budget of the Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR), the predecessor of PTB, was approved on 28 March 1887, this was the birth of the first state-run, non-university, major research institution and the beginning of a metrological success story that hasn't ended yet by a long shot. On this occasion, PTB, the National Metrology Institute of Germany (NMI) celebrated its birthday on 28 March 2012. PTB was celebrating with a political ceremonial act at the Braunschweiger Stadthalle (Braunschweig Civic Centre) and – on the day before – with a scientific symposium which people from all over the world were attending.



Nowadays, accuracy is in demand at all levels to push developments in the right directions: whether in industrial processing or for the diagnostic methods of medicine, whether in chemical analysis or in fundamental scientific research. Metrology, the science of accurate measurement, is in demand at all these levels and in all these disciplines, and far beyond. The scientific symposium “Metrology, the Universe and Everything” (the title is based – in a tongue and cheek manner – on Douglas Adams' book “The Hitchhiker's Guide to the Galaxy”) highlighted this broad field of tasks on 27 March in the Braunschweiger Stadthalle (Braunschweig Civic Centre) in several survey lectures, without claiming to have the final answers to the very first questions.



geben. Das Symposium spannte einen inhaltlichen Bogen von der wachsenden Bedeutung der Naturkonstanten für die Definition der physikalischen Basiseinheiten bis hin zu konkreten Anwendungen der Metrologie in unserer Alltagswelt. Zum Abschluss des Symposiums wurde der bedeutendste Preis der Metrologie, der Helmholtz-Preis, verliehen.

As regards content, the symposium spanned an arc, from the growing importance of the fundamental constants for the definition of the physical base units to the concrete metrological applications in our everyday world. At the conclusion of the symposium, the most important prize in metrology, the Helmholtz Prize, was awarded.

Weniger um wissenschaftliche Genauigkeit, sondern vielleicht eher um genaue wissenschaftspolitische Einordnungen ging es dagegen beim eigentlichen Jubiläums-Festakt am 28. März (ebenfalls in der Braunschweiger Stadthalle). Nach der Eröffnung des Festaktes durch Prof. Dr. Joachim Ullrich (PTB-Präsident seit Beginn dieses Jahres) standen mehrere Grußworte führender Politiker aus Bund, Land und Stadt dabei auf der Agenda. Den Festvortrag hielt der Physik-Nobelpreisträger Prof. Dr. Klaus von Klitzing, der der PTB seit seiner Entdeckung des Quanten-Hall-Effektes eng verbunden ist und der die stellvertretende Präsidentschaft im PTB-Kuratorium innehat. Einen wissenschaftsgeschichtlichen Kurzvortrag über 125 Jahre PTR/PTB hielt Prof. Dr. Ernst O. Göbel (Präsident der PTB von 1995 bis 2011).



The actual anniversary ceremonial act on 28 March was less a matter of scientific accuracy, but perhaps more a matter of accurate scientific-political classifications. Following the welcome address by Prof. Dr. Joachim Ullrich (PTB President since the beginning of this year), several speeches were given

by leading politicians from the federal government, the federal state and the city are on the agenda. The commemorative lecture was given by the winner of the Nobel Prize in Physics, Prof. Dr. Klaus von Klitzing, who has been closely connected to PTB since his discovery of the quantum Hall effect and who holds the office of vice-president of the PTB Kuratorium (Advisory Board). A short scientific historic lecture on 125 years of PTR/PTB was given by Prof. Dr. Ernst O. Göbel (President of PTB from 1995 to 2011).

### Wiedereinweihung des renovierten Observatoriums

Anlässlich des 125-jährigen Jubiläums feierte die PTB auch die Wiedereinweihung ihres ältesten Gebäudes, des Observatoriums, das im Jahr 1891 fertiggestellt worden war. Werner von Siemens initiierte und finanzierte damals die Planung und erste Bauausführungen, noch bevor der Etat zur

### Rededication of the renovated Observatory

On the occasion of its 125<sup>th</sup> anniversary, PTB also celebrated the rededication of its oldest building, the Observatory, which dates back to 1891. At that time, Werner von Siemens had financed its planning and the initial construction work even before the budget for the founding of the PTR was approved by the Imperial Diet. Hermann von Helmholtz exerted lasting influence on the design of the building, so that it can



Oben: Festvortrag von Prof. Dr. Klaus von Klitzing beim Festakt in der Braunschweiger Stadthalle/Commemorative lecture by Prof. Dr. Klaus von Klitzing at the ceremonial in the Braunschweig City Centre

Empfang beim Oberbürgermeister, Dr. Gert Hoffmann, in der Braunschweiger Dornse/Reception held by the Lord Mayor of Braunschweig, Dr. Gert Hoffmann, at the Braunschweig Dornse



Gründung der PTR durch den Reichstag bewilligt wurde. Hermann von Helmholtz nahm nachhaltigen Einfluss auf die Ausgestaltung des Gebäudes, sodass dieses als weltweit erstes, spezifisch für ideale Laborbedingungen entworfene Gebäude gelten kann. Die Geschichte des Observatoriums steht mit Aufbruch, Zerstörung, Instandsetzung und denkmalgerechter Renovierung exemplarisch für das Schicksal des verbliebenen historischen Gebäudebestands in Berlin. Am 17. Oktober 2012, also genau 125 Jahre nach Aufnahme der Arbeit der Technischen Abteilung der PTR in Räumen des Hauptgebäudes der heutigen TU Berlin, fand die feierliche Einweihung statt. Ruprecht von Siemens, Urenkel von Werner von Siemens, fuhr die Ehrengäste im Original-Siemens-Oldtimer vor das Portal, wo der traditionelle Durchschnitt des – in diesem Fall – blauen Bandes stattfand. Jetzt erstrahlt das Observatorium im neuen Glanz und wird wieder als markantes Schmuckstück wahrgenommen. Es beherbergt Laboratorien der medizin-metrologischen Fachbereiche: Das 3T-Magnetresonanz-Tomografie-System im ehemaligen Quarzuhrenkeller (hier wurden von Scheibe et al. die ersten Quarzuhren entwickelt) und die experimentelle Infrastruktur zur biomedizinischen Optik bilden die Basis für das Leitmotiv der Abteilung 8: „Von der qualitativen zur quantitativen medizinischen Bildgebung.“

Oben: Das Observatorium im frisch erstrahlenden Glanz/The Observatory in freshly shining splendour

Mitte; Ruprecht von Siemens fährt die Ehrengäste im Siemens Oldtimer vor das Portal/R. von Siemens drives the guests of honour to the entrance portal in the Siemens vintage car

be considered as the first building worldwide that has been designed specifically for ideal laboratory conditions.

The history of the Observatory is associated with destruction, new beginnings, restoration and proper monument renovation, which is exemplary for the fate of the remaining historical buildings in existence in Berlin.

On 17 October 2012, thus exactly 125 years after the Technical Department of the PTR took up its work in rooms of the main building of today's TU Berlin, the ceremonial rededication was held. Ruprecht von Siemens, the great-grandson of Werner von Siemens, drove the guests of honour in an original Siemens vintage car up to the entrance portal, where the traditional cutting of the – in this case blue – ribbon took place.



Now the Observatory shines in its new splendour and is again appreciated as a prominent gem. It accommodates laboratories of the medical-metrological departments: the 3T magnetic resonance tomography system in the former quartz clock basement (the first quartz clocks

were developed here by Scheibe et al.) and the experimental infrastructure for biomedical optics form the basis for the leitmotif of Division 8: "From qualitative to quantitative medical imaging."



Nach dem Banddurchschnitt: Prof. Dr. J. Ullrich (m) mit Dr. S. Halldorn (r), BMWi, Abt. VII „Technologiepolitik“, und Staatssekretär N. Zimmer (l), SenWTF, Berlin.

After the ribbon-cutting: Prof. Dr. J. Ullrich (centre) with Dr. S. Halldorn (right), BMWi, Division VII „Technology Politics“, and State Secretary N. Zimmer (left), SenWTF, Berlin.

**Promotionen 2012 • Doctorates in 2012**

Makram Zebian (FB 1.6)	Calibration of distortion product otoacoustic emission probes
Muhammad Abid (FB 1.7)	Thermophysical properties of a moist porous material
Monthol Homklintian (FB 2.1)	Frequency dependence of primary capacitance standard in audio frequency range
Ricardo Iuzzolino (FB 2.6)	Josephson waveforms characterization of a sigma-delta analog-to-digital converter for data acquisition in metrology
Fatemeh Yaghobian (FB 3.1)	ID-SERS based quantification of biomarkers on a single chip
Javis Nwaboh (FB 3.2)	Absolute laser spectrometric amount fraction measurements
Oscar Andrey Herrera-Sancho (FB 4.4)	Laser excitation of 8-eV electronic states in Th <sup>+</sup> : A first pillar of the electronic bridge toward excitation of the Th-229 nucleus
Xiaomei Chen (FB 5.1)	Atomic Force Microscope (AFM) cantilevers as encoder for real-time displacement measurements
Peter Sievers (FB 6.3)	Time-resolved and position-resolved X-ray spectrometry with a pixelated detector
Jeannine Beck (FB 6.4)	Messung von W-Werten für Protonen, <sup>4</sup> He- und <sup>12</sup> C-Ionen in Luft, Argon und Stickstoff
Beatrix Pollakowski (FB 7.2)	Entwicklung und Validierung der Methode GIXRF-NEXAFS zur Analyse von tief vergrabenen Nanoschichtsystemen
Sascha Eichstädt (FB 8.4)	Analysis of dynamic measurements: evaluation of dynamic measurement uncertainty

**Habilitationen 2012 • Habilitations in 2012**

Florian Thiel (FB 8.5) -	Evaluation elektromagnetischer Breitband-Sensoren für biomedizinische Anwendungen
--------------------------	---

# Zahlen und Fakten • Figures and facts

## Personal: Entwicklung • Staff: development

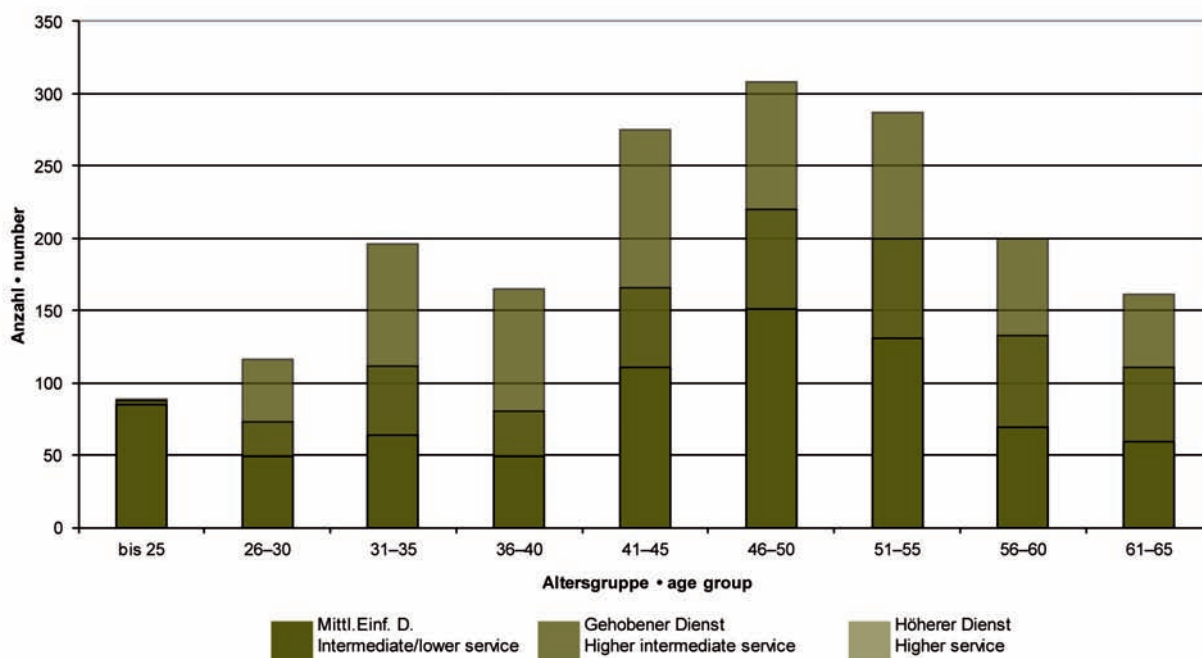
Personelle Entwicklung von 2003 bis 2012 (Stand: 31. Dezember 2012) • Development of staff  
 a) unbefristet • unlimited in time b) zeitlich befristet • limited in time

Beschäftigungsverhältnis	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
a)										
Beamte • civil servants	506	508	510	515	523	517	513	537	535	550
Angestellte • employees	744	727	692	863	833	830	831	795	779	752
Arbeiter • workers	207	193	196	--*	--	--	--	--	--	--
gesamt • total	1457	1428	1398	1378	1356	1347	1344	1332	1314	1302

b)										
Auszubildende • trainees	144	158	159	150	136	134	135	134	131	135
befristet Beschäftigte • temporary staff	52	61	69	66	98	110	175	230	264	209
Drittmittelpersonal • staff members financed by third parties	122	105	109	169	162	172	185	194	216	286
Mitarbeiter gesamt • staff member total	1775	1752	1735	1763	1752	1763	1839	1890	1925	1932

\* 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)

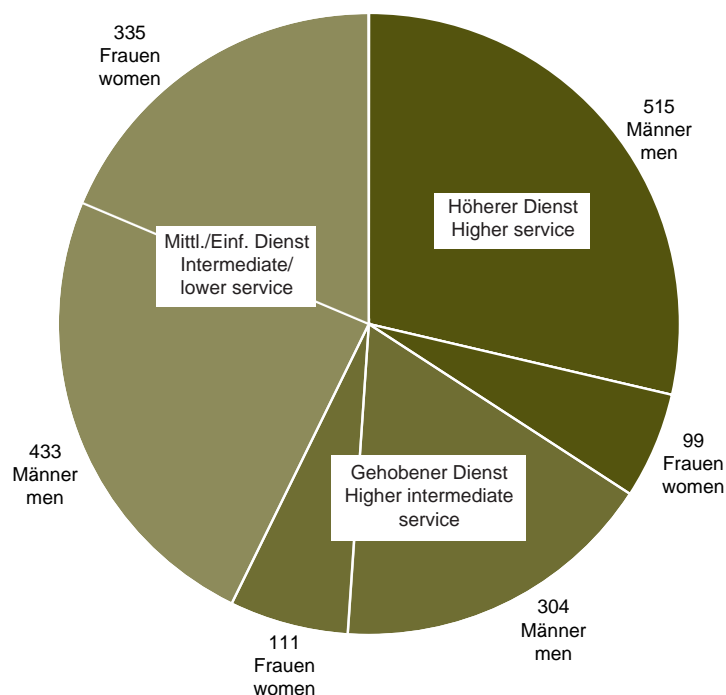
**Ausbildung • Training (31. Dezember 2012)**

	BS	Berlin	
Duales Studium Elektrotechnik im Praxisverbund	10 (2)	--	Dual studies in electrical engineering in a practice union
IT-Systemelektroniker	16 (6)	--	information and telecommunication technologists
Elektroniker/in für Geräte und Systeme	29 (9)	--	electronics technician for devices and systems
Physiklaboranten	19 (5)	--	laboratory technicians, physics
Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik	13 (3)	--	electronics engineer for electrical and building services engineering
Feinwerkmechaniker Fachrichtung Feinmechanik	16 (4)	3 (2)	precision instrument maker speciality: precision mechanics
Fotografen	4 (2)	--	photographers
Mediengestalter	3 (1)	--	media designer
Tischler	--	5 (2)	joiners
Systeminformatiker	--	7 (0)	IT systems technicians
Fachangestellte für Bürokommunikation	--	1 (0)	specialists in office communications
Verwaltungsfachangestellte	--	9 (3)	public administration employee
gesamt	110 (32)	25 (7)	total

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

The PTB is among the most important institutions in the region of Braunschweig which provide training. 135 trainees are at present employed by PTB. The figures in parentheses indicate fresh engagements in the year under review.

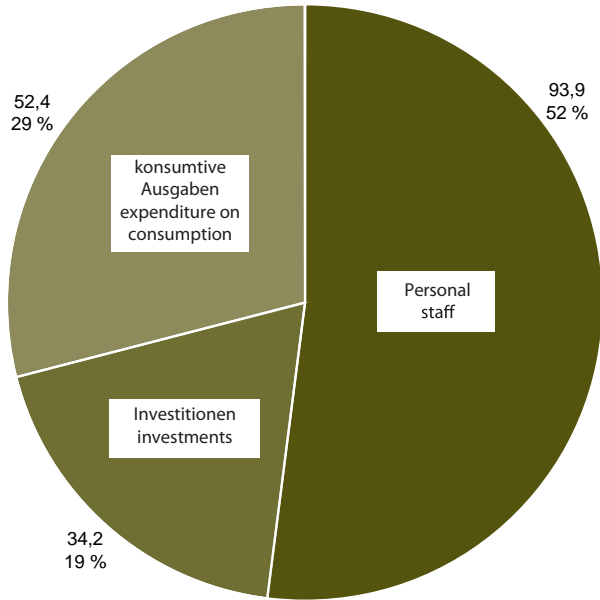
**Personal: Laufbahn Staff • civil service career**



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: Ausgabenverteilung • Budget: break-down of expenditure



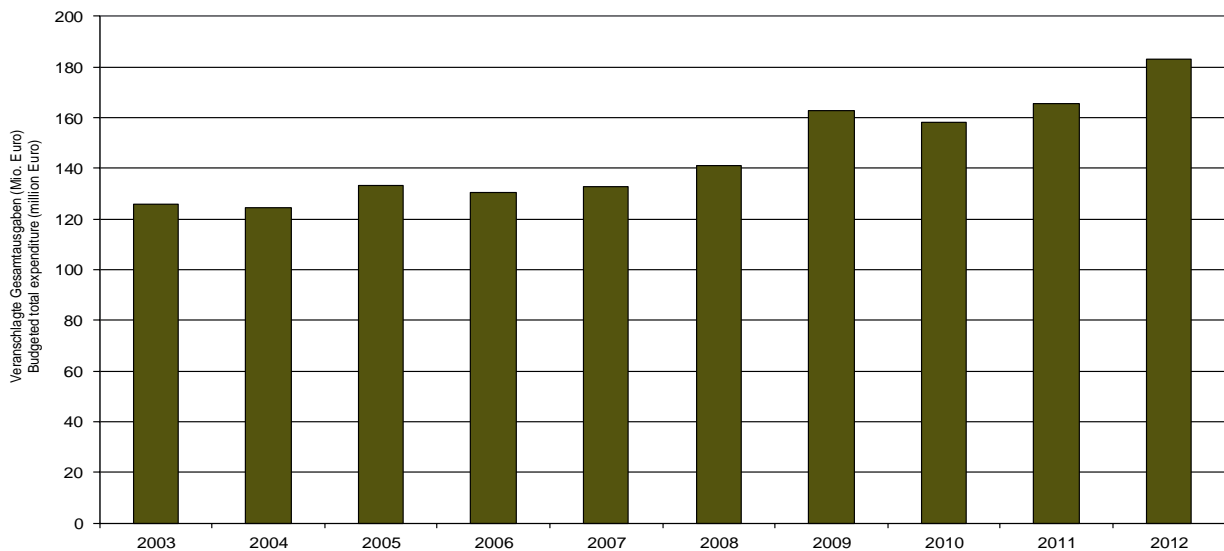
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. Euro). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

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	2010	2011	2012	budgetary means
Personalausgaben	88,9	90,8	93,9	staff costs
Investitionen (Bau und Geräte) -	32,6	38,5	34,2	investments (building activities and instruments)
Zuweisungen und Zuschüsse -	1,8	2,2	2,6	allocations and grants
konsumtive Ausgaben -	35,0	34,3	52,4	expenditure on consumption
gesamt	158,3	165,8	183,1	total

Haushalt: Entwicklung • Budget: development



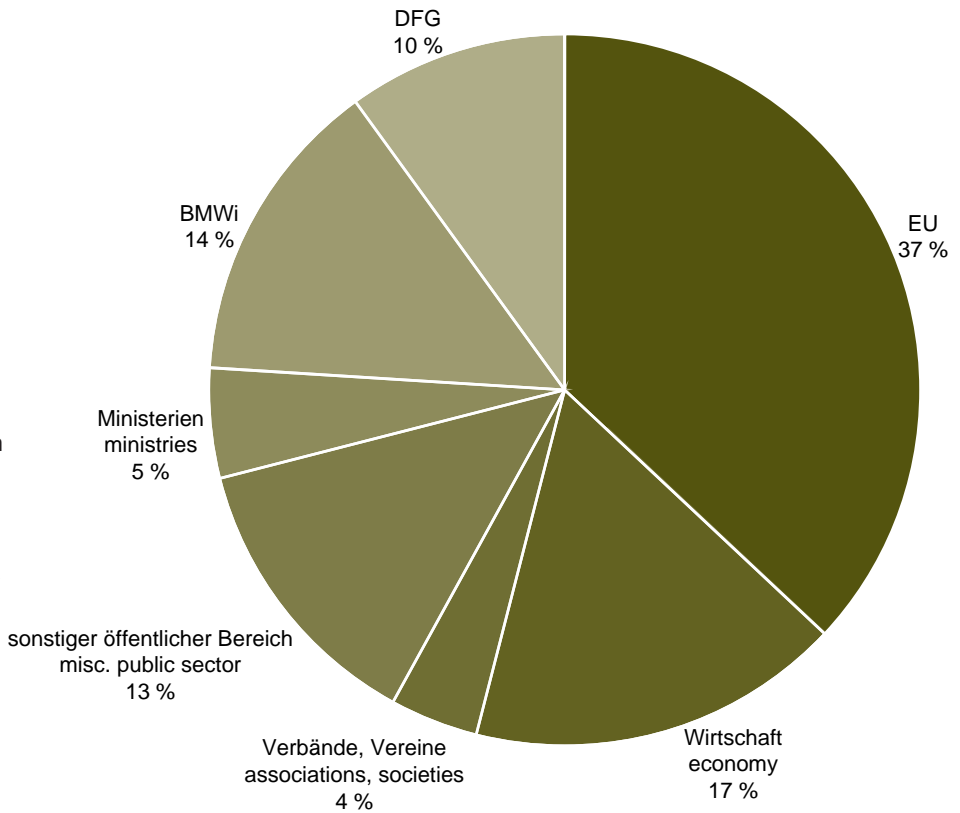
Entwicklung der Gesamtausgaben im PTB-Haushalt in den letzten zehn Jahren  
Development of the total expenditure of the PTB budget in the past ten years

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

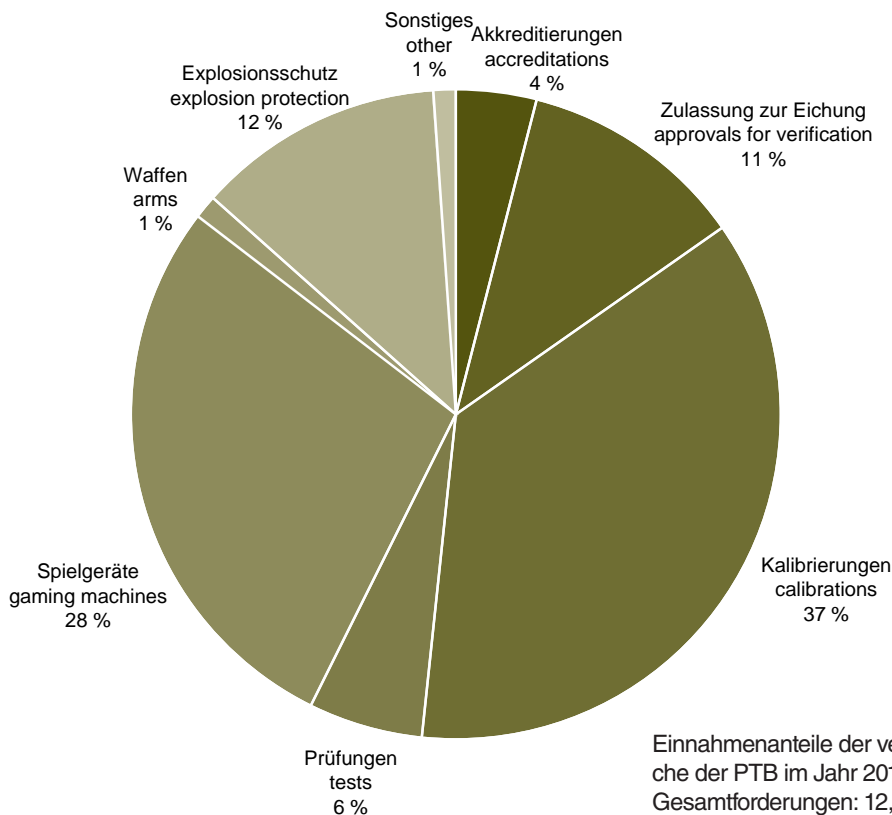
Die Drittmittel für Forschungsvorhaben summieren sich 2012 auf 15,4 Mio. Euro. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Insgesamt wurden im Berichtsjahr 25,7 Mio. Euro für 615 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) verwendet (davon 4,1 Mio. Euro für 87 Projekte in Berlin).

In 2012, the third-party funds for research projects added up to a total of 15.4 million Euro. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources.

In the year under review, a total of 25.7 million Euro were used for 615 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 4.1 million Euro of these for 87 projects in Berlin.



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



Einnahmenanteile der verschiedenen Dienstleistungsbereiche der PTB im Jahr 2012. Gesamtforderungen: 12,66 Millionen Euro.

Income distribution of 2012 among the various service sectors of PTB. Total receivables: 12.66 million euro.



### Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures

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

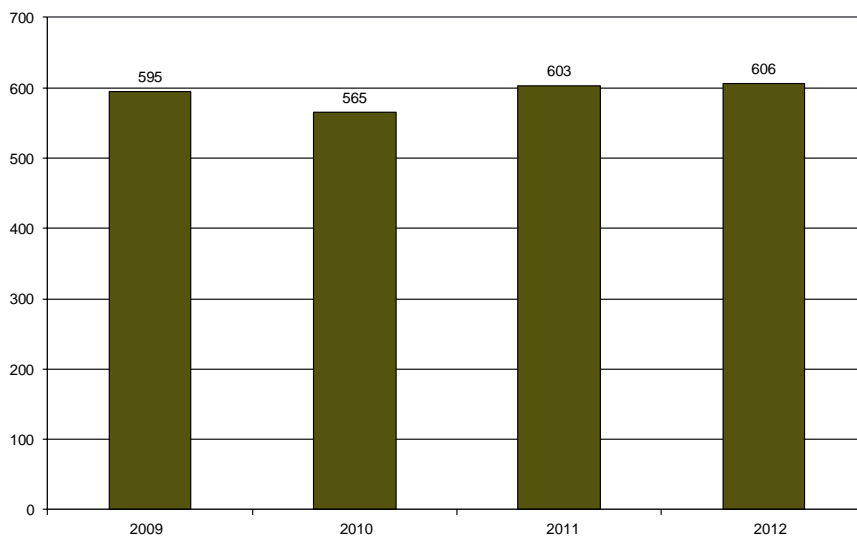
... in Braunschweig		2010	2011	2012	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	26 700	27 100	28 200	electrical energy
Wärme	MWh	24 100	24 700	25 700	heat
Gas	m <sup>3</sup>	31 300	32 300	29 900	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	78 900	80 400	90 800	water
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	54	84	82	refuse-like
recycelt	t	273	227	223	recycled
zur Beseitigung	t	190	21	19	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	104 600	80 300	66 900	waste disposal costs (approx.)

... in Berlin		2010	2011	2012	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	8050	8100	8050	electrical energy
Gas	m <sup>3</sup>	21 400	18 900	17 000	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	32 400	32 700	28 900	water
Helium, flüssig	l	48 600	49 800	47 600	helium, liquid
Stickstoff, flüssig	l	48 950	43 800	39 500	nitrogen, liquid
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	58	46	47	refuse-like
recycelt	t	31	51	70	recycled
zur Beseitigung	t	3	6	2	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	13 900	15 700	16 100	waste disposal costs (approx.)

**PTB-Seminare im Jahr 2012 • PTB-Seminars in 2012 -**

266. PTB-Seminar (20.–21. März 2012)  
 Berechnung der Messunsicherheit – Empfehlungen  
 für die Praxis

267. PTB-Seminar (9. Mai 2012)  
 Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im  
 Nieder- und Hochfrequenzbereich



**Veröffentlichungen • Publications**

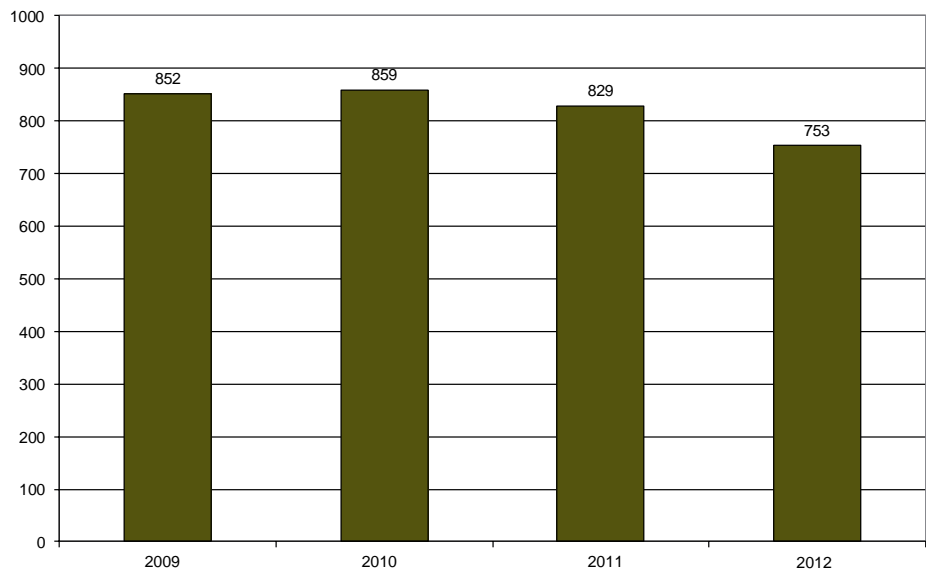
Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 2009 bis 2012 (vgl. Datenbank „PTB-Publica“ im Internet)

Number of publications by PTB staff members (in scientific journals, books, conference digests, etc.) between 2009 and 2012 (cf. database “PTB-Publica” on the web)

**Vorträge • Lectures**

Anzahl der auswärtigen Vorträge, die PTB-Mitarbeiter/innen in den Jahren 2009 bis 2012 gehalten haben

Number of lectures held by PTB staff members outside PTB between 2009 and 2012



Projektpartner der PTB

PTB's project partners



Internationale Zusammenarbeit

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

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

Volumen 2012

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung	14,40 Mio €
Europäische Union	7,95 Mio €
<b>Gesamt</b>	<b>22,35 Mio €</b>

International Cooperation

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

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

Funding volume 2012

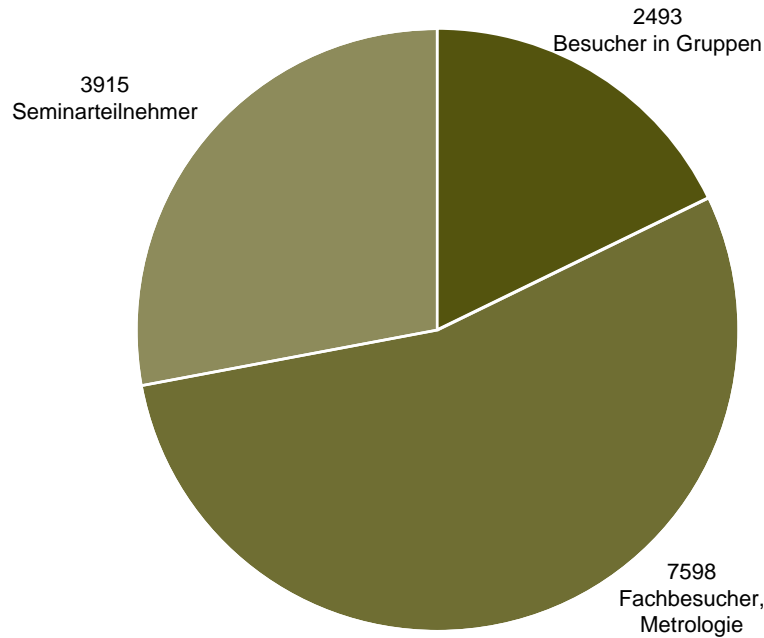
Federal Ministry for Economic Cooperation and Development	14.40 million €
European Union	7.95 million €
<b>Total</b>	<b>22.35 million €</b>

## Gastwissenschaftler, Gäste und Besucher

Im letzten Jahr kamen rund 14 000 Besucher aus aller Welt in die PTB (Standort Braunschweig). Den größten Anteil bildeten die metrologischen Fachbesucher aus Wissenschaft und Wirtschaft (7598) sowie die Teilnehmer an unterschiedlichsten Seminaren, Tagungen und Kolloquien (3915). Auch der allgemeine Besucherdienst der PTB im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit fand wie gewohnt regen Zuspruch (59 Besuchergruppen). Hinzu kamen zahlreiche Grundschulklassen, die im WissensForscher-Labor der PTB physikalische Experimente selbst durchführten. Insgesamt fanden so rund 2500 „Besucher in Gruppen“ den Weg in die PTB. Zusätzlich nutzten 10 000 Besucher die Möglichkeit, sich am Tag der offenen Tür am 14. Juli 2012 anlässlich des 125-jährigen Jubiläums über die PTB vor Ort zu informieren.

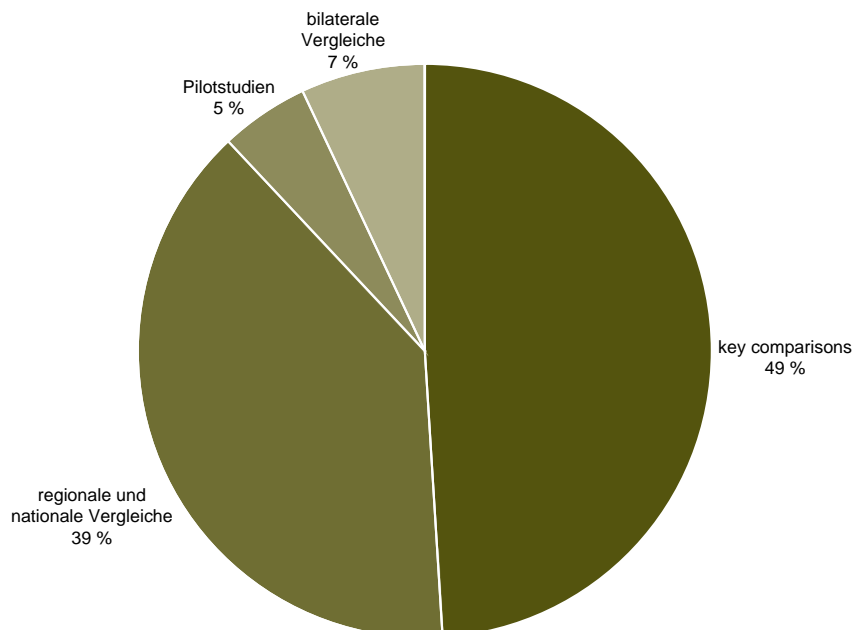
## Guest scientists, guests and visitors

Last year, approx. 14,000 people from all over the world visited PTB (Braunschweig site). They were largely metrology specialists from science and the economy (7598) as well as participants in various seminars, conferences and colloquia (3915). Visits to PTB by the general public within the scope of public relations work were also very popular as usual (59 groups of visitors). Furthermore, numerous primary school classes came and conducted their own physics experiments in the PTB “WissensForscher” (KnowledgeSearchers) laboratory. Thus, altogether, approx. 2,500 “visitors in groups” found their way to PTB. In addition, 10,000 visitors took advantage of the opportunity on PTB’s Open Day, 14 July 2012, on the occasion of its 125<sup>th</sup> anniversary, to learn about PTB.



## Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements -

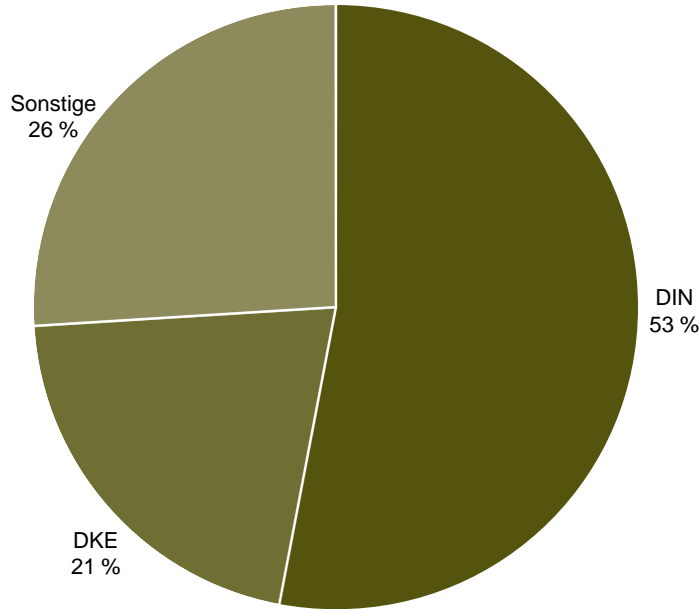
Die PTB nahm im Berichtsjahr an 41 Vergleichsmessungen teil, und zwar an 20 Schlüsselvergleichen, 16 regionalen/nationalen Vergleichen, 2 Pilotstudien und 3 bilateralen Vergleichen. 24 % der Vergleichsmessungen waren von direkter Relevanz für die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB im Rahmen des CIPM-MRA. An 9 Vergleichsmessungen nahm die PTB als Pilotlabor teil.



In the year under report, PTB took part in 41 comparable measurements, namely 20 key comparisons, 16 regional/national comparisons, 2 pilot studies and 3 bilateral comparisons. 24 % 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 9 comparable measurements as a pilot lab.

Nationale Normungsvorhaben • National standardization projects

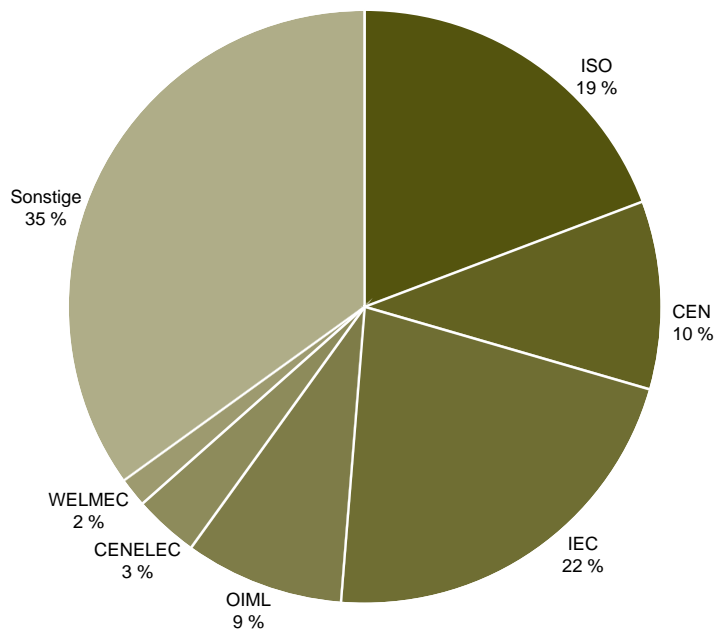
Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei nationalen Normungsvorhaben. Innerhalb des Deutschen Instituts für Normung e. V. (DIN) war die PTB an 159 Normenvorhaben beteiligt, bei der Deutschen Elektrotechnischen Kommission (DKE) bei 63 Vorhaben.



Break-up of the PTB's committee work for national standardization projects (in percent). PTB cooperated in 159 projects of the Deutsches Institut für Normung (DIN) and in 63 projects of the Deutsche Elektrotechnische Kommission (DKE).

Internationale Normungsvorhaben • International standardization projects -

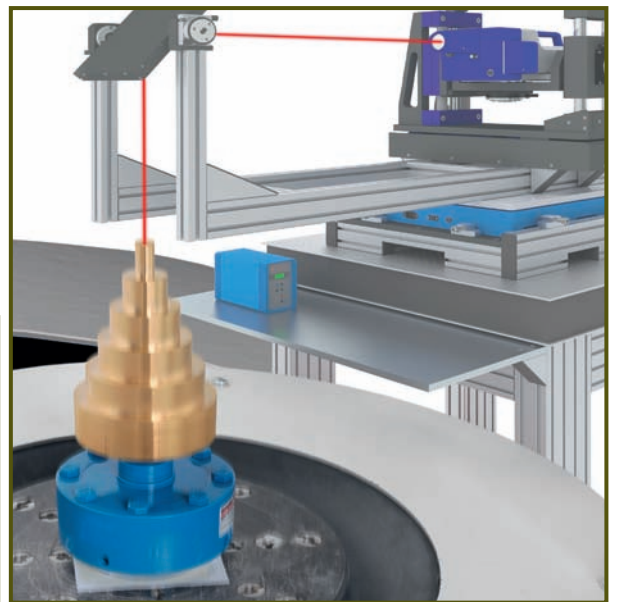
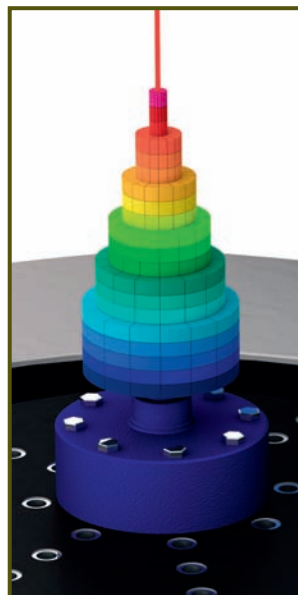
Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei internationalen Normungsvorhaben. (312 Vorhaben im letzten Jahr)  
 ISO: Internationale Organisation für Standardisierung; CEN: Europäisches Komitee für Normung; IEC: Internationale Elektrotechnische Kommission; OIML: Internationale Organisation für 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. (312 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.

# Abteilung 1

## Mechanik und Akustik



## 1. Mechanik und Akustik

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

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

### 1.1 Masse und abgeleitete Größen

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

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

Aktueller Schwerpunkt der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* ist die Diskussion um die Neudefinition des Kilogramms mit allen daraus resultierenden Forschungs- und Gremienaktivitäten. So nimmt die Arbeitsgruppe *Masse* mit vierzehn weiteren Partnern aus dreizehn Ländern an dem im Juni 2012 gestarteten europäischen Forschungsprojekt „Developing a practical means of disseminating the new kilogram“ (Kurzbezeichnung „NewKILO“) teil, das im Rahmen des Calls „SI Broader Scope“ vom „European Metrology Research Programme“ (EMRP) finanziell gefördert wird. Da die geplante Neudefinition des Kilogramms mit Avogadro- und Wattwaagenexperimenten unter Vakuumbedingungen

realisiert werden soll, ist es das Ziel des Projektes, praktische Verfahren zu entwickeln, mit denen nationale Metrologieinstitute zukünftig ihre in Luft verwendeten Sekundärnormale mit genügend kleiner Messunsicherheit an die im Vakuum aufbewahrten primären Massenormale anschließen können. Die Arbeitsgruppe *Masse* arbeitete im Rahmen des TC 9/SC 3 „Gewichtstücke“ auch an einer Umfrage sowie an einer Stellungnahme der OIML zur geplanten Revision des Internationalen Einheitensystems (SI), insbesondere auch der Neudefinition des Kilogramms, mit. Die OIML-Stellungnahme wurde bei der 47. Sitzung des Internationalen Komitees für das gesetzliche Messwesen (CIMO) im Oktober 2012 verabschiedet.

Auch die Arbeitsgruppe *Waagen* war in diesem Jahr wieder in der europäischen und internationalen Gremienarbeit sehr aktiv. So wurde im Januar 2012 der WELMEC-Leitfaden 8.8 über die modulare Bewertung von Messgeräten ratifiziert, der u. a. die Bedingungen für ein freiwilliges, modulares Bewertungssystem zur Konformitätsbewertung von nichtselbsttätigen Waagen und Messgeräten nach MID beschreibt, einschließlich der Pflichten aller beteiligten Akteure. Weiterhin wurden von der PTB die sich aus dem New Legislative Framework (NLF) ergebenden Aspekte im Kreis der europäischen benannten Stellen (NoBoMet, WELMEC) sowie im Kreis der Waagenhersteller (CECIP, VDMA) vorgestellt und erläutert. Die von den Beteiligten gewünschte Abstimmung einer harmonisierten Umsetzung der europäischen Anforderungen wird von der PTB aktiv unterstützt.

Nicht zuletzt konnte bei der diesjährigen CIMO-Sitzung im Oktober 2012 mit der Verabschiedung einer Ergänzung zum OIML-Dokument B 10 „Framework for a Mutual Acceptance Arrangement on OIML Type Evaluations“ nach jahrelangen Verhandlungen durchgesetzt werden, dass Hersteller-Prüfergebnisse unter bestimmten, klar definierten Bedingungen auch im Rahmen des OIML Mutual Acceptance Arrangements (MAA) international anerkannt werden. Dies wird es einer „OIML Issuing Authority“, wie beispielsweise der PTB, zukünftig ermöglichen, unter bestimmten Voraussetzungen ein Prüflabor eines interessierten Herstellers als „OIML-MAA-Prüflabor“ zusätzlich zum eigenen Prüflabor zu benennen. OIML-MAA-Zertifikate kann die PTB zurzeit nur für nichtselbsttätige Waagen (OIML R 76) und Wägezellen (OIML R 60) ausstellen.

Titelbild:

Laser-Doppler-Anemometrie zur Sensorkalibrierung im Windkanalströmungsfeld

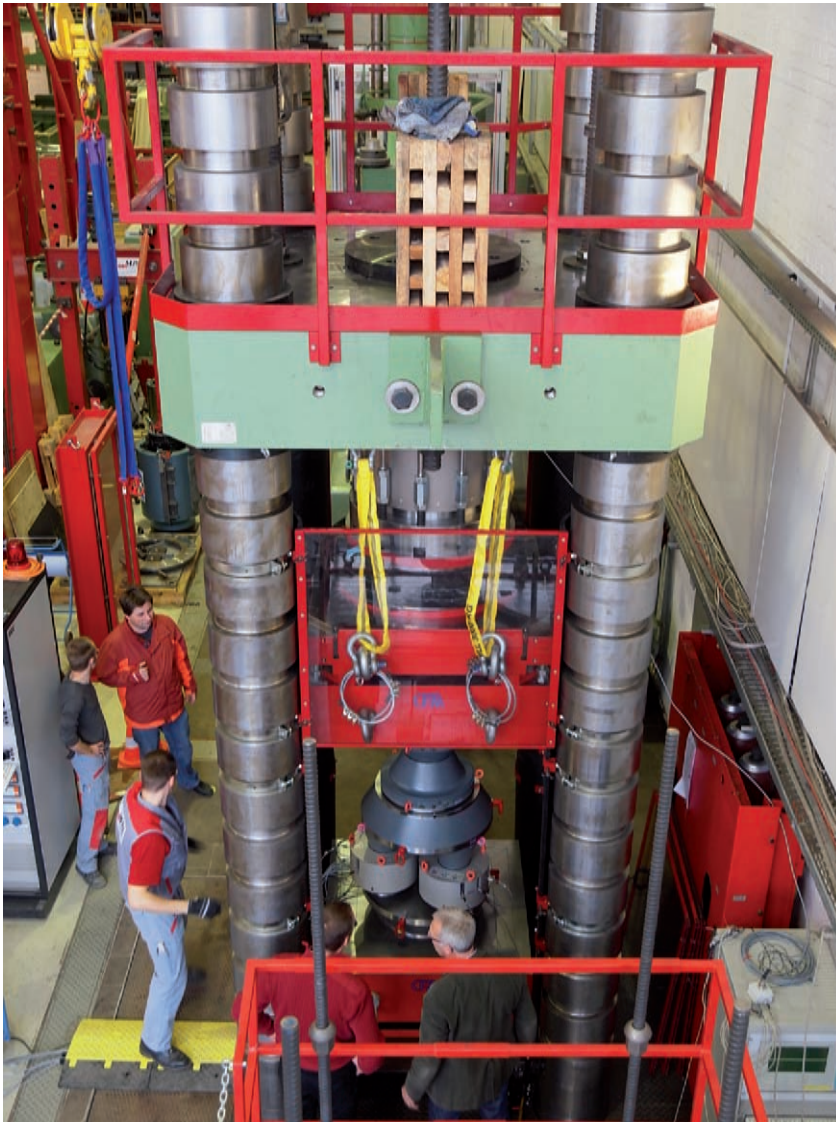


Bild 1: Belastungstest des neuen 30-MN-Build-Up-Systems in der 30-MN-Prüfeinrichtung der Materialprüfanstalt Braunschweig

Im Fachbereich 1.2 *Festkörpermechanik* werden u. a. mit Kraft-Normalmesseinrichtungen (K-NME) Kräfte von 0,5 N bis 16,5 MN und mit Drehmoment-Normalmesseinrichtungen (Dm-NME) Drehmomente von 1 mN · m bis 1,1 MN · m realisiert. In der Arbeitsgruppe *Darstellung Kraft* wurden die TransfERNormale um ein neues 30-MN-Build-Up-System erweitert, mit dem zukünftig Kraft-Messeinrichtungen bis 30 MN an die 16,5-MN-K-NME angeschlossen werden können. Das aus drei 10-MN-Kraftaufnehmern bestehende System hat in der 30-MN-Prüfeinrichtung der Materialprüfanstalt Braunschweig erfolgreich den Überlasttest bestanden (Bild 1) und wird zur Zeit in der 16,5-MN-K-NME der PTB eingehend messtechnisch untersucht.

Die Arbeitsgruppe *Drehmoment* befasst sich u. a. mit dem Einfluss von Störkomponenten auf Drehmomentmessungen, wie sie z. B. bei der messtechnischen Rückführung für Schraubwerkzeuge wie Schraubendreher und Drehmomentschlüssel zu berücksichtigen sind. Bereits über 20 Laboratorien

sind auf diesem Gebiet akkreditiert. Um die verschiedenen Einflüsse und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bewerten zu können, war im Fachausschuss Drehmoment des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) im Jahr 2011 ein Ringvergleich auf der Basis der ISO-Norm 6789 vereinbart worden. Eine Zwischenauswertung ergab eine gute bis sehr gute Übereinstimmung der beteiligten Kalibrierlaboratorien mit den Bezugswerten der PTB. Der Ringvergleich soll im Frühjahr 2013 abgeschlossen werden. Darüber hinaus wurde eine Drehmomentschlüssel-Kalibriereinrichtung mit einem Messbereich von 10 N · m bis 1000 N · m beschafft, die es zukünftig ermöglichen wird, entsprechend akkreditierte Laboratorien vor Ort in der PTB zu begutachten.

Nach aufwendiger Planung befindet sich weiterhin eine neuartige Einrichtung zur gleichzeitigen Erzeugung und Messung von Längskräften und Drehmomenten („Mehrkomponenteneinrichtung“) kurz vor der Fertigstellung. Mit dieser in die 1-MN-K-NME eingebauten Einrichtung sollen zunächst



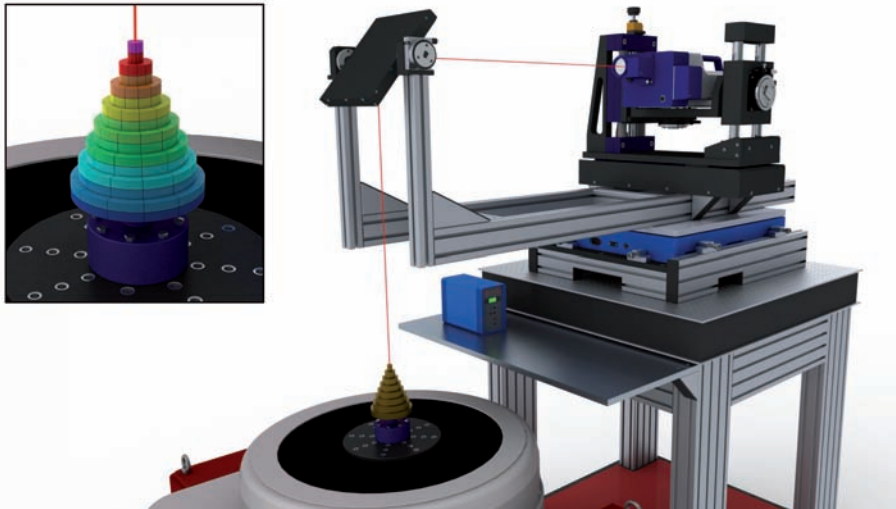


Bild 2: Messeinrichtung mit Scanningvibrometer für dynamische Kräfte

Grundlagenuntersuchungen durchgeführt und später die Möglichkeit zur Kalibrierung sogenannter Mehrkomponenten-Sensoren geschaffen werden.

Besonderer Arbeitsschwerpunkt der Arbeitsgruppe *Periodische Kräfte* ist die messtechnische Rückführung von dynamischen Kräften. Für rückführbare Messungen mit sinusförmigen Kräften im Frequenzbereich von 40 Hz bis 2000 Hz wird eine Messeinrichtung, bestehend aus einem Schwingerregersystem und einem Scanningvibrometer, eingesetzt, um die auftretenden Beschleunigungsverteilungen zu messen (Bild 2).

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeitsgruppe 1.23 ist seit September 2011 das im Rahmen des EMRP finanziell geförderte Forschungsprojekt IND09 „Rückführbare dynamische Messung von mechanischen Größen“, das von der Arbeitsgruppe 1.71 *Darstellung Beschleunigung* koordiniert wird. Beteiligt sind neun führende europäische Metrologieinstitute, verschiedene europäische Hersteller sowie industrielle Anwender. Ziel ist es, die dynamischen Einflüsse der gesamten Messkette vom Kraftaufnehmer über die Signalverarbeitung bis zur Anzeige zu untersuchen und zu verstehen, um sie letztlich für periodisch veränderliche (sinusförmige) und stoßförmige Kräfte kalibrieren zu können.

Darüber hinaus wird in der Arbeitsgruppe 1.73 *Stoßdynamik* an der dynamischen Kalibrierung von Drehmomentenaufnehmern gearbeitet. Hier wurden im vergangenen Jahr wesentliche Arbeiten zur messtechnischen Bestimmung der Parameter Massenträgheitsmoment und Torsionssteifigkeit erfolgreich abgeschlossen. Gemeinsam mit der Arbeitsgruppe 1.33 *Dynamischer Druck* wird weiterhin ein neues Verfahren zur dynamischen Kalibrierung von Drucksensoren entwickelt. Hierbei sollen die

Druckimpulse über Brechungsindexänderungen in einem hydraulischen Medium interferometrisch erfasst werden. Fachübergreifende Aufgaben des EMRP-Projektes IND09, z. B. auf dem Gebiet der elektrischen Messtechnik oder der mathematischen Modellierung und Messdatenauswertung, werden mit den zuständigen Arbeitsgruppen der Abteilungen 2 und 8 bearbeitet.

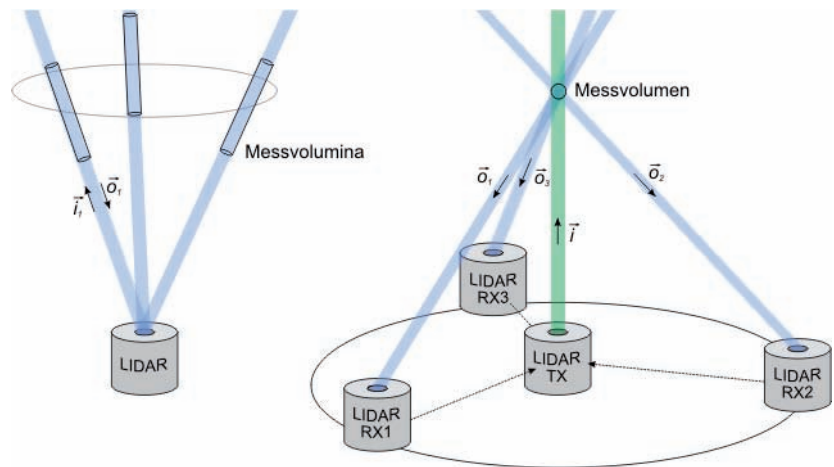
### 1.2 Durchfluss

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

In der Arbeitsgruppe *Strömungsmesstechnik* des Fachbereichs 1.4 *Gase* wurden am Windkanal „Göttinger Bauart“ mit Laser-Doppler-Anemometer-(LDA)-Systemen weiterführende Untersuchungen zum Messverhalten unterschiedlicher Anemometer hinsichtlich ihrer Eignung als Transfornormale für künftige Vergleichsmessungen durchgeführt.

Im „Transfer-Wind-LIDAR“-Projekt konnte die Sendesignalerzeugung optimiert und die Empfangssignalauswertung an Streulichtsignale von Partikeln aus der Atmosphäre angepasst werden. Darüber hinaus wurde ein auf der Bestimmung der Laufzeit basierendes Verfahren für die simultane Geschwindigkeits- und Messhöhenbestimmung entwickelt und validiert (Bild 3). Die Implementierung der Auswerteverfahren wurde nahezu fertiggestellt und wird künftig eine Signalverarbeitung in Echtzeit ermöglichen.

Bild 3: Mehrkomponentige Strömungsgeschwindigkeitsmessung mit konventionellen, monostatischen Wind-Lidar-Systemen (links) und dem in der PTB entwickelten bistatischen System (rechts)



Die Arbeitsgruppe *Gasmessgeräte* hat ein Kalibrierungsverfahren für kritisch betriebene Düsen mit diversen inerten Gasen und Gasgemischen validiert. Daher kann die PTB zukünftig Kalibrierungen im Druckbereich von 0,8 bar bis 6 bar und bis zu einem Durchfluss von 10 m<sup>3</sup>/h im Normzustand mit einer erweiterten Unsicherheit von 0,3 % durchführen. Für die Rückführung von Durchflussmessgeräten im Bereich der Abgas- und Emissionsmessung wurde ein Hochtemperatur-Gasdurchflussprüfstand für Durchflüsse bis 1000 m<sup>3</sup>/h und Temperaturen bis 600 °C errichtet, der sich zurzeit noch in der Erprobung befindet. Zur Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz ist eine Aufbereitung des Rohbiogases erforderlich. Der hierbei auftretende Methanschlußpf beeinflusst die Umweltverträglichkeit. Die PTB ist hier an dem interdisziplinären Verbundprojekt MONA beteiligt.

Die Einführung von sogenannten „Smart Metern“ wird u. a. zum vermehrten Einsatz von elektronischen Gaszählern führen. Hierzu leistete der Fachbereich 1.4 umfangreiche Beratungstätigkeit und Gremienarbeit, sowohl auf nationaler Ebene mit Herstellern und Verwendern von Gaszählern als auch in WELMEC.

Für die Arbeitsgruppe *Hochdruck(HD)-Gas* stand die turnusgemäße Rekalibrierung mehrerer HD-Prüfstände bei Messgeräteherstellern sowie die Erstkalibrierung eines neuen HD-Prüfstandes im Mittelpunkt, der erstmals in Deutschland mit einem geschlossenen Erdgas-Kreislauf (Loop) in einem Druckbereich von 1 bar bis 50 bar und Durchflüssen von 2 m<sup>3</sup>/h bis 6500 m<sup>3</sup>/h arbeitet.

Am volumetrischen Durchflussnormal des HD-Prüfstandes *pigsar* wurde ein laseroptisches System installiert und in Betrieb genommen, mit dem erstmals eine Kontrolle des Referenzvolumens unter Messbedingungen sowie eine zeitlich hoch aufge-

löste Bestimmung des gesamten mechanisch-dynamischen Verhaltens möglich ist.

Die Kernaufgaben des Fachbereichs 1.5 *Flüssigkeiten* umfassen ein sehr breites Spektrum von Aufgaben aus den Gebieten der Mengen- und Durchflussmessung sowohl strömender wie auch ruhender Flüssigkeiten. Die Arbeitsgruppe *Rückführung Flüssigkeitsmessung* widmete sich im vergangenen Jahr der Untersuchung von dynamischen Einflüssen auf die Messunsicherheit des Hydrodynamischen Prüffeldes, um die angegebene erweiterte Messunsicherheit von 0,02 % für Volumen- und Massemessungen weiter zu untermauern. Im Mittelpunkt standen dabei u. a. die Analyse und Bewertung von Fehlereinflüssen durch zeitliche Schwankungen des im HDP generierten Referenzdurchflusses. Ebenso wurden experimentelle Arbeiten zur Auswahl und Weiterentwicklung von Transfornormalen durchgeführt, die für den geplanten internationalen BIPM-Schlüsselvergleich CCM.FF-K1 von Wasserzählerprüfständen eingesetzt werden sollen, für den der PTB durch die CCM Working Group on Fluid Flow (WGFF) die Aufgabe des Pilotlabors übertragen wurde.

Die Arbeitsgruppe *Flüssigkeitsprüfstände* konzentrierte ihre Aktivitäten auf die weitere Reduzierung der Messunsicherheit bei der Weitergabe der Einheiten, d. h. insbesondere auf den Übergang von idealen Laborbedingungen auf reale Anwendungsbedingungen. Im Rahmen einer Industriekooperation konnte das Strömungsverhalten für sogenannte Messkapselzähler erfolgreich mithilfe der Laser-Doppler-Anemometrie untersucht werden (Bild 4). Die Ergebnisse fließen direkt in die Verbesserung der entsprechenden normativen Dokumente ein, z. B. in die zulässigen Betriebs- und Installationsbedingungen. In einer weiteren Industriekooperation gelang mit dem neuen, weiterentwickelten Kleinstmengenprüfstand erstmals die messtechnische

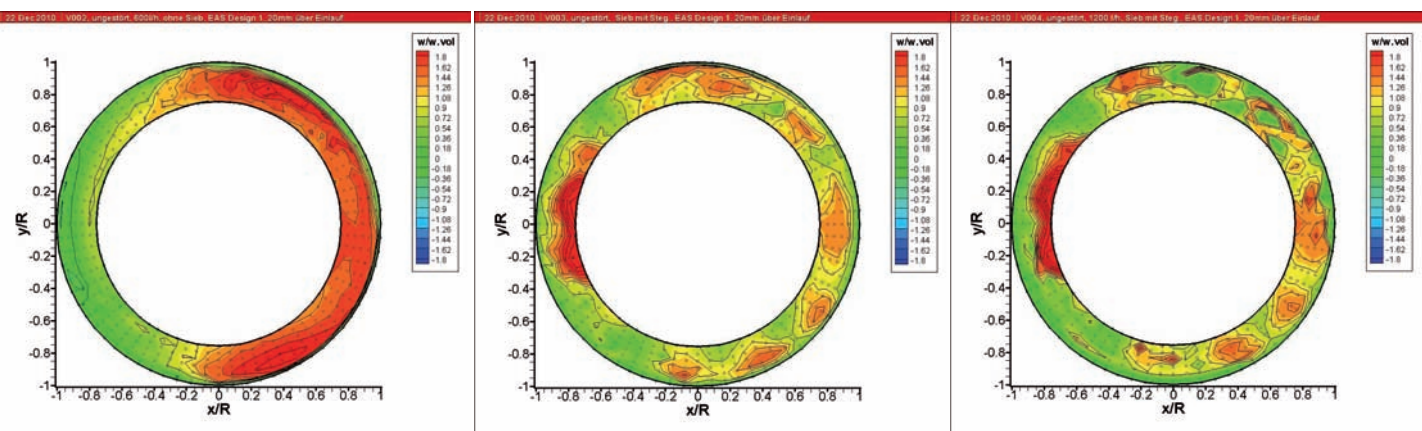


Bild 4: Geschwindigkeitsverteilungen innerhalb des Ringspalts zwischen Gehäuse und Messkapsel für einen Mehrstrahl-Messkapsel-Wasserzähler. Links: bei ungestörter Zuströmung und einem Durchfluss von 600 l/h; Mitte: bei Vorhandensein des regulären Einlaufsiebes und einem Durchfluss von 600 l/h; Rechts: bei Vorhandensein des regulären Einlaufsiebes und einem Durchfluss von 1200 l/h

Rückführung von Kraftstoffverbrauchsmessungen unter realen Betriebsbedingungen mit realem Messgut (Testbenzin).

In den Aufgabenbereich der Arbeitsgruppe *Flüssigkeitsmessgeräte* gehören neben der Zulassung und Zertifizierung von Flüssigkeitsmessgeräten im Rahmen des Eichgesetzes auch die aktive Mitarbeit in den Gremien von OIML, CEN und WELMEC. Zurzeit betrifft dies insbesondere die Europäische Norm EN 14154 (Wasserzähler) und die OIML-Empfehlungen R 49 (Kaltwasserzähler) sowie R 117 (Dynamische Messsysteme für Flüssigkeiten außer Wasser), wo die PTB gemeinsam mit dem amerikanischen NIST den Vorsitz hat. Eine aktuelle Forschungsaufgabe auf dem Gebiet der eichfähigen Messung großer Flüssigkeitsmengen in Lagerbehältern ergibt sich aus der Tatsache, dass bisher nur das Volumen unter Betriebsbedingungen innerhalb der geforderten Eichfehlergrenze von 0,5 % gemessen werden konnte. Eine Umwertung auf einen Referenzzustand oder die Ermittlung der Masse ist bisher nicht möglich, da ausreichende Kenntnisse über die Temperaturverteilung in der Flüssigkeit, die für die notwendige Temperaturmengenumwertung erforderlich sind, nicht vorliegen. Um Temperaturverteilungen in großen, frei stehenden Lagerbehältern erstmals unter realen Bedingungen untersuchen zu können, wurde ein Kooperationsvorhaben mit insgesamt 8 Partnern gestartet. Dazu gehören neben der PTB zwei Eichdirektionen, die TU Hamburg-Harburg, führende Hersteller von Tankmesstechnik und zwei Raffineriegesellschaften. Mit laufenden Messungen an einem 7000-m<sup>3</sup>-Tank über ein ganzes

Jahr konnten die Ausgangsdaten für realistische Simulationen gewonnen und damit auch die Voraussetzungen für die geforderten Mengenumwertungen im Rahmen des Eichrechts geschaffen werden.

Mit einem im Oktober 2012 in der PTB durchgeführten internationalen Workshop konnte der COOMET-Vergleich von Wasserzählerprüfständen im Durchflussbereich zwischen 0,5 m<sup>3</sup>/h und 100 m<sup>3</sup>/h erfolgreich abgeschlossen werden. Beteiligt waren Russland, die Ukraine, Weißrussland, Litauen, Usbekistan, die Slowakei und Deutschland, wobei die PTB Pilotorganisation war. Die positiven Vergleichsergebnisse ermöglichen es nun allen Teilnehmern, ihre nationalen Normalmesseinrichtungen in die entsprechende BIPM-Datenbank als CMC einzutragen, was für den Güteraustausch von Flüssigkeiten zwischen West- und Osteuropa von Vorteil sein wird.

### 1.3 Akustik, Ultraschall und Beschleunigung

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

Im Fachbereich 1.6 *Schall* wird ein sehr breites Spektrum an Fragestellungen zur akustischen Messtechnik, der Zulassung von Schallpegelmessern und -kalibratoren, dem Gehör und dem Ultraschall bearbeitet. Dabei sind gesetzliche Aufgaben, Dienstleistungen und Forschungsaufgaben ausgewogen vertreten.

Die Arbeitsgruppe *Hörschall* schafft durch die Kalibrierung und Prüfung der Messmittel (Ohrsimulatoren, akustische und mechanische Kuppler) und die Bestimmung der Bezugswerte und Kenndaten des menschlichen Gehörs eine wichtige Grundlage für eine verlässliche Diagnostik von Hörstörungen. Hierbei gewinnen objektive Messverfahren, wie z. B. otoakustische Emissionen (OAE) und akustisch evozierte Potenziale (AEP) und die für diese Verfahren benötigten Kurzzeit-Stimuli (Clicks, Bursts, Chirps), zunehmend an Bedeutung. Die Arbeitsgruppe führte Forschungsarbeiten zur Entwicklung neuer Messverfahren und Bezugswerte durch und trug durch Koordinierung der Normung dazu bei, dass mit den modernen audiologischen Messverfahren international vergleichbare Ergebnisse erzielt werden.

In der Arbeitsgruppe *Ultraschall* wird weiterhin sehr aktiv an der Schaffung metrologischer Grundlagen für die Anwendung des hochintensiven therapeutischen Ultraschalls (HITU) gearbeitet. Dazu wurde, unter maßgeblicher Beteiligung der Arbeitsgruppe, ein weiteres internationales Projekt „Dosimetry for Ultrasound Therapy“ im Rahmen des EMRP begonnen. Darin sollen ein einheitlicher Dosisbegriff für therapeutischen Ultraschall sowie die zugehörigen Messmethoden, Transferstandards und Simulationsrechnungen erarbeitet werden. Das Projekt startete im Juni mit einem von der PTB organisierten Workshop in Heidelberg, an dem 40 internationale Experten teilnahmen.

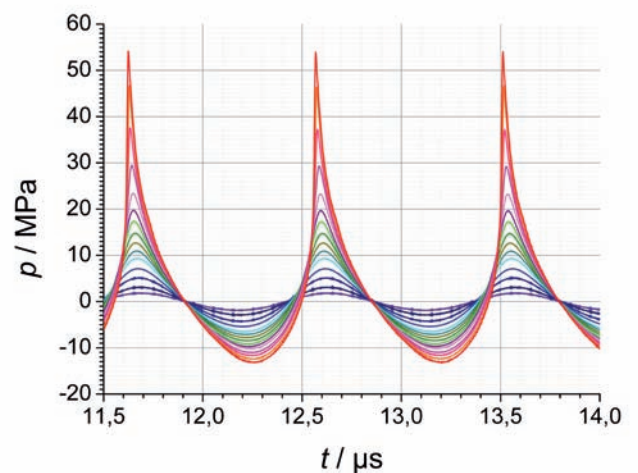
Zur Weiterentwicklung der Messmethoden konnten mit in der Arbeitsgruppe entwickelten, besonders breitbandigen Membranhydrophonen extreme Spitzenschalldrücke von  $p_- = 13 \text{ MPa}$  bzw.  $p_+ = 56 \text{ MPa}$  in HITU-Feldern gemessen werden (Bild 5). Die Er-

gebnisse zeigten sehr gute Übereinstimmungen mit nichtlinearen Schallfeldmodellierungen.

Die Arbeitsgruppen *Hörschall* und *Geräuschmesstechnik* arbeiten maßgeblich in einem zweiten EMRP-Projekt „Metrology for a universal ear simulator and the perception of non-audible sound“, das auch im Fachbereich koordiniert wird. In diesem Projekt sollen zum einen die Grundlagen für die quantitative Bestimmung sowie die Beurteilung von nichthörbarem Schall im Infra- und Ultraschallfrequenzbereich erarbeitet werden. Zum anderen soll ein neuer, universeller Ohrsimulator entwickelt werden, der auch für Neugeborene und Kinder eingesetzt werden kann.

Probleme mit der Festlegung der unterschiedlichen Konformitätskriterien bei der Bauartzulassung und in den periodischen Prüfungen von Schallpegelmessungen bei der Anwendung der DIN EN 61672 wurden in der Arbeitsgruppe *Geräuschmesstechnik* bearbeitet. Es wurden Vorschläge auf der Basis des neuen ISO/IEC Guide 98-4 (JCGM Dokument 106 „Role of measurement uncertainty in conformity assessment“) durch Festlegung von „acceptance limits“ erarbeitet. Diese sehr grundsätzliche Änderung bei der Angabe von Messunsicherheiten bei der Zulassung von Schallpegelmessern wurde in Verhandlungen und durch breite internationale Zustimmung der Mitglieder des Technical Committee „Electroacoustics“ (TC29) in der IEC (International Electrotechnical Commission) durchgesetzt.

Bild 5: In der PTB entwickeltes Spezialhydrophon zur Messung extrem großer Schalldruckamplituden (links) und damit gemessene Druckverläufe im Fokus eines HITU-Schallkopfes bei verschiedenen Anregungsspannungen (rechts)



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

Schwerpunkt der Arbeiten der Arbeitsgruppe *Darstellung Beschleunigung* ist die Kalibrierung von Referenzbeschleunigungsaufnehmern für akkreditierte Laboratorien in Deutschland, aber auch für internationale Kunden und ausländische Metrologieinstitute. Neben der messtechnischen Untersuchung und Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern beschäftigt sich die Arbeitsgruppe auch mit den dazugehörigen Messverstärkern. Bei der Untersuchung des Verhaltens von Ladungsverstärkern in Abhängigkeit von der Quellimpedanz (typischerweise der Kapazität) des angeschlossenen Sensors wurde bei einigen Geräten ein bei hohen Frequenzen nicht mehr zu vernachlässigender Einfluss nachgewiesen. Dies führt dazu, dass solche Geräte sehr individuell für den jeweils daran angeschlossenen Sensor kalibriert werden müssen oder eine zusätzliche, bislang nicht bekannte Komponente im Messunsicherheitsbudget berücksichtigt werden muss. Mithilfe systematischer Untersuchungen ist es gelungen, ein Modell zu entwickeln, das eine rechnerische Korrektur für beliebige Eingangsimpedanzen ermöglicht. Ein weiterer wichtiger Schritt in der Betrachtung von Messverstärkern im Bereich der dynamischen Messung gelang in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern des japanischen Metrologieinstitutes (NMIJ). Hier wurden gemeinsam Verfahren entwickelt, um Ladungsverstärker durch digitale Filter mathematisch zu beschreiben. Dies ermöglicht eine Kompensation des Einflusses des Verstärkers und somit eine

bessere Charakterisierung des Aufnehmers allein, für alle Anwendungen mit transienten Signalen, wie z. B. Stößen.

Die Forschungsaktivitäten der Arbeitsgruppe *Angewandte Akustik* sind auf die Neu- und Weiterentwicklung von akustischen Messverfahren ausgerichtet. Ein Schwerpunkt ist dabei die Ermittlung der Unsicherheit akustischer Kenngrößen.

Die Arbeitsgruppe *Angewandte Akustik* ist für die Neu- und Weiterentwicklung von Messverfahren in den Bereichen Luftschallemission und Bauakustik zuständig. Ein Schwerpunkt lag im letzten Jahr auf der Entwicklung eines neuen Konzepts für die Darstellung und Weitergabe der Einheit der Schallleistung Watt. Diese Größe besitzt eine überragende Bedeutung, da sie die entscheidende Emissions-Kenngröße für technische Schallquellen, wie z. B. Haushaltsgeräte, Rasenmäher, Laubbläser, Baumaschinen usw. ist. Zudem sind alle bauakustischen Kenngrößen physikalisch betrachtet Schallleistungen oder davon abgeleitete Größen. Trotz dieser enormen Bedeutung gibt es für die Luftschallleistung weltweit bislang keine Primärnormale und demgemäß auch keine Rückführbarkeit. Das neu entwickelte Konzept sieht vor, die Schallleistung durch einen schwingenden Festkörper zu realisieren, der in eine reflektierende Ebene eingebettet ist. Die Schwinggeschwindigkeit kann mit einem Laser-Scanning-Vibrometer hochgenau erfasst werden.

Bild 6: Untersuchung des Schräglageneinflusses mit einem Polizei-Motorrad



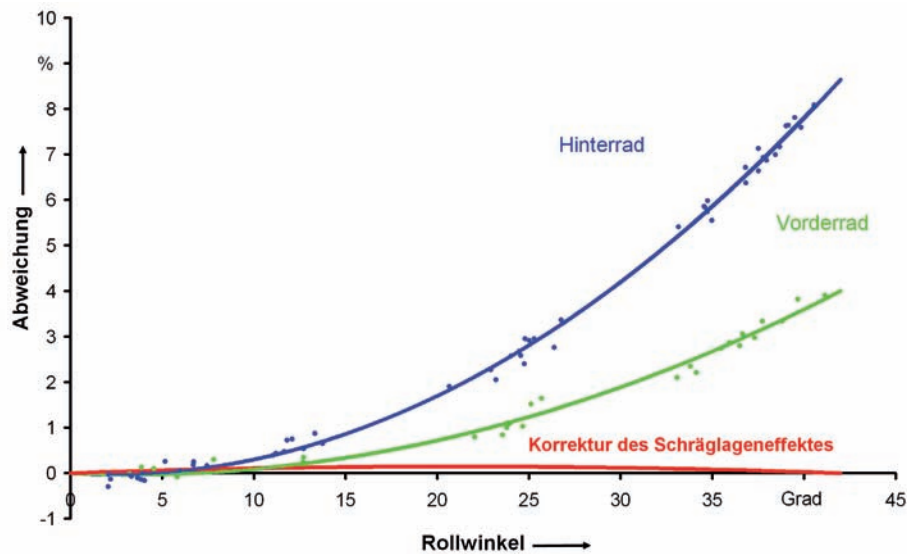


Bild 7: Relative Geschwindigkeitsabweichungen am Hinter- und Vorderrad eines Motorrads in Abhängigkeit vom Schräglagen- (Roll-)winkel (obere Kurven) und das Ergebnis der von der PTB vorgeschlagenen Kompensation des Schräglagen-effektes (untere Kurve)

Die von einem solchen Objekt in ein freies Schallfeld abgestrahlte Schallleistung kann dann sehr genau bestimmt werden. Dieses Konzept soll in den kommenden Jahren in der PTB, möglichst im Verbund mit europäischen Partnern, umgesetzt werden.

In der Arbeitsgruppe *Geschwindigkeitsmessgeräte* im Fachbereich 1.3 *Geschwindigkeit* wurde ein Verfahren für die Polizei entwickelt, mit dem sich Geschwindigkeitsmessungen mit einem Videonachfahrssystem auch bei einer Schräglage eines Polizei-Krades (Bild 6) durchführen lassen. Der sogenannte Schräglageneffekt, die Verringerung des Abrollumfangs mit der Schräglage, wird dabei rechnerisch kompensiert. Grundlage dieses Verfahrens ist die gezielte Auswertung der Unterschiede zwischen Vorder- und Hinterrad. Bild 7 zeigt den Schräglageneffekt für Vorder- und Hinterrad und den Erfolg der von der PTB vorgeschlagenen Kompensation. Ein zusätzlicher Sensor für den Schräglagenwinkel ist hierzu nicht erforderlich, da bei modernen Motorrädern die Drehung beider Räder ohnehin mit Wegimpulsgebern messtechnisch erfasst wird. Das neue Verfahren wird die Einsatzmöglichkeiten von Videokrädern erheblich verbessern, insbesondere zur Überwachung der Geschwindigkeit von Motorradfahrern im Gebirge.

Taxameter gehören zu den von der europäischen Messgeräterichtlinie MID geregelten Messgeräteearten, sodass eine in einem der Mitgliedsstaaten erteilte Bauartzulassung europaweit gilt. In Dordrecht trafen sich im Rahmen von WELMEC unter Leitung der PTB Vertreter der Benannten Stellen der Mitgliedstaaten und haben dort Maßnahmen zur Intensivierung des Erfahrungs- und Informationsaustauschs festgelegt.

In Kooperation mit dem Max-Rubner-Institut in Kulmbach wurde in der Arbeitsgruppe *Dynamischer Druck* analysiert, warum es im täglichen Umgang mit Betäubungsapparaten für Schlachttiere gelegentlich zu aus Tierschutzgründen bedenklichen Funktionsfehlern kommt. Zu diesem Zweck wurden die ballistischen Parameter der beschleunigten Betäubungsbolzen für verschiedene Kartuschenstärken und Gerätebauarten analysiert. Die Ergebnisse lieferten wertvolle Hinweise für technische Verbesserungen der Geräte und für eine Überarbeitung der europäischen Tierschutz-Schlachtverordnung. Ein Beitrag hierzu wird auch eine neue EN-Norm 16264 für Kartuschen sein, an der die PTB in Zusammenarbeit mit der BAM aktiv mitarbeitet.

# In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

## Grundlagen der Metrologie

### Bestimmung von Massenträgheitsmoment und Torsionssteifigkeit für die Modellierung einer dynamischen Drehmoment-Messeinrichtung

Im Rahmen des Europäischen Metrologieforschungsprogramms EMRP wird im gemeinsamen Forschungsprojekt IND09 die dynamische Messung mechanischer Größen (Kraft, Druck, Drehmoment) erforscht. Für die Bestimmung von Modelleigenschaften einer Messeinrichtung für dynamische Drehmomentkalibrierung sollen Massenträgheitsmoment und Torsionssteifigkeit von Komponenten der Einrichtung bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurden zwei Messaufbauten entwickelt. (Leonard Klaus, FB 1.7, [leonard.klaus@ptb.de](mailto:leonard.klaus@ptb.de))

### Neues Doppler-Lidar-Transfornormal zur rückgeführten Messung von Windgeschwindigkeiten

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Windparks werden Windpotenzialanalysen durchgeführt, die bislang auf der Messung von Windgeschwindigkeiten mithilfe von Messmasten beruhen. Durch ein in der PTB entwickeltes Doppler-Lidar-System zur rückgeführten bodengestützten laseroptischen Windgeschwindigkeitsmessung könnten in Zukunft aufwendig zu errichtende Messmasten entfallen. (Michael Eggert, FB 1.4, [michael.eggert@ptb.de](mailto:michael.eggert@ptb.de))

### Gedruckte Streuteilchen für die LDA-Kalibrierung

Es wurden erstmals gedruckte Streuteilchen für die Kalibrierung von Laser-Doppler-Anemometern (LDA) genutzt. Diese sollen zu einer besseren Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse verschiedener LDA-Systeme beitragen. (Volker Strunck, FB 1.4, [volker.strunck@ptb.de](mailto:volker.strunck@ptb.de))

### Berücksichtigung dynamischer Effekte bei der Rückführung von Durchflussmessungen

Als aktueller Stand der Technik bei der komponentenweisen Rückführung von Durchfluss-Normalmessenrichtungen – basierend auf den SI-Einheiten Masse, Dichte, Temperatur und Zeit – wird eine rein statische Rückführung dieser in der Durchflussmessung involvierten Messgrößen praktiziert. Eine modellbasierte theoretische Betrachtungsweise lässt eindeutig erkennen, dass dynamische Einflüsse bzw. Störeffekte wirksam werden. Primäre Ursachen der wesentlichen und dominanten Fehlereinflüsse sind zeitliche Schwankungen des in der betreffenden An-

lage generierten Referenzdurchflusses. (Rainer Engel, FB 1.5, [rainer.engel@ptb.de](mailto:rainer.engel@ptb.de))

### PTB-Referenzanlage für Fahrzeuggeschwindigkeiten durch GPS-Inertialsystem eindrucksvoll bestätigt

Für die auf piezoelektrischen Drucksensoren basierende Referenzanlage der PTB für Fahrzeuggeschwindigkeiten wurde das Messunsicherheitsbudget durch Vergleiche mit einem hochwertigen GPS-Inertialsystem verifiziert. (Frank Märten, FB 1.3, [frank.maertens@ptb.de](mailto:frank.maertens@ptb.de))

### Charakterisierung hochintensiver fokussierter Ultraschallfelder (HIFU) mit breitbandigen Membranhydrophonen und numerischer Modellierung

Die numerische Simulation einer nichtlinearen parabolischen Gleichung (KZK-Gleichung) kann vorteilhaft zur Bestimmung von extrem hohen Schalldruckamplituden moderner therapeutischer Ultraschallgeräte eingesetzt werden und ergänzt die experimentelle Hydrophonmesstechnik. (Olga Bessonova, FB 1.6, [Olga.Bessonova@ptb.de](mailto:Olga.Bessonova@ptb.de))

## Metrologie für die Wirtschaft

### Verbesserte Rückführung von Prandtl'schen Staurohren mittels Laser-Doppler-Anemometrie

Die als Pitot-Static-Tubes bezeichneten Prandtl'schen Staurohre werden derzeit fast ausschließlich in den akkreditierten Kalibriereinrichtungen der Windenergiebranche als Bezugsnormale für die Kalibrierung von allein in Deutschland weit über 10 000 Anemometern eingesetzt. Vergleichsmessungen mit Laser-Doppler-Anemometern als Transfornormale haben gezeigt, dass sich mit Prandtl'schen Staurohren auf die SI-Einheiten rückführbare Strömungsgeschwindigkeitsmessungen mit Messunsicherheiten im Promillebereich erzielen lassen. (Harald Müller, FB 1.4, [harald.mueller@ptb.de](mailto:harald.mueller@ptb.de))

### PTB organisiert ersten DAkKS-Ringvergleich zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Massenormalen

Neun akkreditierte Kalibrierlaboratorien nehmen an dem ersten im Zuständigkeitsbereich der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkKS) organisierten Ringvergleich zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Massenormalen teil. Die PTB übernimmt die Rolle des Pilotlabors hin-

sichtlich der Vorbereitung, Koordinierung und Auswertung der Vergleichsmessungen. (Michael Borys, FB 1.1, michael.borys@ptb.de)

### **Erfolgreicher Ringvergleich zwischen den DAkKS-Laboratorien für Beschleunigung und der PTB**

Ein Ringvergleich zwischen den im DAkKS akkreditierten Laboratorien für die Messgröße Beschleunigung und der PTB bestätigte das hohe Niveau der messtechnischen Rückführung auf diesem Gebiet in Deutschland. Die guten Ergebnisse wurden nun international veröffentlicht. (Thomas Bruns, FB 1.7, thomas.bruns@ptb.de)

### **Feuchteinfluss auf Präzisions-Drehmomentaufnehmer einfach gemessen**

Präzisions-Drehmomentaufnehmer, die auf Dehnungsmessstreifen beruhen, können – sofern sie nicht hermetisch gekapselt sind – von der Feuchte der Umgebungsluft beeinflusst werden. Der Feuchtekoefizient, der diese Eigenschaft beschreibt, konnte bisher nur mit sehr aufwendigen Verfahren gemessen werden. Deshalb waren Messungen dieses Koeffizienten den akkreditierten Kalibrierlaboratorien aus Kostengründen nicht möglich. Vereinfachte Messmethoden zur Bestimmung des Beitrags von Luftfeuchteinflüssen zur Messunsicherheit wurden jetzt in der PTB auf ihre Eignung hin untersucht. (Andreas Brüge, FB 1.2, andreas.bruege@ptb.de)

### **Neue Kalibrierverfahren für kritisch betriebene Düsen mit inerten Gasen**

Im Rahmen des Leistungsangebots der PTB können Kalibrierungen von kritisch betriebenen Venturidüsen mit inerten Gasen und Gasgemischen im Druckbereich von  $p = 0,8$  bar bis 6 bar und bis zu einem Durchfluss von  $Q = 10$  m<sup>3</sup>/h im Normzustand standardmäßig durchgeführt werden. (Rainer Kramer, FB 1.4, rainer.kramer@ptb.de)

### **Neue Anlage zur kombinierten Kraft- und Drehmomenterzeugung**

Nach aufwendiger Planung befindet sich die Fertigstellung einer Maschine zur gleichzeitigen Erzeugung von Längskraft und Drehmoment in der Endphase. Die Messvorrichtung erweitert die Möglichkeiten der PTB zur Kalibrierung sogenannter Mehrkomponenten-Sensoren. (Sebastian Baumgarten, FB 1.2, sebastian.baumgarten@ptb.de)

### **Forschungsvorhaben zur Messkapselproblematik von Wasser- und Wärmehzählern erfolgreich abgeschlossen**

Auf der Grundlage eines umfangreichen Messprogramms und unter Einbeziehung moderner laser-optischer Verfahren zur Diagnose der Strömungsbedingungen vor und im Inneren der Zähler konnte der Nachweis erbracht werden, dass Wasser- und Wärmehzähler auch in Messkapselausführung den messtechnischen Anforderungen der Europäischen Messgeräte-richtlinie MID an Wasserzähler entsprechen. (Gudrun Wendt, FB 1.5, gudrun.wendt@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Ballistische Experimente an Glasrepliken 300 000 Jahre alter, steinzeitlicher Levallois-Pfeilspitzen für die Archäologie**

In Kooperation mit dem Römisch-Germanischen Zentralmuseum (RGZM) in Neuwied wurde im Rahmen eines DFG-Projektes ein Verfahren für reproduzierbare ballistische Experimente mit steinzeitlichen Speerspitzen entwickelt. Als reproduzierbare Versuchsobjekte wurden Glasrepliken verwendet, die den Originalspeerspitzen entsprechen. Diese wurden an einem kurzen Schaft befestigt, mit einer Druckluftbeschleunigungsanlage auf definierte Geschwindigkeiten gebracht und auf ein simuliertes Ziel gerichtet. Mit den Experimenten wurde dann ein systematischer Zusammenhang zwischen den Bruchspuren an den Pfeilspitzen und den ballistischen Parametern bzw. dem Jagdverhalten hergestellt. (Holger Schönekeß, FB 1.3, holger.schoenekess@ptb.de)

#### **Einfluss einer Motorrad-Schräglage auf Geschwindigkeitsmessungen mit Videonachfahrssystemen**

Bei der Verwendung von Videokrädern für die Messung der Geschwindigkeit von Fahrzeugen ergibt sich der Schräglageneffekt, eine von der Schräglage abhängige Verringerung des Abrollumfangs. Um Benachteiligungen von Betroffenen auszuschließen, sind daher Einschränkungen in der Anwendung erforderlich. Die PTB hat jetzt detaillierte Experimente zum Schräglageneffekt durchgeführt und ausgehend von den Ergebnissen ein Verfahren entwickelt, um den Effekt ohne zusätzliche Sensoren zu kompensieren. (Frank Jäger, FB 1.3, frank.jaeger@ptb.de)



### **Sichere Unsicherheit**

Auf Initiative der PTB wird die Behandlung von Messunsicherheiten in der Normung elektroakustischer Geräte künftig für alle verständlich. (Christoph Kling, FB 1.6, christoph.kling@ptb.de)

### **Audiometrie mit reinen Tönen und schmalbandigen Testsignalen: Kalibrierung und Messunsicherheiten**

Die Bestimmung der Hörschwelle mit Tönen ist das gebräuchlichste und grundlegendste audiometrische Verfahren. In der Neufassung der Norm DIN EN ISO 8253-1 (Akustik – Audiometrische Prüfverfahren Teil 1: Grundlegende Verfahren der Luft- und Knochenleitungs Schwellenaudiometrie mit reinen Tönen) werden zusätzlich Angaben zur Berechnung eines Messunsicherheitsbudgets gemacht, um den im „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) geforderten Umgang mit Messunsicherheiten gerecht zu werden. Unsere Forschungsarbeiten haben ergeben, dass die interindividuellen Streuungen der Gehörgangsgeometrie zu einer mit der Frequenz ansteigenden Unsicherheit der Hörschwellenbestimmung führen. (Jan-Henning Schmidt, FB 1.7, jan-henning.schmidt@ptb.de und Thomas Fedtke, FB 1.6, thomas.fedtke@ptb.de)

### **Geschwindigkeits- und Abstandsmessung von Kraftfahrzeugen an schwierigen Fahrbahnabschnitten**

Bislang konnte eine videobasierte Geschwindigkeits- und Abstandsmessung von Kraftfahrzeugen nur an Fahrbahnabschnitten mit nahezu kurvenfreiem und flachem Verlauf durchgeführt werden. Jedoch sind es gerade Autobahnabschnitte mit engkurvigen, hügeligen und Querneigungs-Verläufen, an denen es zu verstärktem Unfallgeschehen kommt. Durch die Erweiterung der Bauartzulassung für das Verkehrskontroll-System (VKS) der Firma VIDIT können jetzt auch Geschwindigkeits- und Abstandsmessungen an diesen Streckenabschnitten durchgeführt werden. (Johannes Kupper, FB 1.3, johannes.kupper@ptb.de)

### **Bezugs-Hörschwellen für Gehörgangssonden zur Messung otoakustischer Emissionen**

Für eine handelsübliche Gehörgangssonde zur Messung otoakustischer Emissionen wurden Bezugs-Hörschwellen ermittelt. Das erlaubt zukünftig den Einsatz dieser Sonde auch bei subjektiven Hörtests. (Makram Zebian, FB 1.6, makram.zebian@ptb.de)

### **Erstmalige Messung des Leistungseintrages eines Phakoemulsifikationsgerätes in das Auge**

Der graue Star (Katarakt) zählt zu den häufigsten Erkrankungen im Alter und ist durch eine Trübung der Augenlinse gekennzeichnet. Im Fall einer deutlichen Absenkung der Sehschärfe wird die getrübbte Augenlinse mittels Ultraschall entfernt (Phakoemulsifikation) und durch eine Kunststofflinse ersetzt. Als Komplikationen während der Operation können hierbei thermische Schäden auftreten. In der PTB wurde nun erstmals die durch Phakoemulsifikationsgeräte eingebrachte Leistung gemessen und damit eine Abschätzung über das thermische Schädigungspotenzial ermöglicht. (Steffen Buschschlüter, FB 1.6, steffen.buschschlueter@ptb.de)

### **Installationsgeräuschmessungen nach neuer Messvorschrift liefern im Mittel um 2 dB höhere Werte**

Durch eine umfangreiche Messreihe und ergänzende Computersimulationen konnte gezeigt werden, dass die nach der neuen Norm DIN EN ISO 10052 gemessenen Installationsgeräuschpegel im Mittel um 2 dB höher sind als die nach der alten Norm DIN 52219 ermittelten Werte. (Volker Wittstock, FB 1.7, volker.wittstock@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

#### **Wissenschaftliche Zusammenarbeit zwischen der PTB und dem NPL Indien bei der Darstellung der Kraft**

Für das Metrologieinstitut in Indien wurde von einer deutschen Firma eine neue Kraft-Normalmesseinrichtung entwickelt, die mit hoher Genauigkeit einen großen Kraftbereich abdeckt. Die Bestimmung der Messunsicherheiten dieser Anlage in Neu-Delhi wurde in einem Forschungsprojekt zusammen mit der PTB durchgeführt. (Falk Tegtmeyer, FB 1.2, falk.l.tegtmeier@ptb.de)

#### **Neue CCM-Richtlinie zur Verbesserung der Messunsicherheitsbestimmung bei Durchflussmessungen**

Anlässlich der 8. Sitzung der WGFF im Juni 2012 in Colorado Springs/USA wurden konkrete Vorschläge zur Umsetzung der aktuellen Dokumente von CIPM und ILAC bezüglich der für CMC-Einträge und in Kalibrierzertifikaten anzugebenden Messunsicherheiten speziell für den Bereich der Durchflussmessung diskutiert und in Form einer entsprechenden Richtlinie zusammengefasst. (Bodo Mickan, FB 1.4, bodo.mickan@ptb.de)

### **Start des EMRP-Projektes „NewKILO“**

Unter Beteiligung von 14 Partnern aus 13 Ländern startete am 1. Juni dieses Jahres das europäische Forschungsprojekt „Developing a practical means of disseminating the new kilogram“ (EMRP/SIB05). (Michael Borys, FB 1.1, michael.borys@ptb.de)

### **Internationaler Workshop „Dosimetrie für Ultraschall-Therapien“**

Ein zweitägiger Workshop über Exposimetrie und Dosimetrie für therapeutischen Ultraschall wurde am 14. und 15.6.2012 in Heidelberg abgehalten, an dem 37 Experten von 26 Institutionen aus 9 Staaten teilnahmen. Der Workshop war ein erster Schritt des EMRP(European Metrology Research Programme)-Projektes „Dosimetry for Ultrasound Therapy“ ([www.DUTy-project.eu](http://www.DUTy-project.eu)). (Julian Haller, FB 1.6, julian.haller@ptb.de)

### **Erfolgreicher Abschluss einer europäischen Zusammenarbeit über hochintensiven therapeutischen Ultraschall (HITU)**

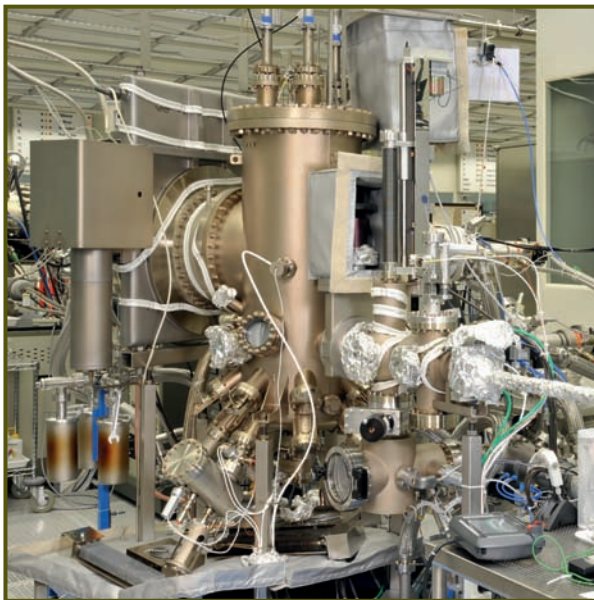
Hochintensiver therapeutischer Ultraschall (HITU) ist ein nichtinvasives und nicht-ionisierendes Therapie-Verfahren, bei dem durch starke Fokussierung eines Ultraschallfeldes lokal begrenzt sehr hohe Ultraschallintensitäten ( $> 10 \text{ kW/cm}^2$ ) im Körper erzeugt werden können. Diese hohen Intensitäten bewirken dann zum Beispiel eine Nekrotisierung und damit Zerstörung von Tumorgewebe. Obwohl die Zahl der Anwendungen stetig steigt, existieren kaum verlässliche Messmethoden für die Charakterisierung oder Bewertung von HITU-Geräten. (Julian Haller, FB 1.6, julian.haller@ptb.de)

### **Neues aus der OIML**

Bei der 47. Sitzung des Internationalen Komitees für das gesetzliche Messwesen (CIPM) wurden zwei wichtige Resolutionen verabschiedet: Die eine beinhaltet ein Statement der OIML zur geplanten Revision des Internationalen Einheitensystems (SI), die andere die Anerkennung von Herstellerprüfergebnissen im Rahmen des OIML MAA. (Roman Schwartz, 1, Roman.Schwartz@ptb.de)



# Abteilung 2 Elektrizität



Die Abteilung *Elektrizität* sorgt gemäß dem Auftrag der PTB mit ihren Arbeiten im Bereich der Elektrizität und des Magnetismus' für Einheitlichkeit, Verlässlichkeit und Fortschritt im Messwesen. Dazu bearbeitet die Abteilung alle Aspekte metrologischer Wertschöpfung dieses Bereiches: von der Entwicklung spezieller Nanofabrikationstechniken für elektrische Quantennormale und der Untersuchung metrologisch relevanter Quantenphänomene über die Entwicklung von Primärnormalen zur Darstellung der Einheiten mit höchster Präzision bis zur Entwicklung von angewandter Messtechnik für die Weitergabe der Einheiten an akkreditierte Kalibrierlaboratorien. Zur Bearbeitung dieser Aufgaben ist die Abteilung organisatorisch in die sechs Fachbereiche *Gleichstrom und Niederfrequenz, Hochfrequenz und Felder, Elektrische Energiemesstechnik, Quantenelektronik, Halbleiterphysik und Magnetismus* sowie *Elektrische Quantenmetrologie* gegliedert. Teilweise über Fachbereichsgrenzen hinweg wurden die fünf Schwerpunktthemen *Grundlagen der elektrischen Metrologie, Aufbau von Quanten- und klassischen Skalen für elektrische und magnetische Einheiten, Elektrische Energiemesstechnik, Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie* sowie *Metrologie für magnetische Nanostrukturen* als mittelfristig wichtigste Arbeitsfelder im Themenbereich *Elektrizität und Magnetismus* identifiziert.

Um ihre Forschungs- und Entwicklungsaufgaben effizient zu bearbeiten, kooperiert die Abteilung mit einer Vielzahl nationaler Metrologieinstitute im Rahmen des von der EU geförderten European Metrology Research Programme (EMRP). Im Berichtszeitraum sind zwei von der Abteilung koordinierte EMRP-Projekte angelaufen, in denen die Ressourcen der Abteilung vorteilhaft durch die Expertise der Projektpartner ergänzt werden: Das Projekt *Quantum ampere: Realisation of the new SI ampere* hat das Ziel, die messtechnische Darstellung der durch die Festlegung der Größe der Elementarladung neu definierten elektrischen Basiseinheit Ampere zu realisieren. Mit dem Projekt *Microwave and terahertz metrology for homeland security* soll die metrologische Basis für die Charakterisierung von Sicherheitstechnik, wie z. B. Personenscannern, geschaffen werden.

### Titelbild:

Technologie in der Abteilung Elektrizität: von der Nanotechnologie für die Realisierung des neuen, quantenbasierten Einheitensystems bis zu Hochspannungsmesstechnik zur Umsetzung der Energiewende. Links: Molekularstrahlepitaxie-Anlage zur Herstellung von Halbleiter-Quantenschaltungen. Rechts: Blick in die Hochspannungshalle der PTB

Zur langfristigen Zielsetzung im Themenbereich *Elektrizität und Magnetismus* hat das zuständige Technische Komitee von EURAMET im Berichtsjahr fünf Roadmaps erarbeitet, die einen Zeithorizont von einem Jahrzehnt haben. Die Abteilung hat dazu maßgeblich beigetragen. Die fünf Roadmaps spiegeln die fünf Schwerpunktthemen der Abteilung wider, so dass sich die Arbeiten der Abteilung auch in Zukunft effektiv in europäische Kooperationen einbringen lassen werden. Über das in den fünf Schwerpunktthemen im Jahr 2012 Erreichte wird im Folgenden berichtet.

### Grundlagen der elektrischen Metrologie

Zur Umsetzung der von der Meterkonvention geplanten Neudefinition des Amperes entwickelt die Abteilung Quanten-Stromquellen auf der Basis von Halbleiter-Einzelelektronenpumpen. Zur Fertigung dient die auf dem Titelbild gezeigte Molekularstrahlepitaxie-Anlage. In den nanoelektronischen Schaltungen wird mit einer vorgegebenen Frequenz eine feste Anzahl von Elementarladungen pro Zyklus durch einen Leitungskanal transportiert. Um etwaige Transferfehler zu bestimmen, müssen die Stromquellen mit Einzelelektronen-Detektoren auf einem Chip kombiniert werden. Im Berichtsjahr wurden erstmals dynamische Untersuchungen an einer integrierten Quantenschaltung aus vier Halbleiter-Einzelelektronenpumpen und drei Ladungsinseln, gekoppelt an je einen metallischen Einzelelektronen-Detektor, durchgeführt. Eine Abbildung der Quantenschaltung findet sich in der Rubrik „Nachrichten des Jahres“. Die Messungen zeigen, dass die Dynamik einzelner Elektronen, wie z. B. die Besetzung einer Ladungsinsel mit genau einem Elektron, experimentell aufgelöst werden kann. Die Ergebnisse stellen einen wichtigen Schritt zu einer „selbstreferenzierten“ Quanten-Stromquelle dar, in der etwaige Fehler beim Transport einzelner Elektronen durch Einzelelektronen-Detektoren messtechnisch erfasst werden. Die Berücksichtigung dieser Fehler bei der Bestimmung des Stromes erhöht die Genauigkeit der Quanten-Stromquelle und der Darstellung des neudefinierten Amperes.

Einzelelektronen-Stromquellen erzeugen Ströme mit Stromstärken im Pikoampere- bis Nanoampere-Bereich. Für die praktische Darstellung der Stromstärke gemäß der neuen Definition des Amperes müssen diese Ströme mit Quantengenauigkeit verstärkt werden. Im Berichtsjahr ist es erstmals gelungen, einen Strom von 190 pA aus einer Halbleiter-Einzelelektronenpumpe mit einem Kryostromkomparator auf nahezu ein Mikroam-

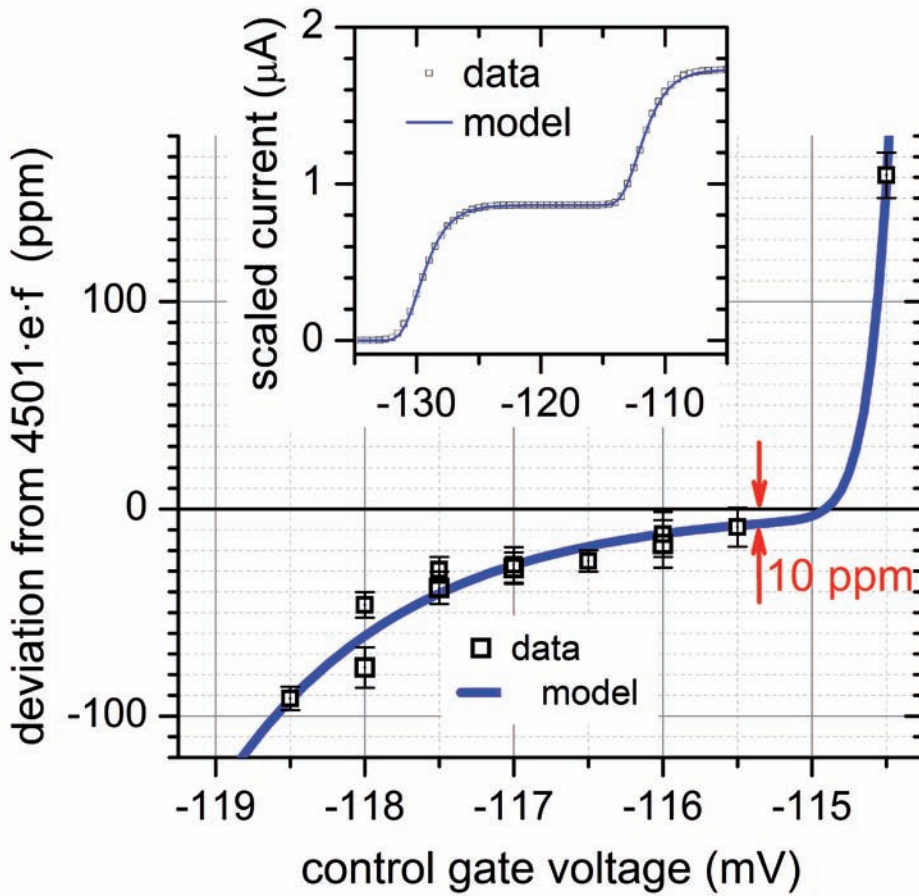


Bild 1: Kleines Bild: Der erzeugte Strom als Funktion der Kontrollspannung der Einzelelektronen-Stromquelle. Großes Bild: Abweichung des Ausgangsstroms in part-per-million (ppm) vom idealen Wert für den Transport eines Elektrons je Pumpzyklus, multipliziert mit dem Verstärkerverhältnis von 4501 des Komparators. Die Linie zeigt eine theoretische Modellierung des Stroms.

pere zu verstärken (Bild 1). Die Unsicherheit des so erzeugten Stromes wurde in diesem Experiment durch die Unsicherheit der noch nicht optimierten Einzelelektronenpumpe von etwa 10 Teilen in  $10^6$  dominiert; der Quanten-Verstärker verursachte keine messbare Vergrößerung der Unsicherheit.

Metallische Einzelelektronenschaltungen werden im Hinblick auf die Verwendung als energieauflösende Detektoren für einzelne Mikrowellen-Photonen untersucht, die störende Anregungen in Quantenschaltungen verursachen. Ein solcher Detektor würde es erlauben, den störenden Mikrowellenhintergrund in der Umgebung von Quantenschaltungen zu charakterisieren und Schirmungsmaßnahmen zur Reduzierung des Mikrowellenhintergrunds quantitativ zu testen. Dies würde die Funktionalität von Quanten-Stromquellen und von Festkörper-Quantengattern verbessern. Untersucht wurde eine Supraleiter (Al)-Normalleiter (AuPd) Einzelelektronenfall hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber Mikrowelleneinstrahlung im Frequenzbereich um 50 GHz (Bild 2). Durch Absorption einzelner Mikrowellen-Photonen, die von einem benachbarten Einzelladungstransistor erzeugt werden, kommt es zu Anregungen, die einzelnen Elektronen das Entweichen aus der Falle ermöglichen. Dieses Verhalten wird mithilfe eines zweiten Transistors zeitaufgelöst registriert. Das Verhalten der Elektro-

nen in der Falle ist ein Maß für die Mikrowellenstrahlung.

Neue elektronische Materialien eröffnen neue Perspektiven für die Metrologie. Zurzeit wird Graphen, ein einlagiges Netzwerk aus Kohlenstoffatomen, intensiv im Hinblick auf die Entwicklung robuster Quantenwiderstandsnormale basierend auf dem Quanten-Hall-Effekt untersucht. Im Berichtsjahr

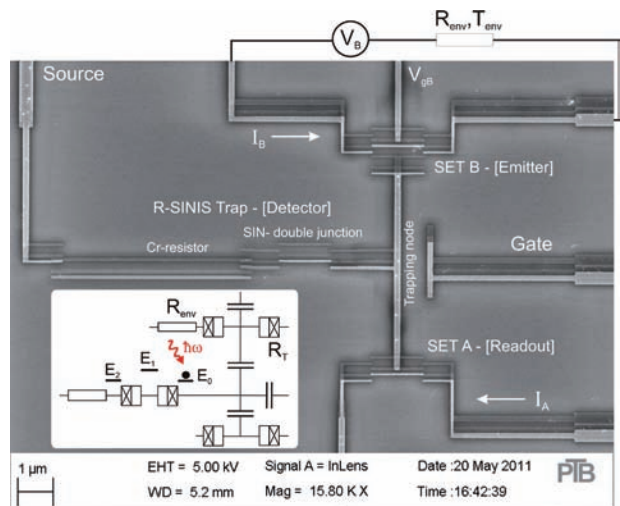


Bild 2: Elektronenmikroskopische Abbildung einer Schaltung zur Untersuchung einer Einzelelektronenfall („R-SINIS Trap“) als Detektor für Mikrowellen-Photonen, die von einem Einzelelektronentransistor („SET B“) emittiert werden



Bild 3: Quanten-Hall-Widerstand aus einem Graphenfilm auf einem Galliumarsenid-Wirtssubstrat

konnte erstmals demonstriert werden, dass der quantisierte Hall-Widerstand mit einer metrologisch relevanten Unsicherheit von  $6,3 \cdot 10^{-9}$  mit Graphenfilmen reproduziert werden kann, die auf ein Wirtssubstrat transferiert wurden. Zuvor war dies nur mit Graphen gelungen, das direkt auf SiC aufgewachsen worden war. Als Wirtssubstrat wurde ein Galliumarsenid-Kristall gewählt, auf dem sich ein relativ großer Graphenfilm präparieren ließ (Bild 3). Das Ergebnis untermauert, dass die Größe der Graphenfilme entscheidend für die Präzision der Widerstandsmessung ist.

## Aufbau von Quanten- und klassischen Einheitenskalen

Die Arbeit der Abteilung trägt dem Bedarf der Industrie nach der Rückführung elektrischer Messungen in sich ständig erweiternden Werte- und Frequenzbereichen Rechnung. Dazu werden die Skalenbereiche, über die die elektrischen Einheiten dargestellt und weitergegeben werden können, beständig ausgebaut. Durch die Automatisierung von Messungen können Kalibrierungen schneller und damit kostengünstiger durchgeführt werden. So wurde z. B. im Berichtsjahr eine automatisierte Kapazitätsmessbrücke für die Kalibrierung von Kondensatoren mit Nennwerten von 10 nF bis 10 mF in

Betrieb genommen. Zur Kalibrierung von Messverstärkern, die für eine Vielzahl von Messungen dynamischer mechanischer Größen (z. B. Kraft, Drehmoment oder Druck) in der Industrie eingesetzt werden, wurde ein dynamisches Brückennormal für den Frequenzbereich bis zu 1 kHz entwickelt.

Durch den Einsatz von Quantennormalen können Kalibrierverfahren weiter vereinfacht werden. Hier liegt der Schwerpunkt auf der Weiterentwicklung der Technologie für die Herstellung von Josephson-Spannungsnormalen und deren Anwendungen in der elektrischen Präzisionsmesstechnik. Die Abteilung hat in den letzten Jahren die Nb/Nb<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Nb-Technologie (Nb: Niob, Si: Silizium) zur Herstellung von SNS-Josephson-Kontakten (S: Supraleiter, N: Normalleiter) erfolgreich im Reinraumzentrum der PTB etabliert. Im Berichtsjahr konnten mit dieser Technologie die weltweit ersten voll funktionsfähigen 20-Volt-Josephson-Spannungsnormale hergestellt und charakterisiert werden. Ein solches sogenanntes binäres Josephson-Spannungsnormal besteht aus ca. 140 000 Josephson-Kontakten. Um diese große Anzahl von Kontakten zu realisieren, wurden jeweils zwei Josephson-Kontakte übereinander angeordnet. Bild 4 zeigt ein Beispiel für die resultierende fünfflaglige Schichtstruktur. Zur Erzeugung einer Ausgangsspannung von 20 V wird das Josephson-Spannungsnormal bei einer Frequenz von 70 GHz betrieben (Bild 5). Die Schaltungen sind für den Gleichstrom- und den Wechselstrombetrieb bis ca. 1 kHz geeignet. Im letzteren Fall kann mit den Schaltungen die in der Elektrotechnik ge-

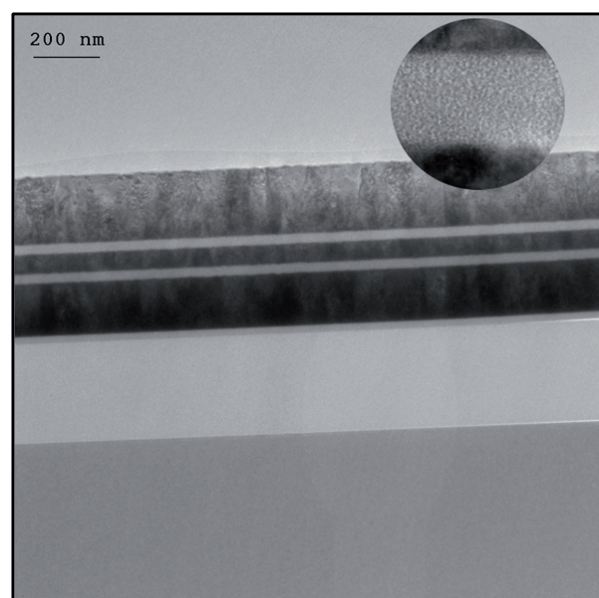


Bild 4: Elektronenmikroskopische Aufnahme zweier übereinander angeordneter Nb/Nb<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Nb-Josephson-Kontakte

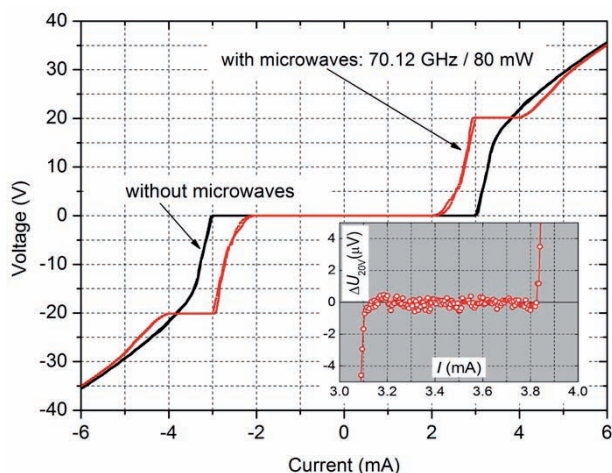


Bild 5: Strom-Spannungskennlinie einer 20-Volt-Schaltung mit 139 264 Nb/Nb<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Nb-Josephson-Kontakten (realisiert durch Zweifach-Stapel) ohne und mit Einstrahlung von 70-GHz-Mikrowellen. Durch einen Vergleich mit zwei in Serie geschalteten Zener-Dioden konnte die 20-V-Stufe in hoher Auflösung dargestellt werden (Inset).

bräuchliche Wechselspannung mit einem Effektivwert von 10 V realisiert werden.

Binäre Josephson-Normale erzeugen hohe Spannungsamplituden. Die Frequenz der erzeugten Wechselspannung ist jedoch auf etwa 1 kHz begrenzt und ihr Frequenzspektrum enthält große Oberwellenanteile. Für Anwendungen, die spektral reine Spannungen bei hohen Frequenzen erfordern, werden daher sogenannte pulsgetriebene Josephson-Spannungsnormale entwickelt. Auch hier wird die Nb/Nb<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Nb-Technologie zur Herstellung fünfzähliger Schichtstrukturen eingesetzt, um die Kontaktanzahl und damit die relative geringe Ausgangsspannung dieses Spannungsnormaltyps zu erhöhen. Zur Erhöhung der Ausgangsspannung können weiterhin zwei Josephson-Schaltungen auf einem Chip zusammengeschaltet werden (Bild 6).

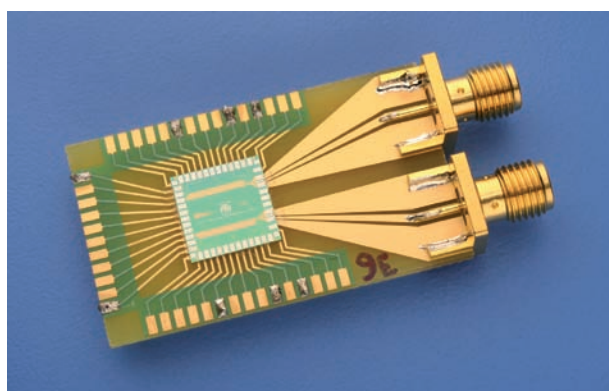


Bild 6: Chip mit zwei pulsgetriebenen Josephson-Schaltungen, deren Spannungen zur Erhöhung der Ausgangsspannung überlagert werden können

Ein solcher Chip besteht dann aus 8000 Josephson-Kontakten und kann nach Optimierung des experimentellen Aufbaus Ausgangsspannungen bis zu 250 mV (Spitze-Spitze) erzeugen. Um die Präzision der einzelnen Josephson-Schaltungen zu überprüfen, wurden ihre Ausgangsspannungen mittels Differenzbildung verglichen. Die relative Abweichung betrug nur  $(1,6 \pm 2,9) \times 10^{-8}$ . Die Spannungserzeugung ist also hervorragend reproduzierbar und die beiden Einzelspannungen können mit hoher Präzision phasenstarr überlagert werden.

Zur Erzeugung von Josephson-Spannungen mit Frequenzen bis 1 kHz, reinem Spektrum und Amplituden im Bereich von 1 V können binäre und pulsgetriebene Josephson-Spannungsnormale kombiniert werden. Das pulsgetriebene Spannungsnormale wird dazu benutzt, die Oberwellen des binären Spannungsnormals zu kompensieren. Diese von der PTB patentierte Idee wurde kürzlich mit hoher Präzision realisiert: Es gelang, Sinuswellen mit Amplituden von etwa 1 V zu erzeugen, deren Oberwellenanteil auf unter -110 dBc unterdrückt ist.

Binäre Josephson-Spannungsnormale finden Anwendung in Impedanz-Messbrücken. Eine neuentwickelte Messbrücke erlaubt die Kalibrierung verschiedener Verhältnisse gleichartiger Impedanzen über eine große Bandbreite mit hoher Präzision innerhalb einer kurzen Messzeit. Innerhalb von nur 60 Minuten können automatisierte Messungen über einen Frequenzbereich von 25 Hz bis 20 kHz durchgeführt werden. Das Messsystem soll zu einem universellen Komparator für beliebige Impedanzverhältnisse weiterentwickelt werden.

Sehr gute Fortschritte wurden beim Technologietransfer quantenbasierter Spannungsnormale in die Industrie gemacht. Im Rahmen des MNPQ-Transfer-Programms (Messen, Normen, Prüfen, Qualitätssicherung) des Bundeswirtschaftsministeriums wird ein Josephson-Messsystem für Gleich- und Wechselspannungen für den Einsatz in Kalibrierlaboratorien entwickelt. Das Basismodul für die Messung von Gleichspannungen mit einer relativen Unsicherheit von  $10^{-10}$  ist bereits fertiggestellt und wurde erfolgreich bei einem Vor-Ort-Einsatz bei einem akkreditierten Kalibrierlabor getestet. Für Kalibrierlabore werden mit dem neuen System die Vorteile von Quantennormalen nutzbar: hervorragende Messunsicherheiten bei erhöhter Wirtschaftlichkeit durch den Wegfall aufwendiger Rekalibrierungen. An der Erweiterung auf Wechselspannungsmessungen wird im Rahmen des Projekts gearbeitet.



## Elektrische Energiemesstechnik

Elektrische Energiemesstechnik ist die Grundlage für die Entwicklung verlustarmer Energieübertragungstechnologien, die Steuerung von elektrischen Übertragungsnetzen auf der Basis gesicherten Wissens über den Netzzustand und die korrekte Abrechnung elektrischer Energie gemäß den Vorgaben des Eichrechts. Die Forschungsarbeiten im Schwerpunktgebiet *Elektrische Energiemesstechnik* erfolgen im Rahmen von EMRP-Projekten, bei denen es um die metrologischen Grundlagen einer verlässlichen und nachhaltigen Energieversorgung unter Einbindung regenerativer Energiequellen geht.

Im Rahmen des gleichnamigen EMRP-Projektes entwickelt die Abteilung Messtechnik für Hochspannungs-Gleichstromübertragungsnetze (HGÜ-Netze). Die HGÜ-Technik spielt eine wichtige Rolle bei der Weiterentwicklung des Stromnetzes, z. B. um Off-Shore-Windkraftanlagen in das Versorgungsnetz einzubinden. Die Spannungsverläufe in HGÜ-Netzen weisen Welligkeiten auf, die die Energiemessung beeinträchtigen können. Daher wird ein Verfahren zur Erzeugung und Erfassung von Welligkeiten („Rippeln“) auf hohem Gleichspannungspotenzial entwickelt (Bild 7).

Durch die Einbindung regenerativer Energiequellen werden im Stromnetz der Zukunft („Smart Grid“) vermehrt breitbandige elektrische Signale auftreten. Daher entwickelt die Abteilung im Rahmen des EMRP-Projekts „Metrology for Smart Electrical Grids“ eine Stromwandler-Messeinrichtung, die rückgeführte Messungen des Übersetzungsverhältnisses von Stromwandlern im Frequenzbereich von 16,7 Hz bis etwa 20 kHz ermöglichen soll. Um die Umgestaltung der Energieversorgungsnetze hin zu zukunftsfähigen Versorgungsinfrastrukturen zu un-

terstützen, hat sich die PTB an der Ausarbeitung der Versionen 1.0 und 2.0 der Deutschen Normungsroadmap E-Energy/Smart Grid beteiligt. Die Version 2.0 wurde von der „Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE“ im Jahr 2012 herausgegeben. Ein Schwerpunkt des PTB-Engagements im Jahr 2012 war das Thema Nutzungsfreundlichkeit von Smart Metern.

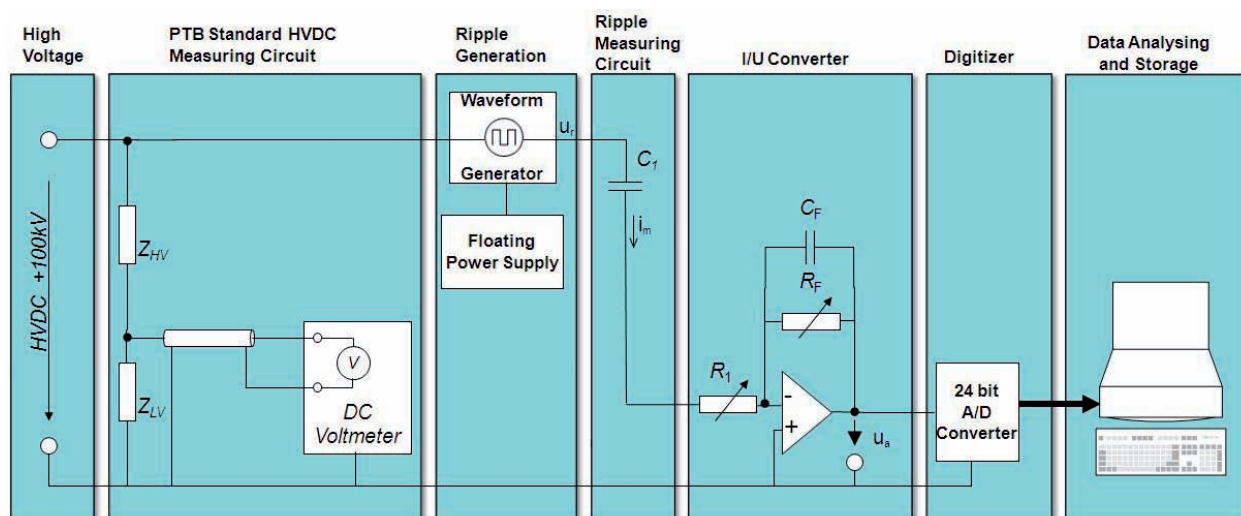
## Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie

Im Schwerpunktgebiet *Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie* werden die Messmöglichkeiten im GHz- und THz- Frequenzbereich systematisch ausgebaut und zur Bearbeitung gesellschaftlich relevanter Messaufgaben, z. B. im Bereich der Luftverkehrssicherheit, eingesetzt.

Zur Darstellung und Weitergabe der Grundgröße Hochfrequenzleistung wurde im Berichtsjahr ein Hohlleitermikrokalorimeter für den Frequenzbereich 50 GHz–75 GHz aufgebaut und in Betrieb genommen. Die PTB kann nun Kalibrierungen dieser Schlüsselgröße lückenlos im Frequenzbereich von 200 kHz bis 110 GHz anbieten.

Die laserbasierten, optoelektronischen Messverfahren wurden ebenfalls weiterentwickelt. Frequenzmessungen mithilfe von Frequenzkämmen können inzwischen in einem weiten Frequenzbereich von 30 GHz bis zu 28 THz durchgeführt werden. Auch die Bestimmung der relativen Amplitude und Phase von Freiraumstrahlung konnte demonstriert werden (Bild 8).

Bild 7: Schema des Messaufbaus zur Erfassung von Welligkeiten („Rippeln“) auf hohem Gleichspannungspotenzial



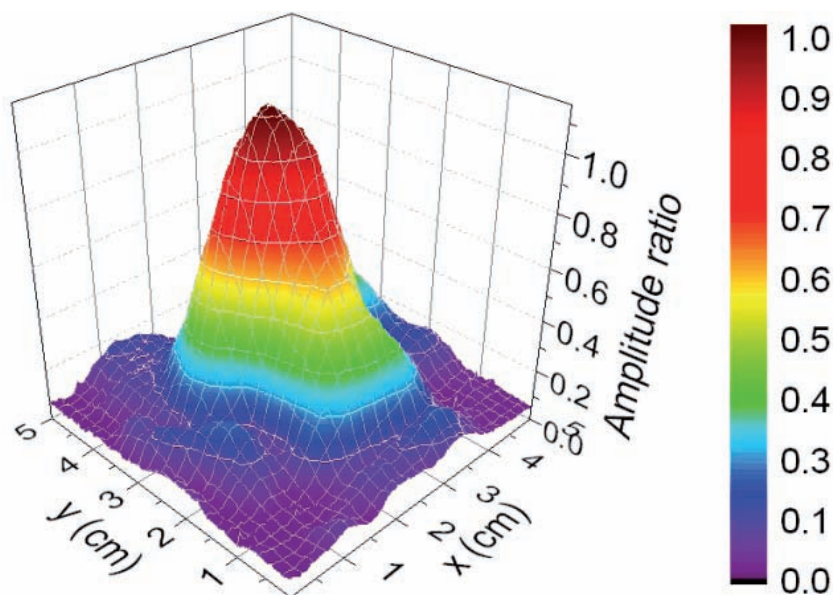


Bild 8: Ortsaufgelöste relative Amplitude der Strahlung eines kommerziellen Sub-THz-Emitters (Vervielfacherkaskade mit einem Standard-Gain-Horn als Antenne, Frequenz 100 GHz)

Die Wirkung von hochfrequenten Feldern, wie sie z. B. im Mobilfunk verwendet werden, auf biologisches Gewebe ist ein hochaktuelles Thema. Die Abteilung bringt auf diesem Gebiet ihre metrologische Expertise in Projekte im Bereich der Lebenswissenschaften ein, um sicherzustellen, dass bei entsprechenden Untersuchungen die Feldexposition reproduzierbar ist und rückführbar gemessen werden kann (Bild 9).

Die Funknavigationsanlagen an Verkehrsflughäfen werden regelmäßig überprüft, um zu gewährleisten, dass die Feldstärke der ausgesendeten Navigationssignale den international verbindlichen Vorgaben entspricht. Diese Überprüfung geschieht mit Messflugzeugen, die entsprechende Empfängerantennen tragen. Zur Validierung dieser Methode hat die Abteilung gemeinsam mit einem Flugvermessungsunternehmen ein unabhängiges Verfahren zur Feldstärkemessung im freien Raum entwickelt. Dabei

wird für die rückgeführte, absolute Feldstärkemessung ein neuentwickeltes Antennensystem eingesetzt, das von einem Hubschrauber positioniert wird (Bild 10). Bei einem ersten Test wurde die flugzeugbasierte Feldstärkemessung mit dem neuentwickelten Messsystem erfolgreich validiert.

**Metrologie für magnetische Nanostrukturen**

Im Schwerpunktgebiet *Metrologie für magnetische Nanostrukturen* werden die Arbeiten zu den Grundlagen nanomagnetischer Messtechnik zunehmend durch die Entwicklung angewandter Messtechnik ergänzt.

Bauelemente, die auf magnetischen Dünnschichtsystemen basieren, haben zahlreiche industrielle Anwendungen, z. B. im Bereich der Datenspeicherung oder als magnetische Sensoren. Sowohl im Bereich der Forschung und Entwicklung als auch

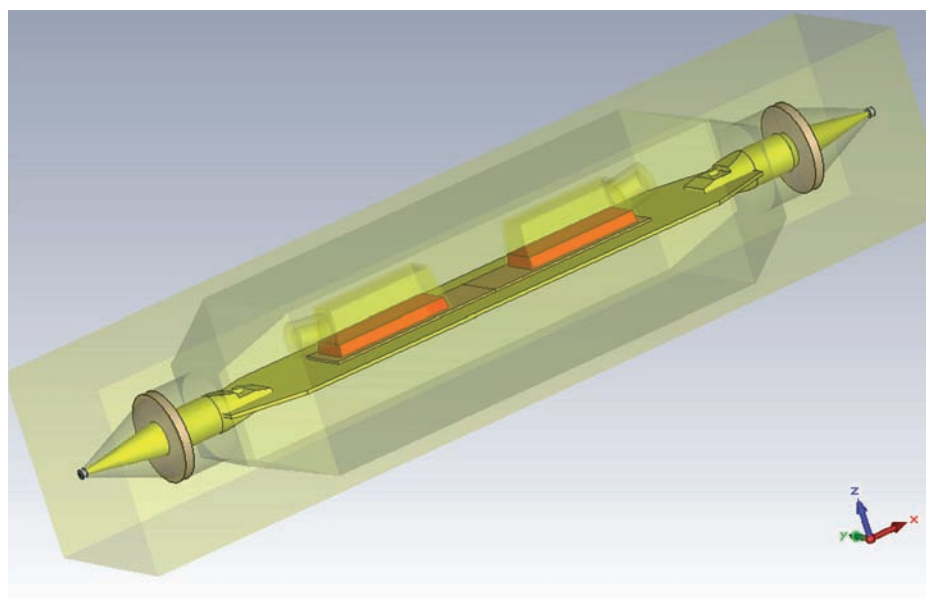


Bild 9: Computermodell einer  $\mu$ TEM-Zelle mit zwei Probenbehältern zur Berechnung der spezifischen Absorptionsrate bei der Feldexposition



Bild 10: Referenzantenne (Mitte) und Empfangseinrichtung (roter Kasten), positioniert von einem Hubschrauber

Dünnschichten ein induktiver Messkopf entwickelt, der die nicht-invasive Charakterisierung der dynamischen und statischen Eigenschaften magnetischer Schichten erstmals an kompletten Wafern ermöglicht (Bild 11). Die Messung basiert auf der Methode der ferromagnetischen Resonanz. Da der Messkopf an verschiedenen Stellen eines Wafers positioniert werden kann, ist es möglich, die Variation der magnetischen Eigenschaften über einen Wafer zu untersuchen.

Im Grundlagenbereich konzentrieren sich die Arbeiten auf die Spin-Kaloritronik, ein hochaktuelles Themengebiet, das sich mit thermischen Effekten in der Spin-Elektronik beschäftigt. Die Arbeiten der Abteilung werden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Spin Caloric Transport“ gefördert und haben zum Ziel, die Zusammenhänge zwischen Magnetowiderstand, Thermospannung und thermoelektrischem Strom in magnetischen Tunnelstrukturen aufzuklären.

bei der Produktion dieser Bauelemente werden Messverfahren benötigt, mit denen die Materialparameter der Schichten nach den verschiedenen Prozessschritten bestimmt werden können. Daher wurde im Berichtsjahr zur prozessbegleitenden und schnellen Charakterisierung von magnetischen

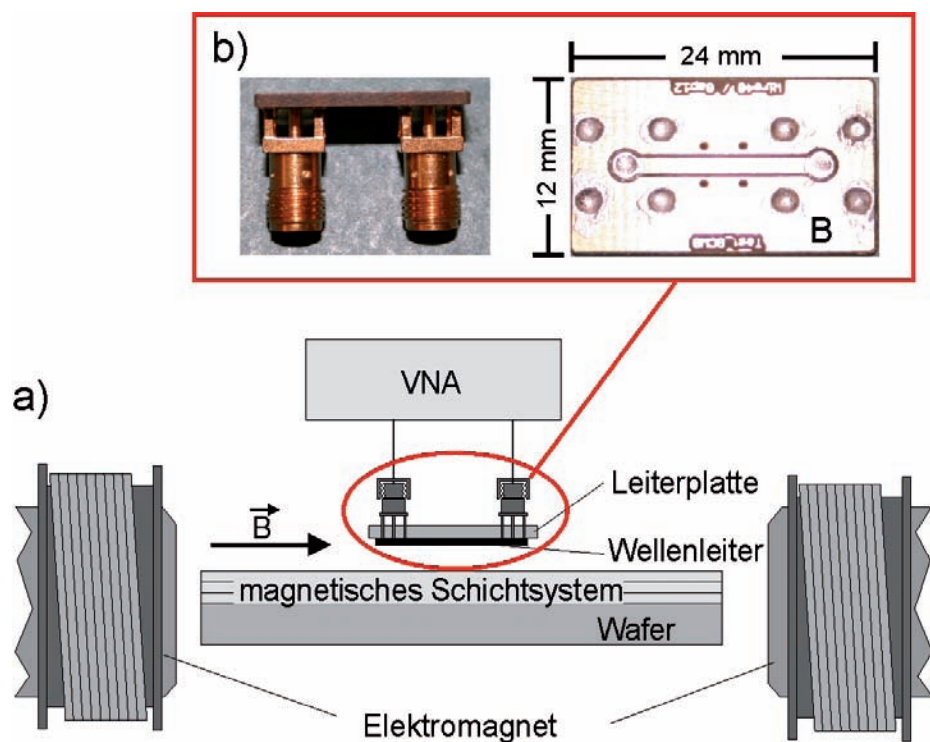


Bild 11: Induktiver Messkopf in Seiten- und Aufsicht (b) sowie schematische Darstellung des Messsystems mit Ausleseelektronik (VNA) und Elektromagnet zur Erzeugung des äußeren Magnetfeldes  $B$  (a)

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Hochstabiler Sinusgenerator für die Anwendung in einer Quadraturbrücke

Zur Rückführung der Kapazitätseinheit Farad auf den Wechselstrom-Quanten-Hall-Widerstand nutzt man eine Quadraturbrücke, die bei einer festen, präzise bekannten Frequenz betrieben werden muss. Dafür wurde ein spezieller Generator entwickelt, dessen rein sinusförmige Ausgangsspannung ohne Verwendung von Regelschleifen direkt aus einer von Atomuhren gelieferten 10-MHz-Normalfrequenz abgeleitet wird. (G. Ramm, FB 2.1, [guenther.ramm@ptb.de](mailto:guenther.ramm@ptb.de))

#### Berechenbare planare Kalibriernormale für Streuparametermessungen

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrotechnologie der TU Braunschweig und Industriepartnern wurden planare Kalibriernormale entwickelt und gefertigt, die Übergänge von hochresistivem Silizium zu einem in Membrantechnologie gefertigten koplanaren Wellenleiter beinhalten. Die planaren Kalibriernormale zeigten im Bereich bis 110 GHz deutlich bessere breitbandige Eigenschaften als auf hochleitfähigem Silizium gefertigte Normale. (U. Arz, FB 2.2, [uwe.arz@ptb.de](mailto:uwe.arz@ptb.de))

#### Verbesserte, rauschreduzierte Charakterisierung von Wechsellsignalen bei adaptiver Signalabtastung

Als Ergebnis theoretischer und messtechnischer Untersuchungen wurden Verfahren adaptiver Filterung entwickelt, mit denen bei abgetasteten Spannungssignalen der Einfluss des Rauschens auf die Messunsicherheit verringert werden kann. (W. G. Kürthen Ihlenfeld, FB 2.3, [guilherme.ihlenfeld@ptb.de](mailto:guilherme.ihlenfeld@ptb.de))

#### Welligkeitsmessungen für Anwendungen der Hochspannungs-Gleichstromübertragung

Die Spannungsverläufe in Hochspannungs-Gleichstromübertragungsnetzen (HGÜ-Netze) weisen Welligkeiten auf, die die Energiemessungen beeinträchtigen können. Die 2011 vorgestellten Messeinrichtungen und Verfahren zur Bestimmung von Welligkeitsparametern der Spannungen in HGÜ-Netzen wurden weiterentwickelt. (J. Meisner, FB 2.3, [johann.meisner@ptb.de](mailto:johann.meisner@ptb.de))

#### Stromwandler-Messeinrichtung zur Bestimmung der Frequenzabhängigkeit

Im Rahmen des von der EU geförderten Gemeinschaftsprojekts „Metrology for Smart Electrical Grids“, an dem mehrere europäische Metrologieinstitute und Universitäten beteiligt sind, befasst sich die PTB mit dem Aufbau einer auf nationale Normale rückführbaren Messmöglichkeit zur Bestimmung des Frequenzgangs von Stromwandlern nach Betrag und Phase. (E. Mohns, FB 2.3, [enrico.mohns@ptb.de](mailto:enrico.mohns@ptb.de))

#### 20-Volt-Schaltungen für das programmierbare Josephson-Spannungsnormale (PJVS) der PTB

Die weltweit ersten voll funktionsfähigen 20-Volt-Spannungsnormale-Schaltungen mit ca. 140 000 Josephsonkontakten für den Einsatz bei 70 GHz wurden durch die PTB hergestellt und charakterisiert. Ein direkter On-Chip Vergleich zwischen den beiden 10-V-Hälften der binär unterteilten Serienschaltung bestätigte die metrologische Eignung der 20-Volt Schaltungen für DC- und AC-Anwendungen. (F. Müller, FB 2.4, [franz.mueller@ptb.de](mailto:franz.mueller@ptb.de))

#### Direkter Vergleich zweier Wechsellspannungen aus pulsgetriebenen Josephson-Schaltungen

In einem direkten Vergleich zweier Sinus-Wellenformen aus pulsgetriebenen Josephson-Schaltungen (JAWS) wurde eine relative Übereinstimmung von  $(1,6 \pm 2,9) \times 10^{-8}$  gefunden. Die sehr gute Übereinstimmung demonstriert die ausgezeichnete Quantisierung der Spannungen der Josephson-Schaltungen. (O. Kieler, FB 2.4, [oliver.kieler@ptb.de](mailto:oliver.kieler@ptb.de))

#### Hybride Supraleiter-Normalleiter-Einzelelektronenfalle als Einzel-Mikrowellenphotonen-Detektor

Eine Supraleiter(Al)-Normalleiter(AuPd)-Einzelelektronenfalle wurde hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber Mikrowelleneinstrahlung im Frequenzbereich um 50 GHz untersucht. Durch Absorption einzelner Mikrowellen-Photonen, die von einem benachbarten Einzelladungstransistor erzeugt werden, kommt es zu Anregungen, die einzelnen Elektronen das Entweichen aus der Falle ermöglichen. Dieses Verhalten wurde mithilfe eines zweiten Transistors zeitaufgelöst registriert. (S. Lotkhov, FB 2.4, [sergey.lotkhov@ptb.de](mailto:sergey.lotkhov@ptb.de))

## **Magnetfeldabhängigkeit der kritischen Stromstärke von Josephson-Kontakten mit Nb<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>-Barriere**

Die Stromverteilung in Josephson-Kontakten mit Nb<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>-Barriere wurde untersucht, indem die Abhängigkeit der kritischen Stromstärke vom angelegten Magnetfeld gemessen wurde. Die Kontakte zeigen eine hohe Qualität mit homogener Stromverteilung. (T. Scheller, FB 2.4, thomas.scheller@ptb.de)

## **Einzelelektronenströme nachgezählt**

Einzelelektronenpumpen ermöglichen die Erzeugung eines Stromes durch kontrollierten Einfang und Transport einzelner Elektronen. Der PTB gelang es nun erstmals, die Einfangstatistik einer Halbleiter-Einzelelektronenpumpe durch Nachweis einzelner Elektronen mit einer speziellen Detektorschaltung zu überprüfen. (M. Wulf, F. Hohls, FB 2.5, frank.hohls@ptb.de)

## **Mikroampereströme durch Kontrolle einzelner Elektronen**

Halbleiterbasierte Einzelelektronenpumpen ermöglichen die Erzeugung eines elektrischen Stroms durch kontrollierten Transport einzelner Elektronen. Allerdings sind die so erzeugten Stromstärken sehr klein. Durch Verbindung mit einer präzisen Gleichstromskalierung konnte in der PTB erstmals eine Stromstärke von nahezu einem Mikroampere basierend auf der Kontrolle einzelner Elektronen erzeugt werden. (F. Hohls, FB 2.5, frank.hohls@ptb.de)

## **Thermoelektrische Ströme in magnetischen Nanokontakten**

In magnetischen Tunnelstrukturen wurden magnetisch schaltbare thermoelektrische Ströme und Spannungen nachgewiesen. (H. W. Schumacher, FB 2.5, hans.w.schumacher@ptb.de)

## **Ultrabreitband-Spannungsimpulsstandard**

Mittels laserbasierter optoelektronischer Messtechnik wurde ein Ultrabreitband-Spannungsimpulsstandard auf einer koplanaren Wellenleitung realisiert. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

## **Vollständige Charakterisierung von GHz- und THz-Emittern**

Unter Verwendung laserbasierter optoelektronischer Methoden wurde die Abstrahlcharakteristik (Frequenz, Phase und relative Amplitude) von Hochfrequenzantennen in einem sehr weiten Frequenzbereich räumlich aufgelöst gemessen. (H. Füsser, FB 2.5, heiko.fuesser@ptb.de)

## **Neuartige Fotoströme**

Die optisch induzierte Kohärenz in Halbleitern hat einen starken Einfluss auf die Erzeugung von Fotoströmen. Folgt die Kohärenz nicht unmittelbar einem gepulsten elektrischen Anregungsfeld, treten unter bestimmten Anregungsbedingungen neuartige Fotoströme auf. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

## **Rausch- und Korrelationsmessungen: neue Erkenntnisse zum Quanten-Hall-Widerstand**

Simultane Messungen des thermischen Rauschens an verschiedenen Kontaktpaaren einer Quanten-Hall-Probe haben erstmalig den Nachweis von Korrelationen erlaubt, die als Erweiterung der klassischen Johnson-Nyquist-Beziehung verstanden werden können. Darüber hinaus zeigen Rauschmessungen mit externem Strom pulsartige Dissipationsausbrüche, die einen neuen Einblick in den Zusammenbruch des Quanten-Hall-Effekts erlauben. (J. Schurr, FB 2.6, juergen.schurr@ptb.de)

## **Doppelt-geschirmte Quanten-Hall-Proben als Impedanz-Quantennormal**

Die vor einigen Jahren in der PTB entwickelte Doppelschirmung von Quanten-Hall-Proben erlaubt die Realisierung eines hochpräzisen Impedanz-Quantennormals. Das japanische Metrologieinstitut NMIJ hat diese Idee aufgegriffen und eine neuartige „on-chip“-Schirmung entwickelt, die gemeinsam mit der PTB getestet wurde. (J. Schurr, FB 2.6, juergen.schurr@ptb.de)

## **Kombinierte Josephson-Systeme für spektral reine Wellenformen mit großen Amplituden**

Die Kombination zweier Josephson-Synthesizer erlaubt die Synthese von spektral reinen Wellenformen mit Amplituden größer als 1 V. (R. Behr, FB 2.6, ralf.behr@ptb.de)

## **Josephson-Messbrücke als universeller Komparator für beliebige Impedanzverhältnisse**

Eine neuentwickelte Messbrücke mit programmierbaren Josephson-Schaltungen erlaubt nun auch die Kalibrierung beliebiger Impedanzverhältnisse über eine große Bandbreite mit hoher Präzision und innerhalb kurzer Messzeit. (L. Palafox, FB 2.6, luis.palafox@ptb.de)

## **Präzisionsmessung des Quanten-Hall-Effekts in transferiertem Graphen**

Erstmals wurde der quantisierte Hall-Widerstand mit einer metrologisch relevanten Präzision an Graphenfilmen gemessen, die auf ein Wirtssubstrat transferiert wurden. Zuvor war dies nur mit Gra-

phen gelungen, das direkt auf SiC aufgewachsen worden war. (F. J. Ahlers, FB 2.6, franz-josef.ahlers@ptb.de)

### **Flexible Sputter-Technologie zur Herstellung von $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gate-Isolatoren auf Graphen**

Isolationsschichten für Elektroden zur Steuerung der Ladungsträgerdichte in Graphen wurden mit einem vereinfachten Verfahren hergestellt. (F. J. Ahlers, FB 2.6, franz-josef.ahlers@ptb.de)

## **Metrologie für die Wirtschaft**

### **Dynamisches Brückennormal schafft Voraussetzung für den industriellen Einsatz dynamischer Kraft-, Drehmoment- und Druckmessungen**

Das in der PTB entwickelte dynamische Brückennormal schafft die Voraussetzung zur dynamischen Kalibrierung von Messverstärkern, die für eine Vielzahl industrieller Messanwendungen von dynamischen mechanischen Größen (z. B. Kraft, Drehmoment oder Druck) eingesetzt werden. (F. Beug, FB 2.1, florian.beug@ptb.de)

### **Neuaufbau der Skalen für den AC-DC-Transfer in der PTB mit reduzierten Messunsicherheiten**

Durch Ausnutzung des vollen Dynamikbereichs der Mehrfachthermokonverter für den AC-DC-Transfer wurde die Anzahl der Skalierungsstufen verringert. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

### **Automatisierte Kapazitätsmessbrücke für die Kalibrierung von Kondensatoren mit einem Nennwert von 10 nF bis 10 mF**

Es wurde eine automatisierte Kapazitätsmessbrücke für die Kalibrierung von großen Kapazitäten in einem weiten Frequenzbereich entwickelt. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

### **Charakterisierung eines 2-Kanal-Digitalisierers mit Differenzeingängen**

Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten eines zweikanaligen Hochgeschwindigkeits-Digitalisierers. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

### **Ein neues Gerät für die signalform-unabhängige Leistungsmessung**

Es wurde eine neuartige Messmethode zur Leistungs- und Effektivwertmessung von Signalen mit beliebigen zeitlichen Verläufen entwickelt sowie ein Prototyp eines Messgerätes aufgebaut und erprobt. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

### **Hochfrequenz-Leistungskalibrierung nun lückenlos im Frequenzbereich 200 kHz bis 110 GHz**

Mit dem Aufbau und der Inbetriebnahme eines Hohlleitermikrokalorimeters für den Frequenzbereich 50 GHz – 75 GHz komplettiert die PTB ihr Leistungsangebot für die rückgeführte Kalibrierung von Hochfrequenzleistungssensoren bis 110 GHz. (R. Judaschke, FB 2.2, rolf.judaschke@ptb.de)

### **Erweitertes Modenanpassungs-Verfahren im Split-Zylinder-Resonator zur Bestimmung der komplexen Permittivität dielektrischer Materialien**

Das aus der Fachliteratur bekannte und in der Messpraxis gängige  $\text{TE}_{\text{onp}}$  Modenanpassungs-Verfahren im Split-Zylinder-Resonator wurde erweitert, so dass nun auch allgemeine  $\text{TE}_{\text{mnp}}$ -,  $\text{TM}_{\text{mnp}}$ - sowie Hybrid-Moden im Frequenzspektrum erfasst werden können. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

### **Neues Adapter-Charakterisierungsverfahren entwickelt**

In Zusammenarbeit mit dem National Institute of Standards and Technology (NIST) in den USA ist ein neues Verfahren zur Charakterisierung von Übergängen zwischen Wellenleitern verschiedener Bauart entwickelt worden. Das Verfahren wurde erstmalig zur Charakterisierung von Mikrowellenprüfspitzen eingesetzt, die einen Übergang zwischen Hohlleitern im WR-8-Band (90 GHz – 140 GHz) und koplanaren Wellenleitern darstellen. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

### **Induktiver Messkopf für die nicht-invasive Charakterisierung magnetostatischer und dynamischer Parameter magnetischer Dünnschichtsysteme**

Prozessbegleitende und schnelle Charakterisierungstechniken für magnetische Dünnschichten sind u. a. wichtig bei der Entwicklung und Produktion magnetischer Sensoren. In der PTB wurde ein induktiver Messkopf entwickelt, der die nicht-invasive Charakterisierung der dynamischen und statischen Eigenschaften magnetischer Schichten erstmals an kompletten Wafern ermöglicht. (S. Sievers, FB 2.5, sibylle.sievers@ptb.de)

### **MNPQ-Projekt „AC-Quantenvoltmeter“ – DC Plattform gelegt**

Im Rahmen des Programms „MNPQ – Messen, Normen, Prüfen und Qualitätssicherung“ ist ein Technologietransferprojekt zur Etablierung von quantenbasierten Wechselspannungsnormalen in der Industrie erfolgreich gestartet. (J. Lee, FB 2.6, jinni.lee@ptb.de)

## Metrologie für die Gesellschaft

### **Bestimmung der Effizienz thermoelektrischer Materialien mit der Van-der-Pauw-Methode**

Im Rahmen des EMRP-Projektes „Energy Harvesting“ wurde ein Messplatz aufgebaut, mit dem sich auf einfachem Wege die elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie der Seebeck-Koeffizient von thermoelektrischen Materialien bestimmen lassen. (B. Schumacher, FB 2.1, bernd.schumacher@ptb.de)

### **Start des Projekts „Einfluss hochfrequenter Felder des Mobilfunks auf das blutbildende System in vitro“**

Im Rahmen des vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) geförderten Projekts „Einfluss hochfrequenter Felder des Mobilfunks auf das blutbildende System in vitro“ untersucht die PTB zusammen mit dem Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Universität Würzburg die Auswirkungen der Exposition von Blutzellen durch hochfrequente Felder. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

### **Rückgeführte Feldstärkemessung terrestrischer Navigationsanlagen**

Gemeinsam mit einem Flugvermessungsunternehmen wurde ein Messsystem zur absoluten Feldstärkemessung von terrestrischen Navigationsanlagen der Flugsicherung entwickelt. Das Ziel der Entwicklung war ein neues und vollkommen unabhängiges Verfahren zur Feldstärkemessung im freien Raum. Dieses dient dazu, die regelmäßig mit Messflugzeugen durchgeführten Flugvermessungen an Verkehrsflughäfen zu validieren. (T. Schrader, FB 2.2, thorsten.schrader@ptb.de)

### **Untersuchungen zur Messung elektromagnetischer Felder und Antennen unter Einsatz von Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)**

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde gemeinsam mit der FH Ostfalia Braunschweig-Wolfenbüttel ein Oktokopter-Sensor zur Messung elektromagnetischer Felder im freien Raum bzw. für Messungen an großen, fest installierten Antennenanlagen (wie z. B. Instrumentenlandesystemen) aufgebaut. Der neuentwickelte 3D-Sensor kann die elektrische Hochfrequenz-Feldstärke bei 110 MHz skalar erfassen. Nach der Implementierung des Sensors am Oktokopter wurden erste Testflüge erfolgreich durchgeführt. (T. Schrader, FB 2.2, thorsten.schrader@ptb.de)

## **Mitgestaltung der deutschen Normungsroadmap E-Energy/Smart Grid**

Sowohl auf nationaler wie auch auf europäischer Ebene erfolgt die Umgestaltung der Energieversorgungsnetze hin zu zukunftsfähigen Versorgungsinfrastrukturen durch Staat und Organe der wirtschaftlichen Selbstverwaltung Hand in Hand. In diesem Zusammenhang hat sich die PTB, wie schon bei der Version 1.0, auch an der Ausarbeitung der Version 2.0 der Deutschen Normungsroadmap E-Energy/Smart Grid beteiligt, die die „Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE“ im Jahr 2012 herausgegeben hat. Ein Schwerpunkt des PTB-Engagements lag dabei diesmal auf dem Thema Nutzungsfreundlichkeit von Smart Metern (M. Kahmann, FB 2.3, martin.kahmann@ptb.de)

## **Internationale Angelegenheiten**

### **Joint Research Project „Microwave and terahertz metrology for homeland security (THz Security)“ gestartet**

Im Juni 2012 ist der Startschuss für das Joint Research Project „Microwave and terahertz metrology for homeland security (THz Security)“ gefallen, in dem die PTB zusammen mit fünf weiteren nationalen Metrologieinstituten und weiteren Partnern aus Industrie, Forschungsinstituten und Universitäten an der Rückführung von Messgrößen für neuartige THz-Systeme arbeitet, die vorwiegend in der Sicherheitstechnik eingesetzt werden. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

### **Joint Research Project „Quantum ampere: Realisation of the new SI ampere“ gestartet**

Zum 1. Mai 2012 wurde das Joint Research Project (JRP) SIB07 Qu-Ampere „Quantum ampere: Realisation of the new SI ampere“ gestartet, das im Call 2011 „SI Broader Scope I“ des European Metrology Research Programme (EMRP) erfolgreich beantragt worden war. Der PTB-Fachbereich 2.6 *Elektrische Quantenmetrologie* koordiniert dieses Projekt mit dreijähriger Laufzeit und einem Gesamtbudget von knapp drei Millionen Euro. Das Konsortium umfasst die vier JRP-Partner PTB (D), LNE (F), MIKES (FI) sowie NPL (UK). Es wird komplettiert von drei Instituten am CEA Grenoble (F), University of Cambridge (UK) sowie Aalto University (FI), welche durch Arbeiten beitragen, die im Rahmen von Researcher Excellence Grants gefördert werden. (H.Scherer, FB 2.6, hansjoerg.scherer@ptb.de)

Abteilung 3  
Chemische Physik und  
Explosionsschutz





### Entwicklung von Normen zur Bestimmung von sicherheitstechnischen Kenngrößen bei nicht-atmosphärischen Bedingungen

Viele chemische Produktionsprozesse werden bei nicht-atmosphärischen Bedingungen – z. B. bei erhöhten Temperaturen, erhöhten Drücken oder anderen Oxidationsmitteln als Luft – durchgeführt. Falls explosionsfähige Gemische entstehen können, ist die Kenntnis der relevanten sicherheitstechnischen Kenngrößen unter diesen Betriebsbedingungen notwendig. Daher fordert auch die Gefahrstoffverordnung die Berücksichtigung nicht-atmosphärischer Bedingungen.

Die Bestimmungsverfahren für sicherheitstechnische Kenngrößen unter atmosphärischen Bedingungen sind europäisch genormt. Im Rahmen des Förderprogrammes des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie „Transfer von FuE-Ergebnissen durch Normung und Standardisierung“ erarbeiten BAM und PTB in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben Modifikationen der genormten Bestimmungsverfahren für sicherheitstechnische Kenngrößen von Gasen und Dämpfen mit dem Ziel, sie auch für nicht-atmosphärische Bedingungen zur Normungsreife zu entwickeln.

Die Schwerpunkte der vorgesehenen Modifikationen liegen bei der Bewertung alternativer Zündquellen und Zündkriterien sowie den Anforderungen an die Versuchseinrichtung, denn die bei den Bestimmungsverfahren gemäß der Normen EN 1839, EN 14756 und EN 15967 als Zündquelle eingesetzte Induktionsfunkenstrecke ist für erhöhte Ausgangsdrücke nur bedingt einsetzbar. Die Untersuchungen zeigen, dass als Zündquelle für erhöhte Ausgangsdrücke der sogenannte Schmelzdraht für alle in Frage stehenden Normen einsetzbar ist.

Aktuell werden Untersuchungen hinsichtlich des Zündkriteriums durchgeführt. Als Alternative zum bisherigen visuellen Kriterium wird zurzeit ein (Mindest-) Druck- oder Temperaturanstieg untersucht. Damit solche Kriterien konsistent zur visuellen Beurteilung der Flammenablösung festgelegt werden können, werden in einem speziell dafür

Titelbild:

Entzündung eines Propan/Luft-Gemisches bei 20 bar und Umgebungstemperatur mit einer Zusammensetzung kurz oberhalb der „Unteren Explosionsgrenze“ UEG (Aufnahme BAM)

angefertigten, bis 180 bar druckfesten Gefäß mit Fenstern Temperatur- und Druckverläufe nach der Zündung aufgezeichnet und mit den Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera verglichen, die es erlauben, die Flammenablösung zu beobachten (vgl. Titelbild).

### Vermeiden gefährlicher Überdrücke beim Beladen von Tankfahrzeugen

Beim Befüllen von Tankfahrzeugen für Mineralölprodukte traten mehrfach Schäden auf (z. B. Aufreißen der Tankhülle oder der Trennwand zwischen zwei Tankkammern), weil offensichtlich in der betroffenen Tankkammer ein zu hoher Druck entstanden war. Diese Schäden wurden nur bei Tankfahrzeugen für Mineralölprodukte beobachtet, die im Bottomloading-Verfahren befüllt wurden.

Ziel eines Forschungsvorhabens in Zusammenarbeit mit der Mineralölwirtschaft und Tankwagenherstellern war, mögliche Ursachen für diese Überdruckschäden zu ermitteln. Hierzu wurden die heute übliche Ausrüstung von Tankfahrzeugen bewertet und mögliche Fehlerquellen ermittelt. In Messungen an zwei Füllstellen wurden reale Druck-, Temperatur- und Volumenstromverhältnisse für die Beladung eines Tankfahrzeugs aufgenommen. Parallel wurde in einer Kältekammer die Vereisung von Tankwagenarmaturen (Kippventil und Flammendurchschlagsicherung) ermittelt.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass im Normalbetrieb kein unzulässiger Druck in einer Tankwagenkammer entstehen kann. Störungen und Fehler können allerdings zu kritischen Überdrücken führen. So können bei bestimmten Betriebsbedingungen Kippventile oder Flammensperren vereisen (Bild 1), was zu hohen Drücken führen kann. Solche Überdrücke könnten aber rechtzeitig durch eine geeignete Druckmessung in jeder Tankwagenkammer erkannt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung unzulässiger Drücke wäre die Ausrüstung jeder Tankwagenkammer mit zwei Kippventil-Flammendurchschlagsicherungsarmaturen.

Weiterhin sind technische Fehler u. a. bei der Überfüllsicherung festgestellt worden. Auch das Bedienungspersonal beeinflusst den Betrieb des Tankfahrzeugs. So können Fehlbedienungen der technischen Einrichtungen des Tankfahrzeugs auftreten, aber auch bewusste Manipulationen.

Die betroffene Industrie hat inzwischen die unterbreiteten Verbesserungsvorschläge zu einem Maß-



Bild 1: Vereistes Kippventil mit engem Ringspalt zwischen Eis und Wand, der zu einem unzulässig hohen Druck geführt hat

nahmenkatalog zusammengestellt. Dieser Maßnahmenkatalog kann von der Homepage der DGMK unter <http://www.dgmk.de/downstream/index.html> als Information 3/2012 bezogen werden.

## Internationales Proficiency Testing Programm

Die PTB organisierte im Rahmen eines internationalen Pilotprojekts die Durchführung von Ringvergleichen mit 44 Laboratorien in den Zündschutzarten „Druckfeste Kapselung“ und „Eigensicherheit“. Zum Abschluss des Pilotprojektes wurde im Juli 2012 ein 4-tägiger internationaler Workshop durchgeführt. Im Rahmen dieses Workshops sammelte

die PTB als Koordinator erste wichtige Erkenntnisse für die weitere Ausgestaltung der Ringvergleiche im Explosionsschutz. Die 57 Teilnehmer aus 32 nationalen und internationalen Laboratorien, hauptsächlich Mitglieder des IECEx-Systems, führten einen regen Erfahrungsaustausch über die Ergebnisse und gaben umfangreiche Hinweise und Anregungen für die weitere Ausgestaltung des PTB Ex Proficiency Testing Schemes. Weiterhin wurden im Ergebnis des Workshops zwei „Best Practice Papers“ für die praktische Durchführung der Prüfverfahren in den Zündschutzarten „Druckfeste Kapselung“ und „Eigensicherheit“ erarbeitet, die unter anderem im IECEx-System in Form von sogenannten „Decision Sheets“ Verwendung finden. Den Teilnehmern

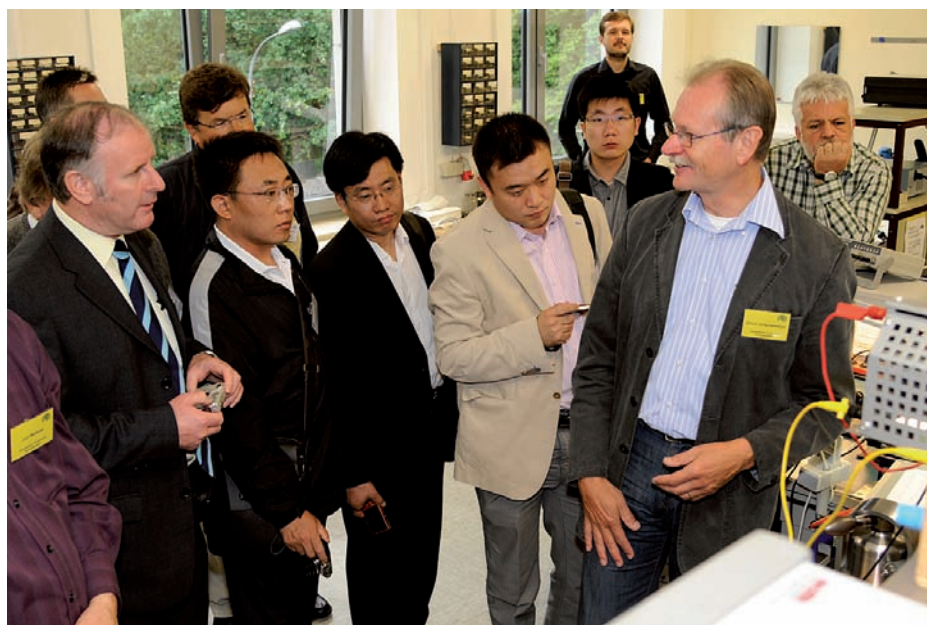


Bild 2: Teilnehmergruppe bei einer der experimentellen Demonstrationen während des Workshops

wurde zum Ende des Workshops ein Fragebogen zur Pilotphase angeboten. Der Workshop lieferte ein wertvolles Feedback für den Aufbau weiterer Ringvergleichsprogramme im Explosionsschutz; die Teilnehmer regten an, regelmäßig derartige internationale Workshops durchzuführen.

## Explosionsschutzspezifische Grenzwerte für Leuchtstofflampen in explosionsgeschützten Langfeldleuchten der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“

In Leuchten der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit werden Leuchtstofflampen entsprechend dem Stand der Technik an elektronischen Vorschaltgeräten mit näherungsweise konstantem Lampenstrom betrieben. In früheren Untersuchungen der PTB war festgestellt worden, dass der bei Alterung der Leuchtstofflampen an der Wendel auftretende erhöhte Spannungsabfall zu höherer Verlustleistung an der Wendel führt. Infolgedessen steigt die Temperatur der Leuchtstofflampe, insbesondere im Wendelbereich, über die normalen Betriebstemperaturen an.

Für Leuchten in der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ ist der Grenzwert der Wendelleistung einer Leuchtstofflampe entsprechend den Anforderungen der IEC/EN 60079-0 festzulegen, die auf die Vermeidung einer Zündgefahr für ein explosionsfähiges Gemisch durch unzulässig hohe Oberflächentemperaturen ausgerichtet sind.

Untersuchungen zur Bestimmung der maximal zulässigen Wendelleistung von T8-Leuchtstofflampen wurden in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt war in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur der Leuchtstofflampe die Oberflächentemperatur der Lampe zu bestimmen, bei der

ein explosionsfähiges Gemisch von der Lampenoberfläche gerade nicht entzündet wird. Ausgehend von diesen Temperaturwerten, wurde mit einem vorgegebenen Sicherheitsabstand von 25 K und einem zusätzlichen pauschalen Sicherheitsabschlag die maximal zulässige Oberflächentemperatur einer T8-Leuchtstofflampe in einem Gehäuse einer explosionsgeschützten Leuchte der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit „e“ festgelegt. (vgl. Bild 3, Grenztemperatur)

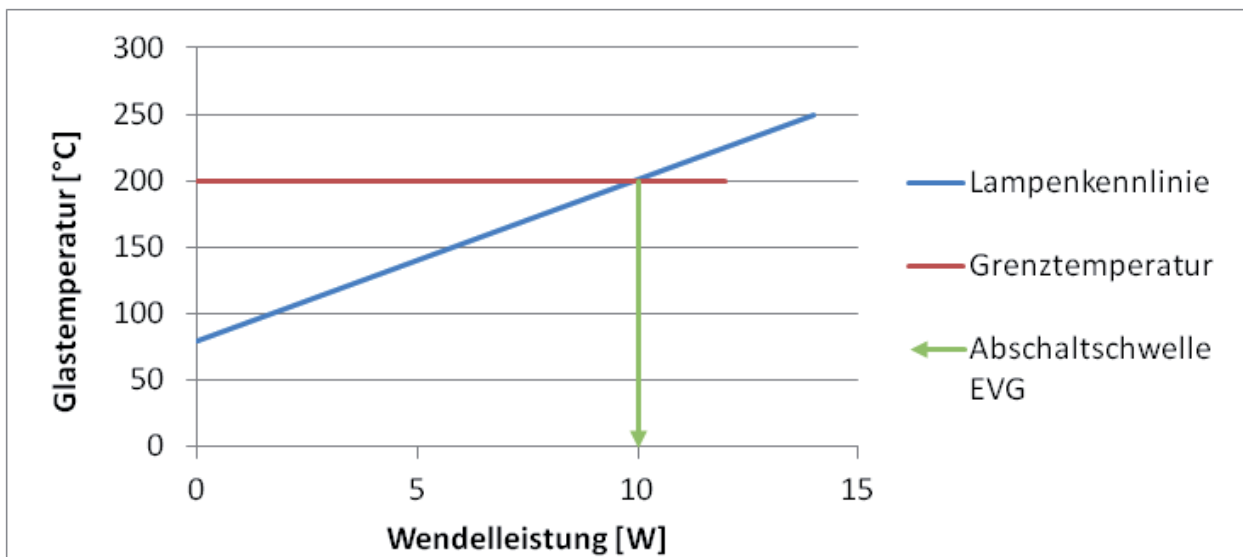
Im zweiten Schritt wurde in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur sowie der elektrischen Nennleistung der T8-Leuchtstofflampe deren Oberflächentemperatur als Funktion der Wendelleistung bestimmt.

Aus der Grenztemperatur und der sicherheitstechnisch ungünstigsten Lampenkennlinie wurde die maximal zulässige Wendelleistung für T8-Leuchtstofflampen von ca. 10 W bestimmt (Bild 3). Dieser Wert, auch als „end-of-life“-Abschaltswelle der entsprechenden elektronischen Vorschaltgeräte in explosionsgeschützten Leuchten der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit bezeichnet, ist der zur Zeit gültige Grenzwert für T-8-Leuchtstofflampen in der Norm IEC/EN 60079-7.

Ein neues Versuchsgefäß für Zündversuche im explosionsfähigen Gemisch gestattete die Bestimmung der Grenztemperatur direkt mit dem zündphysikalisch relevanten Teil der Leuchtstofflampe (Bild 4).

Die Untersuchungsergebnisse werden zurzeit in den internationalen Normungsgremien diskutiert.

Bild 3: Bestimmung der maximal zulässigen Wendelleistung von T8-Leuchtstofflampen (IEC/EN 60079-7)



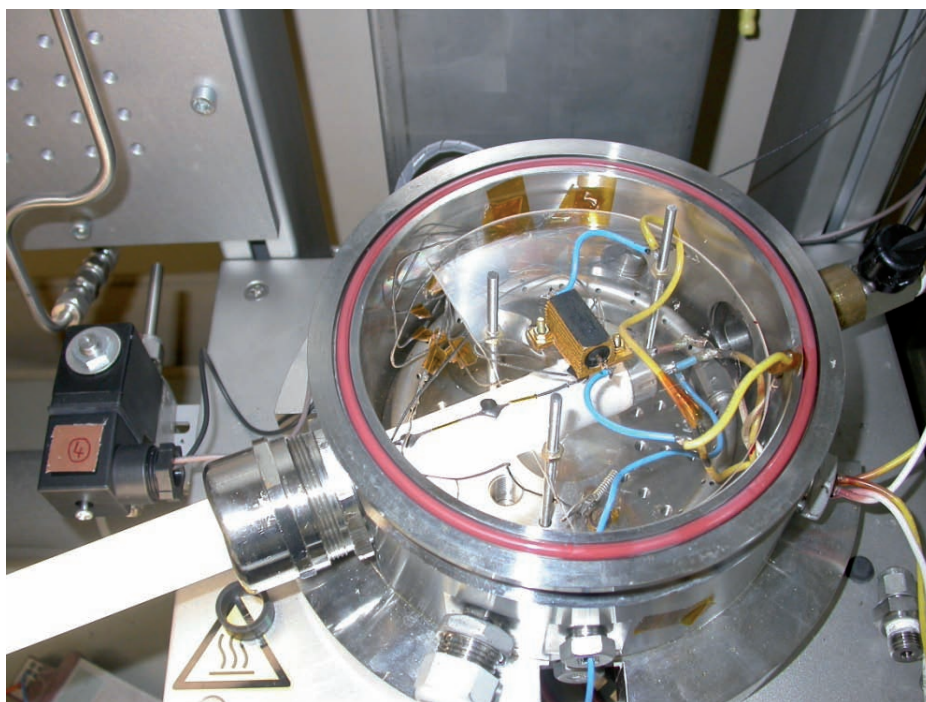


Bild 4: Versuchsaufbau für Zündversuche

## Verifizierung der Messung übertragener Ladungen von Büschelentladungen

Elektrostatische Entladungen sind eine der häufigsten Ursachen von Bränden und Explosionen in der Industrie. Daher müssen alle in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzten Produkte und Verfahren vor ihrem Einsatz auf eine potenzielle Gefährdung durch elektrostatische Entladungen untersucht werden.

Zur Bewertung dieser potenziellen Zündquelle hat sich das Kriterium der übertragenen Ladung einer provozierten Entladung unter kritischsten Bedingungen weltweit etabliert und wird in den einschlä-

gigen Regelwerken beschrieben (z. B. TRBS 2153, IEC TS 60079-32-1).

Dieses Kriterium hat den Vorteil, dass es eine quantitative Bewertung der untersuchten Produkte zulässt. So ist aus dem Messwert nicht nur ersichtlich, ob ein Produkt unter oder über dem zulässigen Grenzwert der übertragenen Ladung liegt, sondern auch, wie weit das Produkt vom sicheren Grenzwert entfernt ist.

In Abhängigkeit von der Häufigkeit des Auftretens explosionsfähiger Atmosphäre und deren notwendiger Zündenergie sind in den genannten Regelwerken zulässige Grenzwerte der übertragenen Ladung



Bild 5: Überreichung des Adolf-Martens-Preises an Tim Langer (Bildmitte)

definiert. Trotz ihrer enormen Relevanz bei der Bewertung von zahlreichen Produkten sind diese Grenzwerte bis zum heutigen Zeitpunkt nie direkt experimentell verifiziert worden.

In der Arbeitsgruppe *Physikalische Zündquellen* wurden deshalb erstmals diese Grenzwerte verifiziert und eine Bestimmung der Messunsicherheit beim Messen der übertragenen Ladung durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass alle bisher verwendeten Grenzwerte als sicher anzusehen sind.

Der Grenzwert für die Explosionsgruppe IIB wies jedoch im Vergleich zu den Grenzwerten der übrigen Explosionsgruppen einen geringeren Sicherheitsabstand auf. Er wurde daher in der neuen IEC TS 60079-32-1:2012 diesbezüglich nach unten korrigiert.

Mit der Verifizierung der Messung der übertragenen Ladungen von Büschelentladungen wurde Tim Langer betraut. Weil seine Arbeit einen fundamentalen Beitrag zu diesem Messverfahren lieferte, wurde er am 14.6.2012 mit dem Adolf-Martens-Preis für Sicherheitstechnik ausgezeichnet. Der Adolf-Martens-Preis wird alle zwei Jahre sowohl für den Bereich Materialforschung- und -prüfung als auch für den Bereich Sicherheitstechnik verliehen und gilt als einer der angesehensten Wissenschaftspreise auf diesem Gebiet (Bild 5).



Bild 6: Ausführungsvariante eines permeablen Werkstoffes (gesinterte Kurzfasern)

### Explosionsdruckentlastung mit Hilfe permeabler Werkstoffe

Die Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ hat sich in den letzten 100 Jahren kaum verändert, sodass die nach diesem Konstruktionsprinzip gestalteten Gehäuse nach wie vor sehr massiv auszulegen und aufwendig zu gestalten sind. Mit dem Ziel der Weiterentwicklung dieser Zündschutzart hin zu schlankeren Gehäusekonstruktionen, die eine wirtschaftlichere und individuellere Produktentwicklung von explosionsgeschützten Geräten ermöglichen, wurde ein neues Schutzkonzept entwickelt, das zwei bewährte Schutzprinzipien miteinander kombiniert: In druckfeste Gehäuse werden verschiedene, als Flammensperren fungierende, permeable Werkstoffe integriert (Bild 6), um den bei einer Explosion im Inneren des Gehäuses entstehenden Druck zünddurchschlagsicher entlasten zu können.

Durch die Funktionsintegration der beiden Einzelfunktionen Druckentlastung und Verhinderung eines Zünddurchschlags in einem Konstruktionselement – dem Druckentlastungselement aus einem permeablen Werkstoff – wird hierbei eine kontinuierliche Entlastung ab dem Beginn der Explosion ermöglicht. Aufgrund der Anwendung im Rahmen der „Druckfesten Kapselung“ und zur Abgrenzung von allen bisherigen Arten der Druckentlastung wird dieses neue Schutzkonzept als „zünddurchschlagsichere Explosionsdruckentlastung“ bezeichnet.

Die Tragfähigkeit dieses neuartigen Schutzkonzepts konnte im Rahmen eines Forschungsprojektes eindeutig belegt werden. Im Einzelnen wurde hierbei die Möglichkeit nachgewiesen, durch die Verwendung permeabler Werkstoffe als Funktionswerkstoff den Druck einer auftretenden Explosion ohne Zeitverzögerung zu entlasten und gleichzeitig einen Zünddurchschlag sicher zu verhindern. Bereits mit vergleichsweise kleinen Entlastungsflächen im Bereich von wenigen Prozent der Gehäuseinnenoberfläche können Druckreduzierungen von 70 % und mehr erreicht werden (Bild 7). Insgesamt führen die experimentellen Ergebnisse zu sicherheitstechnisch validierten Konstruktionshilfen, wie sich mit permeablen Werkstoffen die Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ zu einem neuen Schutzkonzept weiterentwickeln lässt, sodass es auf dieser Grundlage möglich sein wird, eine neue Generation von druckfest gekapselten Geräten zu konstruieren.

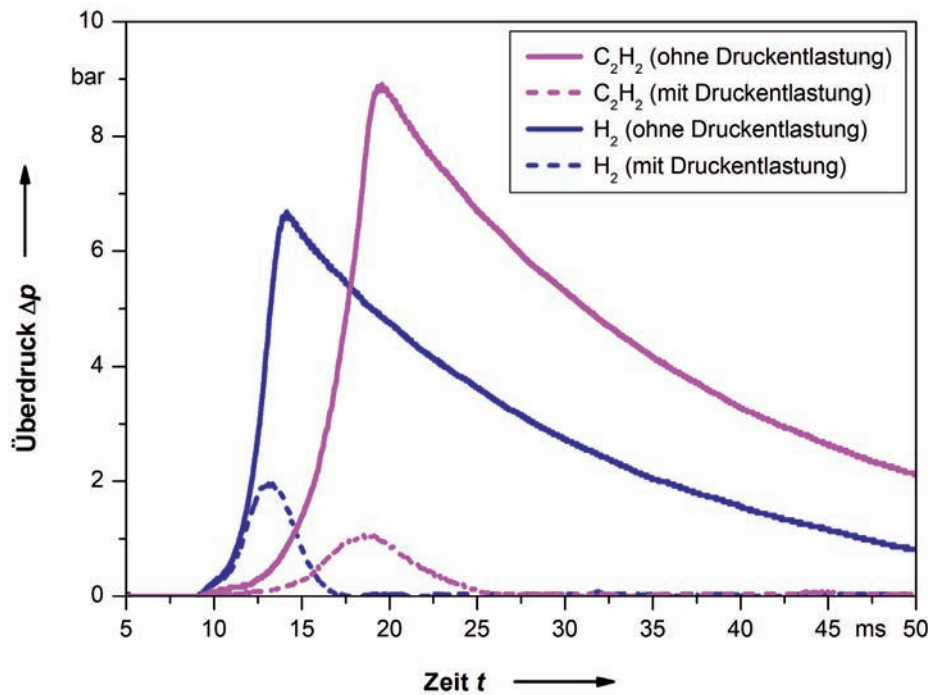


Bild 7: Zeitlicher Überdruck  $\Delta p$  bei einer Explosion in einem realen Gehäuse ohne und mit Druckentlastungselementen aus einem permeablen Werkstoff bei jeweils atmosphärischem Druck und Verwendung von  $(14 \pm 1)$  Vol.-% Acetylen ( $C_2H_2$ ) in Luft bzw.  $(31 \pm 1)$  Vol.-% Wasserstoff ( $H_2$ ) in Luft nach EN 60079-1

### Experimentelle und numerische Untersuchungen von Zünddurchschlägen

Als Teilprojekt der DFG-Forschergruppe FOR 1447 „Safety Related Ignition Processes“ wird in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie die Zündung von ruhenden Brennstoff/Luft-Gemischen durch heiße Freistrahlen experimentell und numerisch im Rahmen von zwei Dissertationen untersucht. Ziel ist es hierbei, vorhandene numerische Modelle mittels empirischer Daten aus Experimenten zu optimieren und somit genauere Vorhersagen bezüglich der stattfindenden Mischungsprozesse bei Zünddurchschlägen treffen zu können.

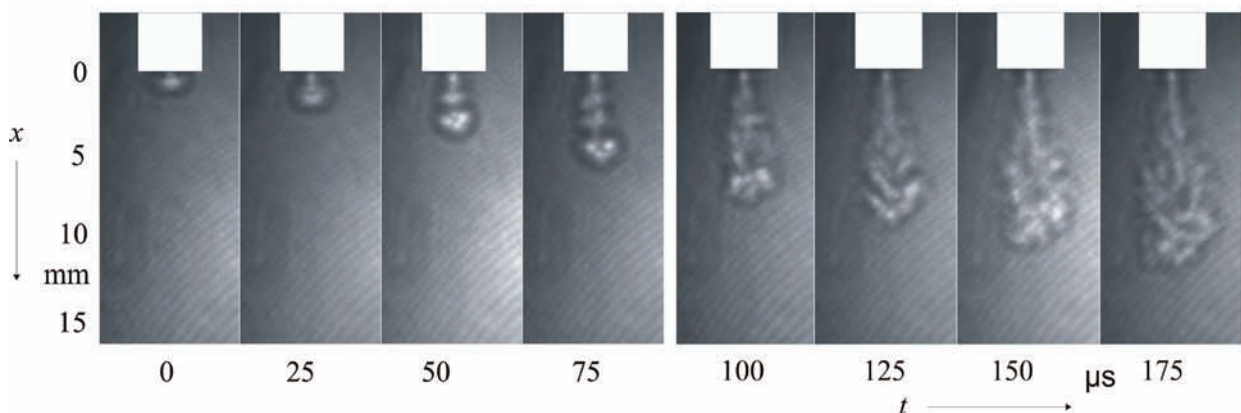
Da die Wechselwirkungen von turbulenten Strömungsprozessen und chemischen Reaktionen noch nicht vollständig verstanden sind, wird zunächst die chemische Komponente eliminiert, indem nichtreaktive Freistrahlen untersucht werden. Heißen Verbrennungsgasen unterschiedlicher Temperaturen

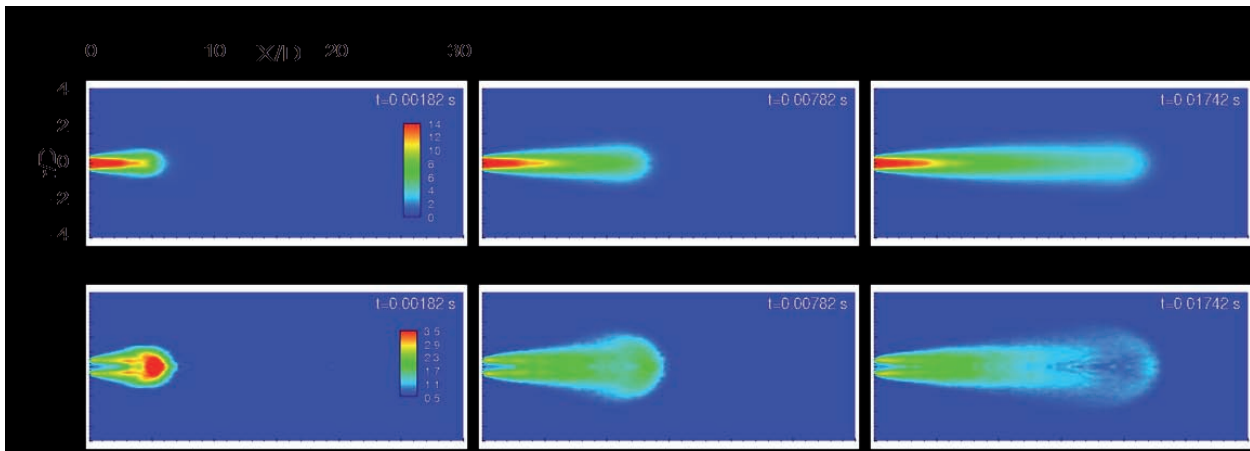
wird durch die variablen Dichten der verwendeten Gasgemische Rechnung getragen.

Zunächst werden Freistrahlen in Abhängigkeit des Eingangsdruckes mit Hilfe laserdiagnostischer Verfahren durch die Parameter „Position der Freistrahlfreont“ und Abschätzung der „mittleren Geschwindigkeiten“ charakterisiert. Es ist bereits bekannt, dass Mischungsvorgänge einen bedeutenden Einfluss auf den Zünddurchschlag haben. Deshalb wird im nächsten Schritt mithilfe des Mischungsbruches das Mischungsverhalten des Freistrahles mit dem ihn umgebenden Gas statistisch untersucht.

Die Beschreibung des Strömungsverhaltens von Freistrahlen variabler Dichte ist sehr komplex. Deshalb werden diese Daten zusammen mit Daten von Geschwindigkeitsfeldern als Eingangsparameter

Bild 8: Experimentelle Visualisierung von Freistrahlen variabler Dichte





verwendet, um numerische Simulationen zu validieren und verifizieren.

Bild 9: Numerisch bestimmte Geschwindigkeitsfelder in Strömungsrichtung (oben) und ihre Schwankungen zu verschiedenen Zeitpunkten (unten)

Die Simulation von Freistrahlen variabler Dichten beruht größtenteils auf der richtigen Vorhersage der turbulenten Mischungsprozesse, insbesondere wenn Zünd- und Verbrennungsprozesse zusätzlich mit in die Betrachtung einbezogen werden. In reagierenden Strömungen herrschen Dichteänderungen vor, infolgedessen muss ihr Einfluss innerhalb der Strömung miteinbezogen werden. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Arbeit stationäre Freistrahlen variabler und transiente Freistrahlen konstanter Dichte mit Hilfe einer probabilistischen Methode (PDF-Methode) simuliert. Innerhalb des PDF-Verfahrens wird ein Monte-Carlo-Verfahren verwendet, um die Massendichtefunktion der turbulenten Strömung zu beschreiben. Zukünftig werden, wenn die Massendichtefunktion des turbulenten Strömungsfeldes bekannt ist, Simulationen von Szenarien mit reagierenden Freistrahlen durchgeführt.

Das Zusammenspiel von Experiment und Simulation trägt dazu bei, die chemischen und physikalischen Prozesse bei einem Zünddurchschlag im Detail zu verstehen. Somit kann in Zukunft die Zünddurchschlagsicherheit von Geräten in der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ besser beurteilt werden.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### **Fortschritte bei der Aufklärung der Diskrepanzen bei Messwerten für die molare Masse des isotopisch angereicherten Siliziums für das Avogadroprojekt**

Eine bisher nicht erkannte Interferenz bei der massenspektrometrischen Bestimmung der molaren Masse, die durch das bisher verwendete Lösungsmittel für das Silizium verursacht wurde und wesentlich zur Diskrepanz der Messergebnisse der beteiligten NMIs beitrug, konnte identifiziert und beseitigt werden. (D. Schiel, FB 3.1, [detlef.schiel@ptb.de](mailto:detlef.schiel@ptb.de))

#### **Primärer Generator für die Feuchte in Methan erfolgreich validiert**

Der im Rahmen des EMRP-Projektes ENG01 „Energy Gases“ in der AG 3.21 aufgebaute Primärgenerator auf der Basis eines coulometrischen Feuchtegenerators wurde erfolgreich mit Methan (CH<sub>4</sub>) betrieben und validiert. Dabei zeigte sich, dass der Generator rückführbar im Bereich eines Volumenanteils H<sub>2</sub>O in Methan von 10 ppm bis 1000 ppm einsetzbar ist. Kleinere Volumenanteile lassen sich ebenfalls realisieren, wenn der Blindwert an Wasser im kommerziell erhältlichen Methan 5.5 (99,9995 % Reinheit) genau bestimmt werden kann. Methan ist der dominierende Bestandteil in Erdgas, und der Generator wird dazu beitragen, die Schwierigkeiten bei rückgeführten Feuchtemessungen in der erdgasfördernden und -verarbeitenden Industrie deutlich zu reduzieren und damit die Messgenauigkeit zu erhöhen. Eine Erweiterung auf komplexere Gaszusammensetzungen auch im Hinblick auf Biogase ist auf Basis des entwickelten Aufbaus ohne Weiteres möglich und kann in Abstimmung mit der Industrie realisiert werden. (P. Mackrodt, N. Böse, FB 3.2, [norbert.boese@ptb.de](mailto:norbert.boese@ptb.de))

#### **Bestimmung der wirksamen Querschnittsfläche von Kolben-Zylinder-Systemen unter Verwendung der Theorie der Dynamik verdünnter Gase**

Die Theorie der Dynamik verdünnter Gase wurde zur Bestimmung der wirksamen Querschnittsfläche von 10-cm<sup>2</sup>- und 20-cm<sup>2</sup>-Kolben-Zylinder-Systemen (KZS) angewendet, die dimensionell genau vermessen worden waren und als Primär-Gasdrucknormale in der PTB eingesetzt werden. Die Berechnungen wurden für den Überdruck- und Absolutdruckbetrieb sowie für verschiedene Gase durchgeführt. Die

berechneten wirksamen Querschnittsflächen wurden mit denjenigen verglichen, die mit der Theorie der viskosen Strömung bestimmt worden waren, und auch mit den durch Druckvergleichsmessungen ermittelten Verhältnissen der Querschnittsflächen. Die Ergebnisse bestätigen, dass der Effekt des Strömungsregimes und des Gastyps berücksichtigt werden müssen, wenn relative Unsicherheiten der Druckmessungen der Größenordnung 10<sup>-6</sup> anvisiert werden und insbesondere wenn die Kolbenmanometer im Absolutdruckmodus betrieben werden. (W. Sabuga, [wladimir.sabuga@ptb.de](mailto:wladimir.sabuga@ptb.de))

### Metrologie für die Gesellschaft

#### **Metrologie für die Klimaforschung**

Im Themenschwerpunkt „Umwelt“ des europäischen Metrologieforschungsprogramms EMRP wird seit 2011 das Projekt „Metrology for Ocean Salinity and Acidification“ gefördert, das von der PTB koordiniert wird. Durch die Forschungsarbeiten wird für wesentliche ozeanische Parameter, wie Salinität, Schallgeschwindigkeit, pH-Wert und Gehalt an gelöstem Sauerstoff, eine metrologische Basis geschaffen und damit eine Langzeitvergleichbarkeit der Messungen erreicht. (P. Spitzer, FB 3.1, [petra.spitzer@ptb.de](mailto:petra.spitzer@ptb.de))

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

Zur Optimierung von Abgasrückführungssystemen bei Verbrennungsmotoren wurde ein Hygrometer entwickelt, um eine schnelle probennahme-freie Gasanalyse im Brennraum zu ermöglichen. Messungen der H<sub>2</sub>O-Konzentration konnten in Zusammenarbeit mit den Universitäten Duisburg und Darmstadt an zwei optischen Glasmotoren realisiert werden. Durch den Einsatz eines neuartigen Vertical-Cavity-Surface-Emitting-Lasers (VCSEL) gelangen Messungen im gesamten Kompressionsstakt (T = 300 K–700 K, p = 0,05 MPa–0,8 MPa) mit einer Zeitauflösung von bis zu 33 µs. (O. Witzel / V. Ebert, FB 3.2, [volker.ebert@ptb.de](mailto:volker.ebert@ptb.de))

#### **Permanentmagneterregte Synchronmaschinen unter den Aspekten des Explosionsschutzes**

Insbesondere unter Energieeffizienzgesichtspunkten weist die permanentmagneterregte Synchronmaschine große Vorteile auf. Es ist daher abzusehen, dass zukünftig die PM-Synchronmaschine auch in explosionsgefährdeten Bereichen immer breitere



Anwendung findet. Zum sicheren Betrieb der Maschinen sind dabei detaillierte Kenntnisse über die potenziellen Zündquellen dieser Maschinenbauart sowie deren sicherheitstechnische Beherrschung von elementarer Bedeutung. (C. Lehrmann, FB 3.7, christian.lehrmann@ptb.de)

### **Adolf-Martens-Preis für Sicherheitstechnik 2012 geht an Tim Langer**

Für seine grundlegenden Forschungsarbeiten zum Thema „Elektrostatik – eine verbesserte Bewertungsgrundlage“ wurde Dipl.-Phys. Tim Langer mit dem Adolf-Martens-Preis 2012 für Sicherheitstechnik ausgezeichnet. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)

### **Bestimmung der Mindestzündenergie auf Basis eines statistischen Ansatzes**

Auf der Grundlage existierender Daten aus Versuchsreihen zur Mindestzündenergiebestimmung wurde eine statistische Analyse zu den Mindestzündenergien von Wasserstoff, Ethen und Propan durchgeführt. Dazu wurde das Verfahren der logistischen Regression angewendet. (M. Beyer, FB 3.7, michael.beyer@ptb.de)

### **Zündwirksamkeit von Ultraschall an der Phasengrenze flüssig-gasförmig**

Im Rahmen der Neubewertung der Zündquelle Ultraschall ist es gelungen, ein neues Bewertungskriterium von Ultraschallquellen in Flüssigkeiten auf Basis der Leistungsdichte der Quelle und der Wellenlänge des schallführenden Medium zu erstellen. (L. H. Simon, FB 3.7, lars.h.simon@ptb.de)

### **Gezielte Herstellung antistatischer Kunststoffe**

Zur Verhinderung von Explosionen aufgrund von elektrostatischer Aufladung müssen die zündwirksamen Oberflächen von elektrisch nicht leitenden Materialien, welche in explosionsfähiger Atmosphäre eingesetzt werden sollen, auf ihre elektrostatische Aufladbarkeit geprüft werden. Die PTB hat herausgefunden, dass praktisch alle elektrisch nicht leitfähigen Materialien elektrostatisch nicht aufladbar werden, wenn bei ihrer Herstellung bestimmte Verfahrensparameter gezielt eingestellt werden. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)

## **Metrologie für die Wirtschaft**

### **Laserdiagnostik zur Charakterisierung von Reinstgasen**

Für den Schwerpunkt Umwelt des Europäischen Metrologieforschungsprogramms EMRP entwickelt die AG 3.22 im Rahmen des Projektes EN-

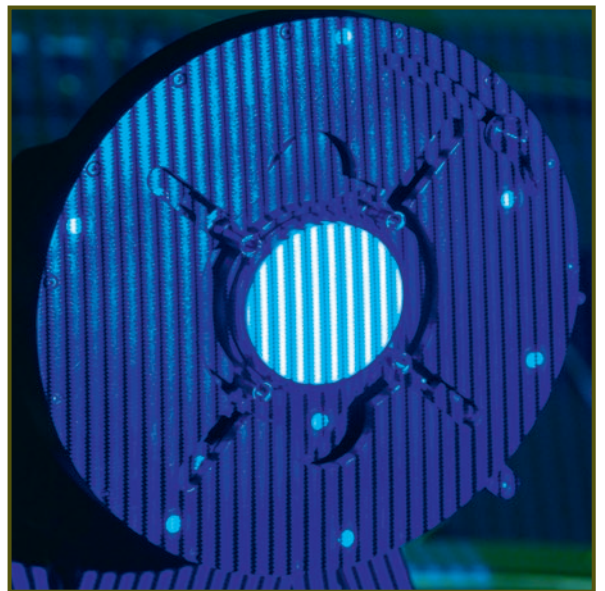
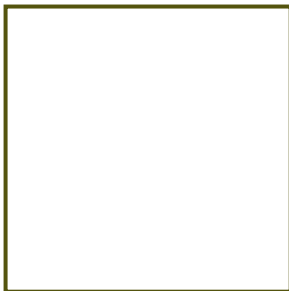
V01ein laserspektrometrisches Verfahren zur kalibrierfreien und rückgeführten Bestimmung von CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Spuren in Reinstgasen. Für dieses Ziel sind genaue und rückgeführte spektrale Referenzdaten der zu messenden Spezies erforderlich. Bis jetzt wurde die Linienstärke von der zur Messung gewählten CO<sub>2</sub>-Spektrallinie mit einer Unsicherheit von 2 % vermessen. Die gemessene Linienstärke deckt sich mit dem Wert in spektroskopischen Datenbanken. Eine Verringerung der Messunsicherheit und Bestimmung weiterer Spektralparameter sind in Vorbereitung. (A. Pogany / V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

### **Laseroptisches Hygrometer zur Messung von Wasserspuren in Methan**

In der AG 3.22 wurde im Rahmen des Projektes ENG01 „Energy Gases“ ein laseroptisches Hygrometer zur Messung von Wasserspuren in Methan designt und entwickelt. Das Spektrometer verwendet einen 2,7-µm-Diodenlaser und eine 82 cm lange Hochdruckgaszelle. Die Anwendbarkeit des Hygrometers wurde im Bereich von 1 bar für Wasserkonzentrationen von 100 ppm und 20 000 ppm erprobt. Die Nachweisgrenze des Hygrometers beträgt 80 ppb bei 70 Sekunden Zeitauflösung. Erste Messungen des Wasseranteils in Methan wurden bei einem Gasdruck von 1 bar durchgeführt. Eine Erweiterung auf Gasdrücke von bis zu 5 bar ist vorgesehen. (J. Nwaboh / V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

# Abteilung 4

## Optik



In der Abteilung *Optik* der PTB werden die Themenbereiche *Photometrie und Radiometrie*, *Länge und Dimensionelles* und *Zeit und Frequenz* bearbeitet. Die Aufgaben der PTB in den ersten beiden Themenbereichen bearbeitet die Abteilung *Optik* gemeinsam mit den Abteilungen *Fertigungsmesstechnik* und *Temperatur und Synchrotronstrahlung*. Die Abteilung stellt die zu den Themenbereichen zugehörigen drei Basiseinheiten des internationalen Einheitensystems Candela, Meter und Sekunde dar und gibt diese und davon abgeleitete Einheiten mit angemessener Unsicherheit an ihre Kunden weiter. Dazu führt die Abteilung *Optik* Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf den Gebieten der optischen Technologien, der Quantenoptik, der Röntgenoptik, der hochaufgelösten Mikroskopie, der Lasertechnologie und der optischen Formmessung durch. Die fachlichen Arbeiten werden in den fünf Fachbereichen *Photometrie und angewandte Radiometrie*, *Bild und Wellenoptik*, *Quantenoptik und Längeneinheit*, *Zeit und Frequenz* und *Optische Technologien* durchgeführt.

Einige der wichtigsten Entwicklungen und Fortschritte im Jahr 2012 in den Arbeitsschwerpunkten der Abteilung *Optik* und des *QUEST-Instituts an der PTB* werden im Folgenden nach den Fachbereichen gegliedert vorgestellt.

### **Photometrie und angewandte Radiometrie**

Die Forschungsschwerpunkte im Fachbereich *Photometrie und angewandte Radiometrie* sind gegenwärtig durch die schnelle Entwicklung und Verbreitung neuartiger Lichtquellen und der dafür erforderlichen angepassten Messtechnik sowie der im Rahmen der Energiewende noch wichtiger werdenden Metrologie für die Photovoltaik geprägt.

Das starke Wachstum der Photovoltaik in Deutschland hat in den vergangenen Jahren zu einem erheblichen Anstieg der Kalibriernachfragen in der PTB geführt. Gleichzeitig erfordern verschiedene Neuentwicklungen unterschiedlichster Solarzellen metrologische Grundlagenuntersuchungen. Um zukünftig die Nachfrage befriedigen zu können, ohne die metrologische Forschung zu vernachlässigen, hat die PTB einen neuartigen Messplatz aufgebaut (Bild 1).

Ausgehend von einem durchstimmbaren Ti:Saphir-Laser und unter Ausnutzung nichtlinearer Prozesse

Titelbild:

Justage eines Weißstandards mittels Streifenprojektion

wird gepulste Laserstrahlung mit hoher optischer Leistung in einem Spektralbereich von 200 nm bis 4000 nm erzeugt. Zur Vermeidung möglicher Sättigungs- oder Nichtlinearitätseffekte in Empfängern wird die gepulste Laserstrahlung durch einen in der PTB entwickelten und patentierten Konverter in kontinuierliche Strahlung umgewandelt. Die gegenüber dem bisher verwendeten strahlergestützten Messplatz um Größenordnungen höhere Strahlungsleistung kann genutzt werden, um großflächige und sehr homogene Strahlungsfelder zu erzeugen (Bild 2). Dies ist insbesondere von Bedeutung, da die Inhomogenität des Strahlungsfeldes bisher die größte Messunsicherheitskomponente darstellt. Die größeren Strahlungsfelder ermöglichen nun auch die Kalibrierung von großflächigen Solarzellen im Industriemaßstab (s. a. Nachrichten aus der Abteilung).

### **Bild- und Wellenoptik**

Die großen Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte im Fachbereich *Bild- und Wellenoptik* liegen in der optischen Formmessung und der höchstauflösenden Mikroskopie. Neue Messverfahren und -methoden werden insbesondere auf jenen Feldern der dimensionellen Metrologie entwickelt und industrienahe umgesetzt, in denen eine rasche Weitergabe der neuen Verfahren benötigt wird, eine direkte Rückführung auf die internationalen Einheiten erforderlich ist oder neue gesellschaftlich relevante Fragestellungen aufgeworfen werden.

Die in den letzten Jahren breit verfügbaren Nanomaterialien stellen ein solches Feld dar, bei dem bei allen wirtschaftlichen Erfolgen auch das vorhandene Gefährdungspotenzial realistisch eingeschätzt werden muss. Eine an die Nanotechnik angepasste Metrologie muss entwickelt werden, um mit diesen Materialien in verantwortungsvoller Weise umgehen zu können und damit eine breite gesellschaftliche Akzeptanz zu erreichen. Im Rahmen des abteilungsübergreifenden Themenbereichs *Nanometrologie* der PTB wurden Gold-Nanostäbchen untersucht, die auch in der biomedizinischen Forschung eingesetzt werden. Es ist bekannt, dass diese Gold-Nanostäbchen mit Längen von einigen zehn Nanometern und Durchmessern von etwa zwanzig Nanometern ausgeprägte optische Resonanzen zeigen. Die in der PTB durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die optische Resonanzwellenlänge proportional zum Aspektverhältnis (Verhältnis zwischen Länge und Durchmesser) der Gold-Nanostäbchen ist (Bild 3). Damit wird eine einfache Möglichkeit zu deren Charakterisierung eröffnet.

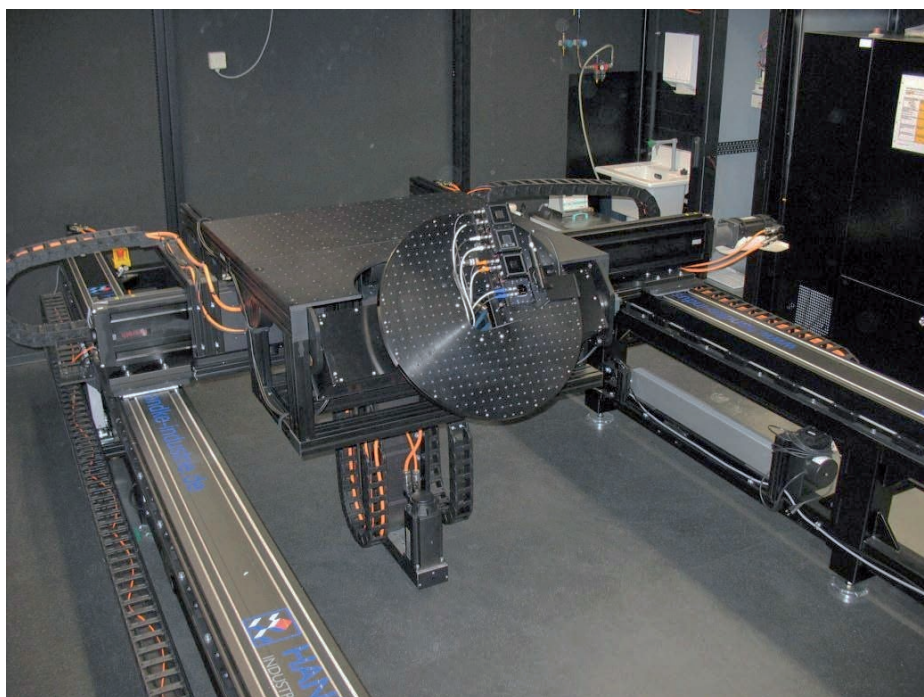
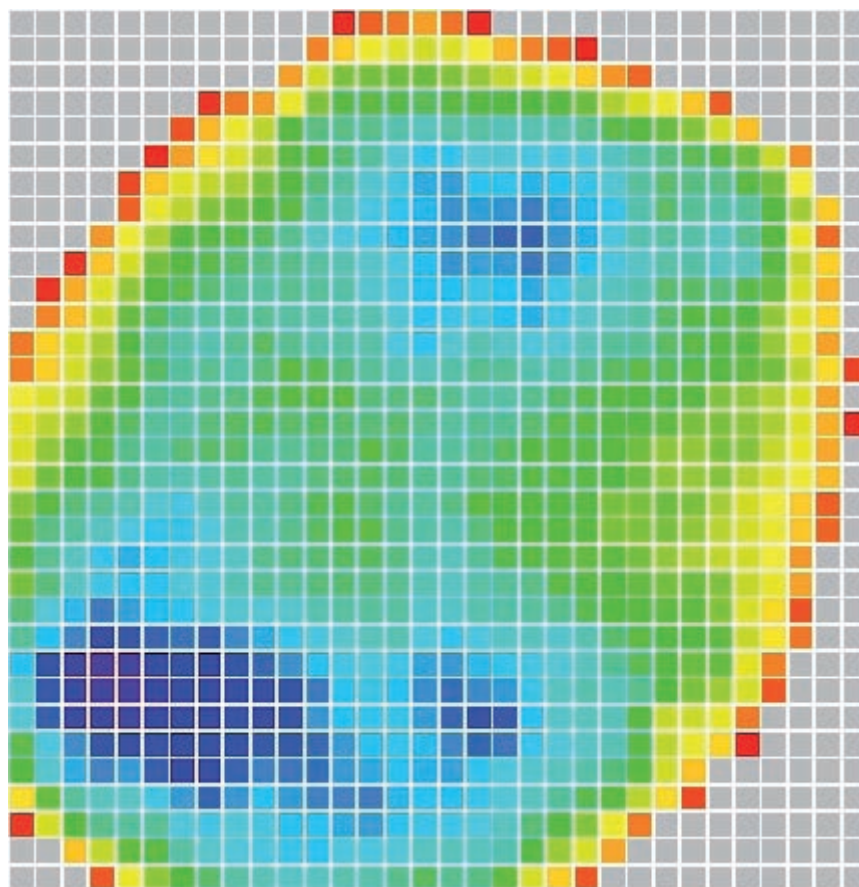


Bild 1: Probenhalter am neuen lasergestützten Messplatz zur Ermittlung der differentiellen spektralen Empfindlichkeit von Solarzellen mit drei zu untersuchenden Referenz-Solarzellen und einer Referenz-Photodiode

In modernen Optiken werden zunehmend asphärische Linsen und Freiformflächen eingesetzt, weil damit optische Baugruppen sehr viel kompakter zu realisieren sind bei gleichzeitiger Verbesserung der optischen Abbildungsleistung. Asphärische Linsen haben in Präzisionsoptiken und Massenmärkten (Kameras) Einzug gehalten und ganz neue Anwendungsfelder erschlossen (Handys). Die moderne Optik steht damit vor der Herausforderung, rückge-

führte Form- und Strukturmessungen mit Nanometergenauigkeit an optischen Funktionsflächen, wie Asphären (Bild 4), Freiform-Optiken oder hybriden Optiken zu garantieren. Für höchste Abbildungsqualitäten müssen die Oberflächen sehr genau mit Sub-Wellenlängen-Unsicherheit gefertigt sein. In der PTB wurde dazu im Rahmen des Europäischen Metrologie-Forschungsprogramms (EMRP) ein Projekt begonnen, das sowohl die Messtechnik mit

Bild 2: Inhomogenität eines insgesamt 220 mm x 220 mm großen Strahlungsfeldes bei der Wellenlänge 900 nm in Falschfarbendarstellung. In einem für die Industriesolarzellen relevanten Bereich von 156 mm x 156 mm wird eine Inhomogenität von  $\pm 1\%$  erreicht.



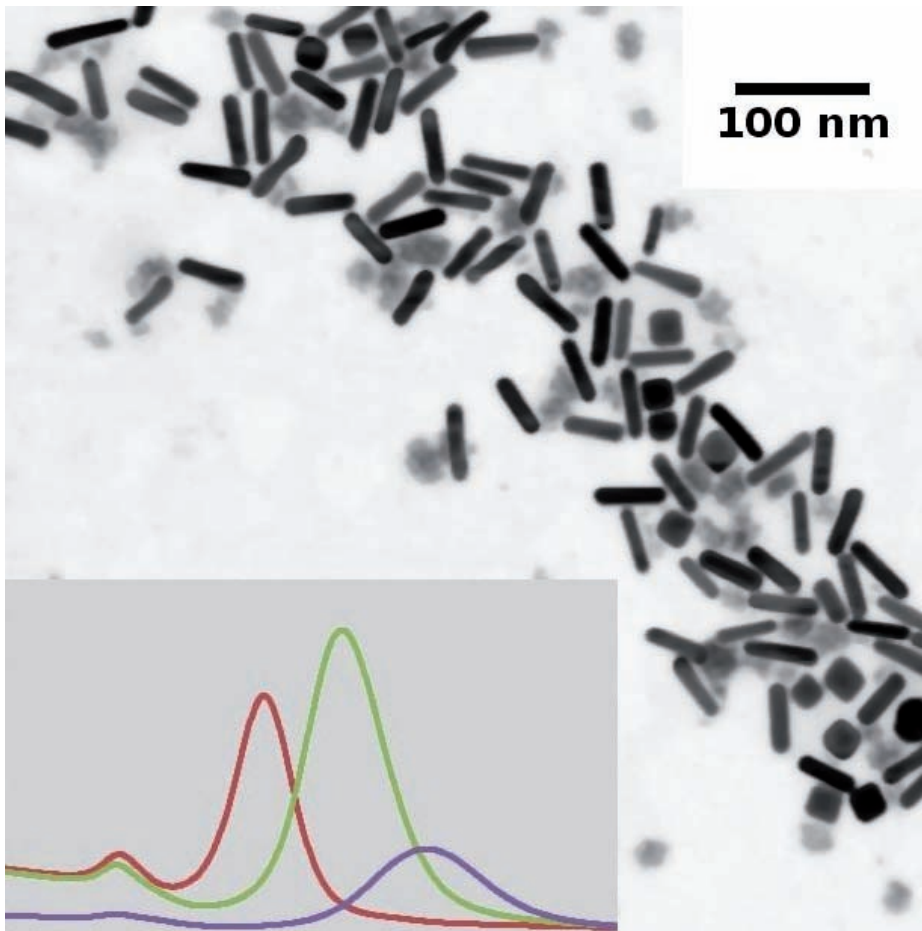


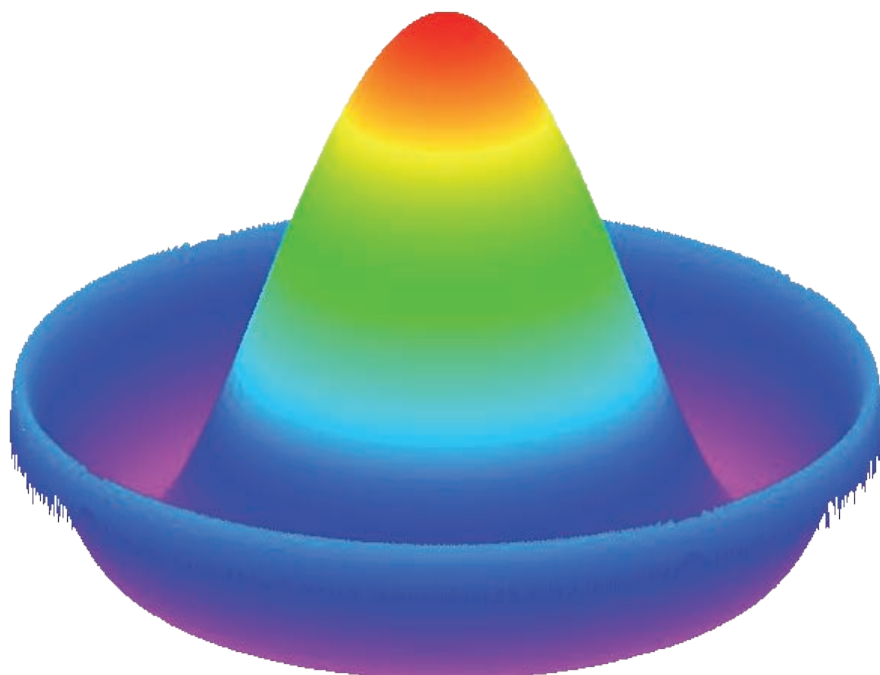
Bild 3: Elektronenmikroskopische Aufnahme der Gold-Nanopartikel sowie Absorptionsspektren im Wellenlängenbereich von 450 nm bis 1000 nm für drei Proben mit unterschiedlichem Aspektverhältnis

Interferometern als auch mit hochgenauen Koordinatenmessgeräten miteinander vergleicht.

### Quantenoptik und Längeneinheit

Der Fachbereich *Quantenoptik und Längeneinheit* realisiert die Längeneinheit „Meter“, die über die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum als Naturkonstante direkt aus der Definition der Sekunde dargestellt

Bild 4: Sollform (nach Abzug eines sphärischen Anteils) der Oberfläche einer Asphäre, wie sie beispielsweise im Rundvergleich des Nanotechnologie-Kompetenzzentrums „Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung“ (CC UPOB) an der PTB eingesetzt wird. Die farbkodierten Abweichungen von der Kugelform betragen  $-110 \mu\text{m}$  (violett) bis  $-10 \mu\text{m}$  (rot).



wird, und zwar über die Wellenlänge von Referenzlasern bekannter Frequenz. Gegenwärtige Schwerpunkte betreffen die Entwicklung von quanten- und röntgenoptischen Verfahren zur Realisierung der Längeneinheit, optischen Atomuhren mit Neutralatomen (auch in einer transportablen Version) und die Weitergabe von optischen Frequenzen über kommerzielle optische Datennetze.

Da die meisten optischen Atomuhren bei Umgebungstemperatur betrieben werden, ist die Frequenz des Uhrenübergangs der Atome (und Ionen) durch das thermische elektromagnetische Strahlungsfeld verschoben, das von der Umgebung der Atome und Ionen abgestrahlt wird. Der Einfluss dieser Verschiebung durch die sogenannte Schwarzkörperstrahlung wurde jetzt in der optischen Strontium-Gitteruhr der PTB ermittelt und kann damit auch korrigiert werden. Dazu war im letzten Jahr eine Methode entwickelt worden, um die Strontiumatome durch optische Kräfte in der Gitteruhr gezielt in ein wohldefiniertes elektrisches Feld zu verschieben (s. Jahresbericht 2011). Die erfolgte präzise Vermessung der Frequenzverschiebung durch das statische elektrische Feld zusammen mit den auch berechneten dynamischen Korrekturen erlauben es nun, den Einfluss der Schwarzkörperstrahlung mit einer relativen Unsicherheit von wenigen  $10^{-17}$  zu korrigieren.

Bei diesen Genauigkeiten wird die Kurzzeitstabilität der optischen Uhren schon deutlich durch die zur Abfrage des Uhrenübergangs verwendeten Laser begrenzt. Die PTB hat dazu gemeinsam mit dem Exzellenzcluster QUEST der Leibniz Universität Hannover und dem JILA (Boulder, USA) einen Infrarotlaser mit nur noch 40 mHz Linienbreite entwickelt (s. Nachrichten des Jahres 2011). Mit diesem Laser konnte jetzt die Linienbreite der Strontiumuhr und ihre Kurzzeitstabilität um etwa einen Faktor sechs verbessert werden. Langzeitmessungen am Kernstück dieses Lasers – einem kryogenen einkristallinen Siliziumresonator – zeigten überdies, dass mit dem Silizium-Resonator eine Stabilität über Tage und Wochen erreicht werden kann, die etwa drei Größenordnungen über der in optischen Uhren bisher üblicherweise verwendeten Glasresonatoren liegt.

Die Arbeit der PTB-Mitarbeiter wird auch international anerkannt. Im Rahmen des 26. European Frequency and Time Forum (EFTF) in Göteborg erhielt Dr. Gesine Grosche den Young Scientist Award 2012 (Bild 5) „in Würdigung ihrer herausragenden Beiträge zu verschiedenen Bereichen der Frequenz-



Bild 5: Dr. Gesine Grosche (PTB) erhält den Young Scientist Award 2012 des European Frequency and Time Forum aus der Hand des Vorsitzenden Dr. Giorgio Santarelli.

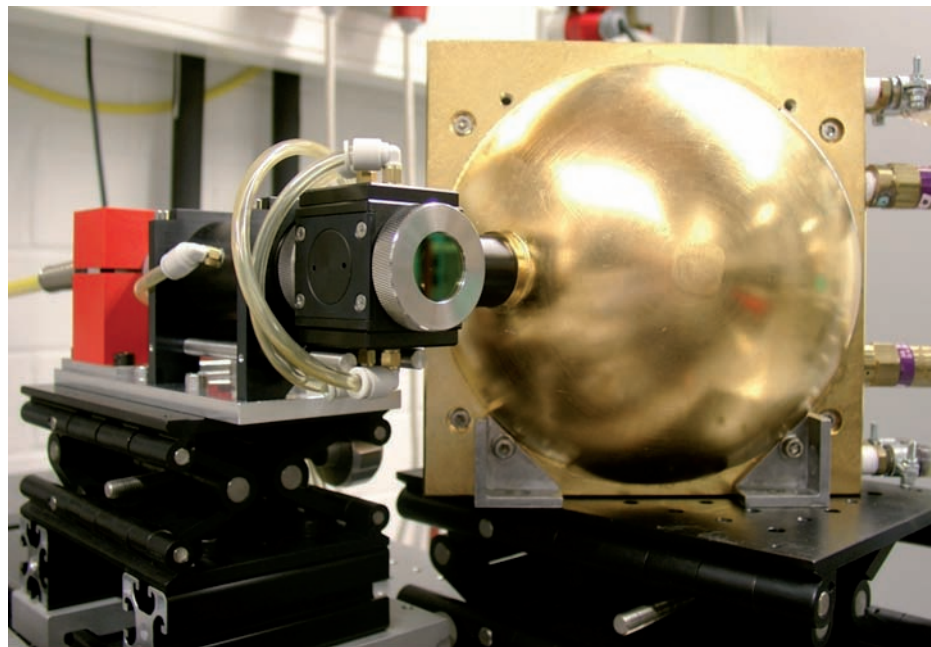
Metrologie auf dem Gebiet der Verteilung optischer Frequenzen über optische Glasfasern“. Der Preis wird für einen eigenen kreativen Beitrag verliehen, der zu außergewöhnlichen Fortschritten in der Zeit- und Frequenzmetrologie geführt hat und noch führen wird. Vor der diesjährigen Preisträgerin hatten schon im Jahre 2010 Professor Piet Schmidt (*QUEST-Institut der PTB*) und im Jahre 2003 Dr. Ekkehard Peik (Fachbereich *Zeit und Frequenz*) diesen Preis erhalten.

## Zeit und Frequenz

Die primäre Aufgabe des Fachbereichs *Zeit und Frequenz* ist die Realisierung und Weitergabe der Einheit der Zeit 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 Uhren als auch bei der Verbreitung der genauen Zeit wesentliche Fortschritte erzielt:

Um die stetig wachsende Genauigkeit der Realisierung der Sekunde durch die Caesium-Atomuhren auch zur Verbesserung von UTC(PTB) zu nutzen, basiert diese Zeitskala seit drei Jahren auf der Caesium-Fontänenuhr CSF1 der PTB. Dazu steuert CSF1 einen aktiven Wasserstoffmaser, der als Schwungrad für die UTC(PTB)-Erzeugung dient. Die PTB war damit weltweit das erste Institut, das seine Zeitskala direkt von einer Caesium-Fontänenuhr ableitete. Seit dem Sommer 2012 wird die sogenannte „freie Atomzeitskala“ TA(PTB) ebenfalls von einem mittels CSF1-gesteuerten Wasserstoffmaser realisiert und in Form der Differenz zur internationalen frei-

Bild 6: Ein Kernstück des neuen Messplatzes für die Hochleistungslaserradiometrie. Die Strahlung eines 1065-nm-Faserlasers wird auf einen Strahlteiler geführt (schwarzer Kubus), der zur Leistungskontrolle einen Teil der Strahlung auf einen Monitorempfänger (vergoldete Kugel) schickt.



en Atomzeitskala (TAI) als TAI-TA(PTB) vom Internationalen Büro für Maße und Gewichte publiziert.

Mit der Untersuchung unterschiedlicher Systeme (Yb<sup>+</sup>-Einzelionenuhr, Sr-Gitteruhr und Al<sup>+</sup>-Quantenlogikuhr) ist die PTB prominent an der Entwicklung zukünftiger primärer optischer Uhren beteiligt. Das ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, um langfristig einflussreich an der Vorbereitung einer Neudefinition der Sekunde mitzuwirken. Die Arbeit der PTB hat wesentlich dazu beigetragen, dass im Berichtsjahr alle drei Systeme vom Internationalen Komitee für Maße und Gewichte als sekundäre Realisierung der Definition der Sekunde mit teilweise deutlich reduzierter Unsicherheit empfohlen werden konnten. So wurde in dem in der PTB entwickelten optischen Frequenznormal auf der Basis eines einzelnen gespeicherten Ytterbiumions ein Uhrenübergang untersucht, der eine extrem kleine Linienbreite besitzt. Die Anregung dieses Übergangs durch eine

sogenannte „Hyper“-Ramsey-Pulsfolge erlaubt jetzt erstmals die weitgehende Unterdrückung bislang limitierender systematischer Frequenzverschiebungen (s. Nachrichten des Jahres).

## Optische Technologien

Im Fachbereich *Optische Technologien* steht die Forschung, Entwicklung und Kalibrierung in der Messtechnik zur Reflexion und Transmission makroskopischer und mikroskopischer Materialien und der Laserradiometrie im Vordergrund. Einen aktuellen Schwerpunkt stellt die Forschung zu Einzelphotonenquellen und -detektoren für die Quantenkryptografie und die Radiometrie dar.

Der Einsatz von Lasern immer höherer Leistung im Maschinen- und Automobilbau sowie in der Medizintechnik erfordert die Sicherstellung der Rückführung der industriell relevanten Messmittel. In der PTB wurde daher ein Kalibriermessplatz für den

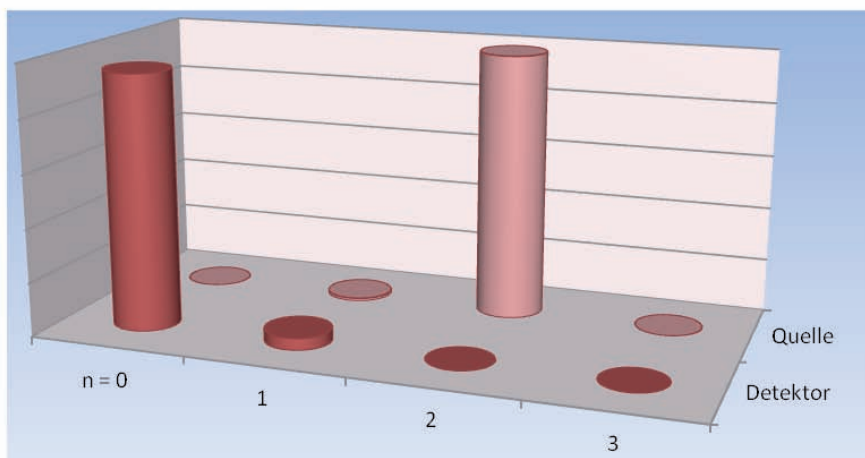


Bild 7: Photonenzahlverteilung der Strahlung eines Nanodiamanten mit zwei Stickstoff-Fehlstellen-Zentren. Ursprüngliche Photonenzahlverteilung an der Quelle (hinten), Photonenzahlverteilung am Ort des Empfängers (vorne)

Leistungsbereich bis zu 2 kW bei 1064 nm aufgebaut (Bild 6). Gegenwärtig wird in einer Kooperation die Möglichkeit untersucht, auch für die erwartete weitere Steigerung der industriell verwendeten Leistungen in den Bereich von 4 kW bis zu 20 kW gerüstet zu sein.

Die Quantenkryptografie ist eine vielversprechende und zukunftsweisende Technik zur Erhöhung der Sicherheit in der Informationstechnik. Derzeit befinden sich die Verfahren noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase. Notwendig zur weiteren Entwicklung auch für die spätere kommerzielle Nutzung der Systeme ist eine zuverlässige Messung von Einzelphotonen bzw. der Photonenstatistik. Die PTB entwickelt Verfahren zur genauen Charakterisierung der Eigenschaften von Einzelphotonenquellen, u. a. hinsichtlich ihrer Photonenstatistik (Bild 7), und von Einzelphotonendetektoren, u. a. hinsichtlich ihrer Effizienz.

In den letzten Jahren finden Effektpigmentschichten, bei denen die Farbe des reflektierten Lichtes vom Winkel der Beleuchtung und der Beobachtung abhängt, immer stärkere Verbreitung. In einer Kooperation mit dem Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) der Technischen Universität Darmstadt wurden Messungen an gedruckten goniochromatischen Effektpigmenten durchgeführt.

Aus diesen Messungen lassen sich winkelabhängige Farbraumkoordinaten berechnen (Bild 8). Die Ergebnisse der Messungen sind jetzt für Forschungszwecke in Form einer Datenbank frei verfügbar (s. Nachrichten aus der Abteilung).

### QUEST-Institut an der PTB

Das QUEST-Institut an der PTB war im Rahmen des Exzellenzclusters Center for Quantum Engineering and Space-Time (QUEST) der Leibniz Universität Hannover in der PTB eingerichtet worden. Die Arbeitsschwerpunkte am QUEST-Institut an der PTB betreffen die Entwicklung spektroskopischer Methoden, neuartiger Technologien zur Speicherung (Bild 9) und Manipulation von einzelnen Ionen für Präzisionsmessungen sowie die Entwicklung von Atomuhren der nächsten Generation. Das Arbeitsgebiet nutzt die bahnbrechenden Methoden der Quantenlogik, die sich aus den Forschungen ergaben, die 2012 mit dem Physiknobelpreis gewürdigt wurden. Zu ihrer Anwendung gehört auch die  $Al^+$ -Atomuhr, die gegenwärtig im QUEST-Institut entwickelt wird (Bild 10).

Eine wichtige Frage ist dabei, welche Logikionen sich in dieser Uhr am besten für die Kühlung des Uhren-Ions eignen. Die für die  $Al^+$ -Uhr durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass mit  $Be^+$ ,  $Mg^+$ ,

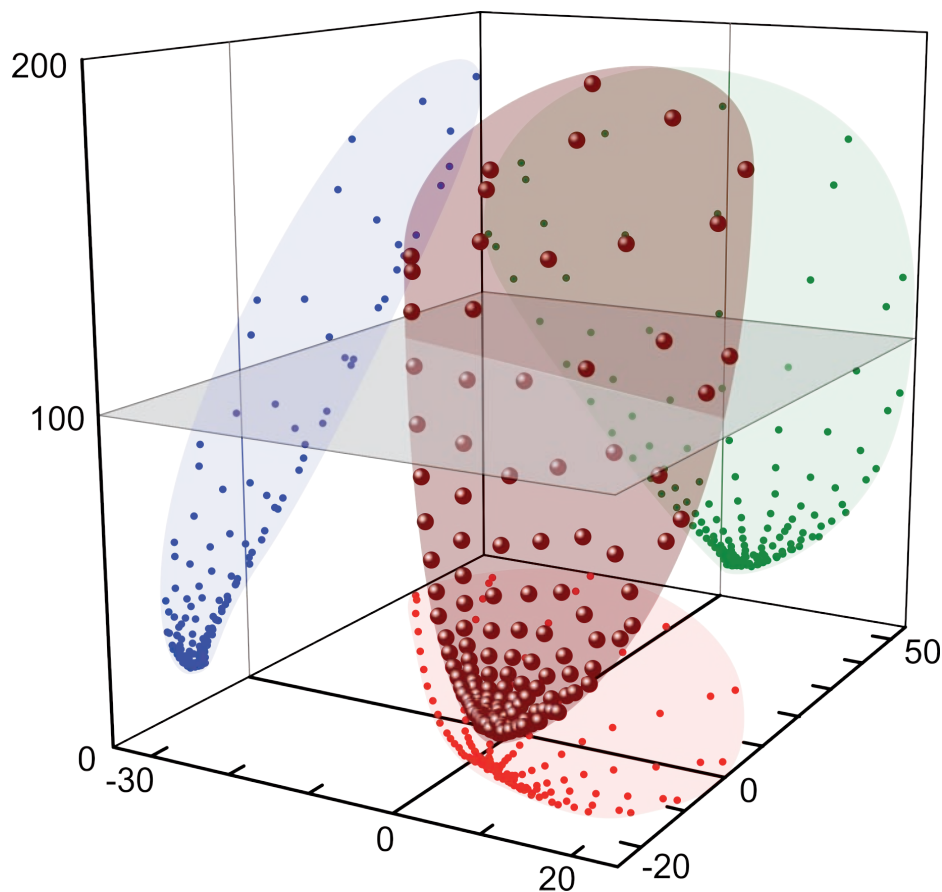


Bild 8: Dreidimensionale Darstellung der wahrgenommenen Farbe eines Effektpigments (Merck Colorstream Viola Fantasy) in einem standardisierten Farbraum für 187 geometrische Positionen der Probe



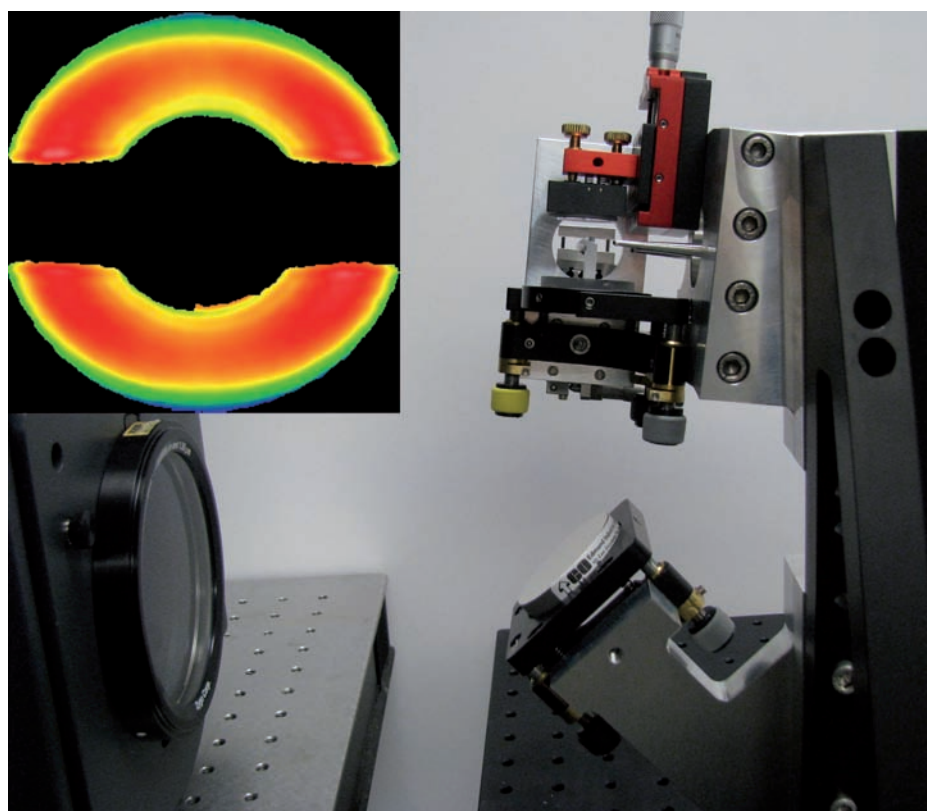


Bild 9: Interferometrische Messung einer abbildenden Miniatur-Spiegeloptik zur Untersuchung von Ionen in einer Ionenfalle (Einsatzbild oben rechts); das Interferogramm ist im Einsatzbild oben links dargestellt.

und  $\text{Ca}^+$  die kleinsten Temperaturen erreicht werden können. Da mit einzelnen Ionen nur relativ kleine Signale und ein damit einhergehendes geringes Signal-zu-Rausch-Verhältnis erreicht werden kann, wird in der PTB untersucht, welche Genauigkeit mit vielen gleichzeitig abgefragten Ionen erreicht werden kann. In einem Prototyp einer neuen Ionenfalle mit optimiertem Elektrodendesign wurde zum ersten Mal eine stark reduzierte Mikrobewegung über einen weiten Bereich von ca.  $130 \mu\text{m}$  gemessen, die einen Uhrenbetrieb mit einer relativen Frequenzunsicherheit von  $10^{-18}$  erlaubt. Damit können lange Ketten von Ionen gespeichert und gekühlt werden, ohne dass störende Felder die Stabilität des Ionenkristalls beeinträchtigen.

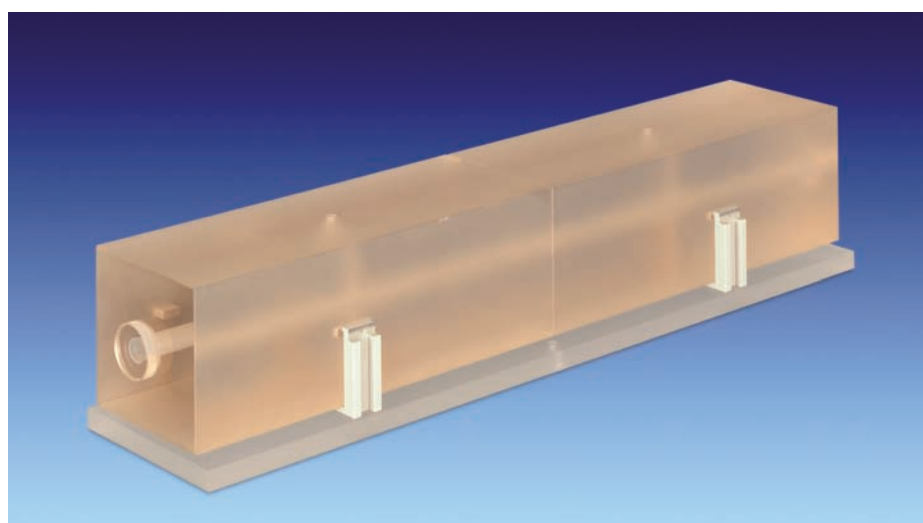


Bild 10: Ein optischer Referenzresonator (Länge: 39.5 cm) mit reduziertem thermischen Rauschen für die sich in der Entwicklung befindende neue  $\text{Al}^+$ -Quantenlogik-Atomuhr

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Stabilität von Leuchtdioden für den solaren UV-Wellenlängenbereich

Seit einiger Zeit sind Leuchtdioden (LEDs) verfügbar, welche im solaren UV-Wellenlängenbereich (280 nm bis 400 nm) emittieren. In einem europäischen Forschungsprojekt wurden UV-LEDs auf ihre Stabilität und ihr Alterungsverhalten bezüglich der spektralen Bestrahlungsstärke untersucht. Nach entsprechender Voralterung kann jetzt die geforderte Stabilität der Bestrahlungsstärke von 0,05 % pro Stunde mit den meisten UV-LEDs erreicht werden. Diese UV-LEDs sollen in einer portablen Monitorstrahlungsquelle genutzt werden, mit deren Hilfe die Kalibrierung von Spektroradiometern überprüft werden kann. (S. Nowy, FB 4.1, [stefan.nowy@ptb.de](mailto:stefan.nowy@ptb.de))

#### Neue optische Diffusoren zur Verwendung in UV-Radiometern für hohe Bestrahlungsstärken

An optische Diffusoren in UV-Radiometern für hohe Bestrahlungsstärken werden erhöhte Anforderungen bezüglich des Transmissionsverhaltens, der UV-Beständigkeit, der Homogenität und des Streuverhaltens gestellt. Neuartige Diffusoren aus hoch-reinem opaken synthetischen Quarzglas, bei dem extrem kleine, homogen im Material verteilte Glasbläschen als Streuzentren wirken (Primusil) wurden für die Verwendung in UV-Radiometern untersucht. Wenn die anfängliche Zunahme ihrer Transmission im Spektralbereich unterhalb von 450 nm durch eine Voralterung ausgeschlossen wird, bieten sie eine empfehlenswerte Alternative zu herkömmlichen Diffusoren. (B. Barton, FB 4.1, [betina.barton@ptb.de](mailto:betina.barton@ptb.de))

#### Zur Richtungs- und deren Wellenlängenabhängigkeit von Photometerköpfen

Um die sehr unterschiedliche spektrale, ortsabhängige und teilweise großflächige Lichtemission moderner Lichtquellen quantitativ richtig bewerten zu können, muss die richtungsabhängige Wellenlängenempfindlichkeit der verwendeten Photometer bekannt sein. Untersuchungen am Lasermessplatz für die Photometrie der PTB zeigten, dass abhängig von den zu kalibrierenden Lichtquellen dieser Einfluss mehrere Prozent betragen kann. Mit dieser Kenntnis ist es schließlich möglich, Messdaten auch an ausgedehnten Lichtquellen zu korrigieren. (M. Schuster, FB 4.1, [michaela.schuster@ptb.de](mailto:michaela.schuster@ptb.de))

#### Photoassoziation von Calcium-Atomen an hochverbotener Linie

In der PTB wurde erstmalig die Bildung eines Moleküls aus zwei Calciumatomen untersucht, wenn ein Atom mit Hilfe von Laserstrahlung auf dem „verbotenen“ Interkombinationsübergang angeregt wurde. Damit ist die Voraussetzung geschaffen, die Wechselwirkung zwischen den Atomen in weiten Bereichen gezielt zwischen abstoßend, verschwindend und anziehend einzustellen. (M. Kahmann, FB 4.3, [max.kahmann@ptb.de](mailto:max.kahmann@ptb.de))

#### Erzeugung und Modellierung von Bessel-Strahlen

Um die Eignung von sogenannten beugungsfreien Bessel-Strahlen für die Deflektometrie zu untersuchen, wurden Bessel-Strahlen mittels einer Ringspalt-Chrom-Maske und einer Linse erzeugt. Die theoretische Modellierung geschah anhand des Beugungsintegrals nach Collins und zwei weiteren neuentwickelten bzw. modifizierten Methoden. Die Abweichung des Bessel-Strahl-Profiles von dem erwarteten theoretischen Verlauf kann mit der Überlagerung einer aus der Rest-Transmission der Maske hervorgehenden Kugelwelle zufriedenstellend erklärt werden. (B. Andreas, FB 4.3, [birk.andreas@ptb.de](mailto:birk.andreas@ptb.de), G. Ehret, FB 4.2, [gerd.ehret@ptb.de](mailto:gerd.ehret@ptb.de))

#### Störung der Strontium-Gitteruhr durch Temperaturstrahlung unter Kontrolle

Temperaturstrahlung verschiebt in praktisch allen Atomuhren die Frequenz des Uhrenübergangs und macht diese Frequenz temperaturabhängig. In den optischen Strontium-Gitteruhren dominiert dieser Beitrag die erreichbare Unsicherheit. Durch eine in der PTB durchgeführte hochpräzise Messung der atomaren Polarisierbarkeit und darauf aufbauenden Analysen kann nun für alle Uhren dieser Art weltweit die Unsicherheit reduziert werden. In der Uhr der PTB kann damit der restliche Einfluss der Temperaturstrahlung auf dem Niveau von  $10^{-17}$  korrigiert werden. (St. Falke, FB 4.3, [stephan.falke@ptb.de](mailto:stephan.falke@ptb.de))

#### Silizium-Resonator liefert Laserstrahlung bisher unerreichter Stabilität

Innerhalb eines im Rahmen des Exzellenzclusters QUEST durchgeführten Forschungsprojektes wurde ein Siliziumresonator entwickelt (s. Jahresbericht 2011) und abschließend charakterisiert. Die Resultate, die im Fachjournal Nature Photonics veröf-

fentlicht wurden, weisen für die Frequenz eines auf diesen Silizium-Resonator stabilisierten Lasers eine Instabilität von bis zu  $1 \cdot 10^{-16}$  entsprechend einer spektralen Linienbreite von unter 40 mHz nach. Weiterhin zeichnet sich der Silizium-Resonator durch eine außergewöhnliche Langzeitstabilität aus. Über drei Tage Beobachtungszeit driftete die Laserfrequenz nur um etwa 10 Hz. Dieser Wert ist etwa drei Größenordnungen kleiner als die Drift bisher verwendeter Glasresonatoren und erlaubt neuartige Anwendungen in der Frequenzmetrologie. (Ch. Hagemann, FB 4.3, Christian.Hagemann@ptb.de)

### **Jeder Uhr das beste Schwungrad**

Mithilfe eines Femtosekundenfrequenzkamms wurde die herausragende Stabilität eines infraroten Referenzlasers, dessen Frequenz auf einen Siliziumresonator stabilisiert ist, auf den Abfragelaser für den Uhrenübergang in der Strontium-Gitteruhr übertragen. Auf diese Weise wurde die Linienbreite der Resonanzkurve der Gitteruhr um einen Faktor sechs reduziert, und die benötigten Mittelungszeiten wurden um mehr als eine Größenordnung reduziert. Dieses Verfahren ist auch auf die anderen optischen Atomuhren der PTB übertragbar. (C. Grebing, FB 4.3, christian.grebing@ptb.de)

### **„Hyper“-Ramsey-Anregung des Oktupolübergangs in $^{171}\text{Yb}^+$**

Der sogenannte Oktupolübergang in einem gespeicherten Ytterbiumion hat viele vorteilhafte Eigenschaften für die Realisierung eines höchstgenauen optischen Frequenznormals. Bei seiner Anregung tritt allerdings normalerweise eine große lichtinduzierte Frequenzverschiebung auf. Es konnte erstmals demonstriert werden, dass das sogenannte „Hyper“-Ramsey-Anregungsschema geeignet ist, ein atomares Resonanzsignal zu liefern, das in linearer Näherung nicht durch das Licht des anregenden Lasers verschoben wird. (Chr. Tamm, FB 4.4, christian.tamm@ptb.de)

### **Neue Frequenzabfrage-Methode für die Fontänenuhr CSF2**

Die Frequenzabfrage-Methode für die Caesium-Fontänenuhr CSF2 der PTB wurde grundlegend verändert. Die neue Abfrage-Methode ermöglicht die fortwährende Kontrolle bestimmter frequenzverschiebender Effekte während des eigentlichen Messbetriebs und die Realisierung neuartiger rauschärmerer Frequenz-Messmethoden. (S. Weyers, FB 4.4, stefan.weyers@ptb.de)

### **Kontrastreiche Selektion einzelner Frequenzkammlinien**

Selbst-referenzierte optische Frequenzkämme ermöglichen eine bequeme, phasenkohärente Frequenzverknüpfung von Signalen im Radiofrequenz- und optischen Spektralbereich und damit z. B. die Rückführung optischer Signale auf die Zeiteinheit. Viele Anwendungen erfordern jedoch anstatt eines Kammspektrums ein einfrequentes Dauerstrichsignal. In der PTB wurde gezeigt, dass sich diese Konversion bequem mittels kohärenter Brillouin-Streuung in Glasfasern erreichen lässt. Sie erlaubt es, eine beliebig wählbare, einzelne Kammlinie gezielt zu verstärken und gleichzeitig alle anderen wirksam zu unterdrücken. Der gemessene Selektionskontrast war für alle unerwünschten Linien größer als 55 dB. (E. Benkler, FB 4.5, Erik.Benkler@ptb.de)

### **Robuste interferometrische Frequenzkopplung zwischen optischen Dauerstrichsignalen und Frequenzkämmen**

Durch Kombination eines Zweistrahl-Transfer-Interferometers mit einem unbeschränkten Hochfrequenz-Phasenschieber wird es möglich, die Trägerfrequenzverstimmung zwischen einem Frequenzkamm und einem CW-Signal auf einen jederzeit weitgehend frei wählbaren Wert zu stabilisieren. Durch geeignete Wahl der interferometrischen Laufzeitdifferenz tragen Tausende von Kammlinien konstruktiv zum Fehlersignal bei, wodurch eine extrem robuste Regelwirkung erzielt wird. (H. Telle, FB 4.5, Harald.Telle@ptb.de)

### **Coulomb-Kühlen von Zwei-Ionen-Kristallen für die Hochpräzisionspektroskopie**

Coulomb-Kühlen ist ein unverzichtbares Werkzeug für Hochpräzisionsmessungen an gefangenen Ionen, die nicht selbst direkt mit Lasern gekühlt werden können. Es wurden die erreichbaren Temperaturen sowie die Kühlzeiten für verschiedene Ionenkristalle unter Einfluss von externen Heizraten theoretisch untersucht. Von den fünf untersuchten Kühleispezies ( $\text{Be}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Sr}^+$ ,  $\text{Yb}^+$ ) eignen sich demnach drei ( $\text{Be}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ), um bei üblichen Heizraten eine Uhr mit Dopplerverschiebungen  $< 10^{-17}$  zu realisieren. (J. B. Wübbena, QUEST, jannes.wuebbena@ptb.de)

### **Minimale Mikrobewegung in linearen Ionenfallen**

Mikrobewegung in Ionenfallen führt zu Doppler- und Stark-Verschiebungen der atomaren Resonanzen in optischen Ionenuhren und stellt eine der größten Herausforderungen für den genauen Betrieb von komplexeren Systemen wie Quantenlogikuhren dar. In einem Prototyp einer neuen Io-

nenfalle mit optimiertem Elektrodendesign wurde zum ersten Mal eine stark reduzierte Mikrobewegung über einen weiten Bereich von 130  $\mu\text{m}$  gemessen, die einen Uhrenbetrieb mit einer relativen Frequenzunsicherheit von  $10^{-18}$  erlaubt. (T. E. Mehlstäubler, FB 4.4, tanja.mehlstaebler@ptb.de)

## Metrologie für die Gesellschaft

### Das Beste aus zwei Welten: Laser und Maser kombiniert

Während Laser mit speziellen Resonatoren Frequenzen erzeugen können, die über kurze Zeiten betrachtet hochstabil sind, liegt die Stärke von Wasserstoffmasern in der Erzeugung hochstabiler Frequenzen auf langen Zeitskalen. Durch die gleichzeitige Anbindung eines Infrarot-Lasers an einen Laser mit hochstabilem Resonator und an einen Wasserstoffmaser konnte eine infrarote Frequenzquelle demonstriert werden, die relative Instabilitäten unter  $5 \cdot 10^{-15}$  über Mittelungszeiten von 0,4 s bis 10 000 s erreicht. Eine derartige Referenzfrequenz eignet sich sehr gut für die Verteilung über Glasfasernetze an Nutzer in Wissenschaft und Wirtschaft. (S.M.F. Raupach, FB 4.3, smf.raupach@ptb.de)

### Zeitvergleiche von Atomuhren über Telekommunikationsfasern

Mit einer Unsicherheit von weniger als 100 ps kann man Atomuhren in ihrem Stand mittels Telekommunikationsfasern über weite Entfernungen vergleichen. Das wurde in einem Experiment auf der 73 km langen Faserstrecke zwischen der PTB und der Leibniz Universität in Hannover demonstriert. Dabei spielt die sorgfältige Kalibrierung von Signallaufzeiten eine entscheidende Rolle. Erst damit wird es möglich, die geringe Instabilität der Übertragungsmethode auch für absolute Zeitvergleiche nutzbar zu machen. (D. Piester, FB 4.4, dirk.piester@ptb.de)

### Die Atomzeitskalen der PTB im Jahr 2012

Die Atomzeitskalen UTC(PTB) und TA(PTB) werden seit mehr als zwei Jahren mithilfe der Caesium-Fontänenuhr CSF1 realisiert. Seit dem Sommer 2012 wird die sogenannte „freie Atomzeitskala“ TA(PTB) ebenfalls von einem mittels CSF1 gesteuerten Wasserstoffmaser realisiert und in Form von TAI-TA(PTB) vom BIPM publiziert. Dies begründet ihre hohe Stabilität im Vergleich mit anderen Atomzeitskalen weltweit. (A. Bauch, FB 4.4, andre.as.bauch@ptb.de)

## Metrologie für die Wirtschaft

### Laser-basierter Messplatz für die Solarzellenmetrologie

Der stark wachsende Photovoltaik-Markt und die politisch gewünschte Energiewende haben zu einem starken zusätzlichen Bedarf an rückführbaren Messungen von neuartigen Solarzellen geführt. Basierend auf einem durchstimmbaren Ti:Saphir-Lasersystem wurde in der PTB ein neuer Messplatz für die Solarzellenmetrologie entwickelt. Damit kann zukünftig die spektrale Empfindlichkeit von Solarzellen und anderer Empfänger bezüglich der Bestrahlungsstärke im Bereich von 200 nm bis 4000 nm mit geringsten Messunsicherheiten bestimmt werden. (I. Kröger, FB 4.1, ingo.kroeger@ptb.de)

### Mikroskopische Strukturbreitenmessungen für die industrielle Messtechnik

In der industriellen Messtechnik gibt es einen steigenden Bedarf an rückgeführten Strukturbreiten-Referenznormalen mit Unsicherheiten im Bereich von 0,1  $\mu\text{m}$ . Diese Normale werden zur Kalibrierung von optisch abbildenden Messsystemen wie z. B. optischen Koordinatenmessgeräten eingesetzt. Die PTB entwickelte hierfür die benötigte metrologische Infrastruktur: Auf Basis modellbasierter Messverfahren, wie sie aus der Halbleiter-Metrologie bekannt sind, werden Strukturbreiten-Kalibrierungen auf geeigneten Referenzproben angeboten und durchgeführt. (B. Bodermann, FB 4.2, R. Köning, FB 5.2, bernd.bodermann@ptb.de)

### Differenzdeflektometrie zur Ebenheitsmessung von rauen und streuenden Oberflächen

Mit der Differenzdeflektometrie können Sub-Nanometer-Unsicherheiten für die Ebenheitsmessung von Oberflächen erreicht werden. Dieses Verfahren setzt spiegelnde Oberflächen voraus, sodass es nicht direkt auf streuende oder raue (technische) Oberflächen angewendet werden kann. Diese Einschränkung kann durch eine mechanische Ankopplung von Spiegeln an die Oberfläche überwunden werden. Ein Demonstrator-System wurde aufgebaut und erste Messungen damit durchgeführt. Erwartete Unsicherheiten für das gemessene Höhenprofil liegen im Bereich von 0,1  $\mu\text{m}$  und sind damit um eine Größenordnung besser als kommerziell verfügbare Neigungssensoren. Der Demonstrator kann zu einem kompakten Messgerät weiterentwickelt werden. (G. Ehret, FB 4.2, gerd.ehret@ptb.de)

### **Test eines Phase-retrieval-Verfahrens zur Bestimmung von Aberrationen von Mikroskop-Objektiven**

Phase-retrieval-Verfahren berechnen aus der Intensitätsverteilung um den Fokus die elektrische Feldverteilung in der Austrittspupille und somit die Aberrationen des optischen Systems. Sie stellen für viele optische Systeme die einzige Möglichkeit dar, ihre optische Aberration zu messen, da diese Verfahren in situ eingesetzt werden können. In Zusammenarbeit mit der TU Delft (Niederlande) wurde ein Phase-retrieval-Verfahren zur Bestimmung von Aberrationen von Mikroskopobjektiven getestet. Vergleichsmessungen mit interferometrischen Verfahren ergaben eine Differenz von 7 nm (rms), die durch mechanische Instabilitäten verursacht werden. Messunsicherheiten von  $\lambda/100$  erscheinen erreichbar. (A. Wiegmann, axel.wiegmann@ptb.de)

### **Arbiträre Frequenzsynthese phasenkohärenter optischer Strahlung**

In einem im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) geförderten Projekt wurden Verfahren zur Frequenzverschiebung optischer Frequenzkämme demonstriert und charakterisiert. Sie werden es zukünftig erlauben, phasenkohärentes Licht mit arbiträr abstimmbarer Frequenz zu erzeugen, wobei die Frequenz zu jedem Zeitpunkt auf eine Referenz, z. B. eine Atomuhr, rückführbar ist. Dies ermöglicht beispielsweise die simultane Übertragung von Zeitskalen und optischen Frequenzen auf höchstem Niveau. (E. Benkler, FB 4.5, Erik.Benkler@ptb.de)

### **Metrologie für asphärische optische Oberflächen**

Asphären und Freiformflächen werden zunehmend in optischen Systemen eingesetzt. Um solche Oberflächen hochgenau messen zu können, wird im Rahmen des Europäischen Metrologieprogramms EMRP ein Projekt mit 14 Partnern, davon 7 nationale Metrologieinstitute, durchgeführt und durch die PTB koordiniert. Der Transfer zu den Nutzern wird durch die Einbindung in das Nanotechnologie-Kompetenzzentrum Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung e.V. (CC UPOB e.V.) unterstützt. (M. Schulz, FB 4.2, michael.schulz@ptb.de)

### **Reflexionsmessungen für Raumfahrtanwendungen**

Mit dem roboterbasierten Gonioreflektometer der PTB wurde die bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion einer mit Gold/Titan bedampften Molybdänprobe bei einer Wellenlänge von 254 nm gemessen. Mit einer solchen Oberfläche ist das Elektrodengehäuse für die Testmassen der LISA-

Pathfinder-Satelliten-Mission der ESA beschichtet. Hierzu wurde für 10 verschiedene Einfallswinkel im Bereich von  $0^\circ$  bis  $85^\circ$  die gerichtete Reflexion um den spekularen Reflexionswinkel herum an insgesamt 1821 Punkten im Raum kalibriert. Die winkelabhängigen Reflexionseigenschaften bei 254 nm werden für Strahlungstransportrechnungen benötigt, da mit speziellen UV-Lampen eine Aufladung der Testmassen im Orbit gezielt verhindert werden soll. Die Messergebnisse werden benötigt, um die Güte des optischen Entladesystems zu analysieren. (A. Höpe, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

### **Datenbank für gedruckte Effektpigmente**

In einer Kooperation mit dem Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) der Technischen Universität Darmstadt wurden Messungen an gedruckten goniochromatischen Effektpigmenten durchgeführt. Dazu wurde in der PTB für den genormten Einfallswinkel von  $45^\circ$  die zugehörigen gerichteten Reflexionsverteilungen im sogenannten  $V(\lambda)$ -Bereich, dem Wellenlängenbereich des menschlichen Sehens, für den halben Halbraum (Viertelkugel) oberhalb der Druckmuster an insgesamt 271 Positionen bestimmt. Aus diesen Messungen lassen sich winkelabhängige Farbraumkoordinaten berechnen. Die Ergebnisse der Messungen sind in Form einer MATLAB-Datenstruktur für Forschungszwecke frei verfügbar (A. Höpe, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

### **Erweiterung des Kalibrierangebotes für Hochleistungslaser**

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit mehreren Industriepartnern wurde ein Messplatz für die Kalibrierung von Laserleistungsempfängern bis 1,2 kW im Wellenlängenbereich um  $1,06 \mu\text{m}$  aufgebaut. Die erweiterte Messunsicherheit ( $k = 2$ ) für Kalibrierungen beträgt derzeit 0,7 %. Damit schließt die PTB eine bisherige Lücke in ihrem Dienstleistungsbereich und ermöglicht die Rückführung für Hersteller und Anwender von Nd:YAG-, Scheiben- und Faserlasern sowie für Messgerätehersteller und Kalibrierlaboratorien. (F. Brandt, FB 4.5, friedhelm.brandt@ptb.de)

### **Kalibriermessplatz für Einzelphotonendetektoren**

Einzelphotonendetektoren finden zunehmend Verwendung in einer Reihe von Anwendungen, eine Rückführung auf nationale Normale fehlte aber bisher. In der PTB wurde ein Kalibriermessplatz aufgebaut, der es ermöglicht Einzelphotonendetektoren mittels abgeschwächter Laserstrahlung sowohl gegen analoge Detektoren als auch gegen ande-

re Einzelphotonendetektoren zu vergleichen. Eine erweiterte Messunsicherheit, auch unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Photonstatistik von Einzelphotonenquelle und Laser, von unter 1 % wurde erreicht. In Zukunft sollen auch hocheffiziente Einzelphotonenquellen als Strahlungsquelle genutzt werden. (S. Kück, FB 4.5, stefan.kueck@ptb.de)

## **Internationale Angelegenheiten**

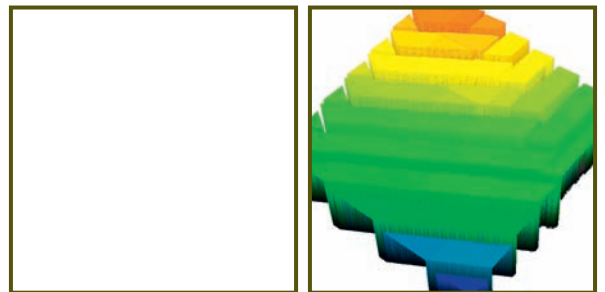
### **Absorptionsspektrum und geometrische Größe von Gold-Nanostäbchen**

Im Rahmen eines neuen VAMAS-Projekts (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) hat die PTB Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen dem optischen Absorptionsspektrum und der geometrischen Größe von Gold-Nanostäbchen durchgeführt. Die in guter Näherung lineare Beziehung zwischen dem Maximum des Absorptionsspektrums und dem Verhältnis aus Länge und Durchmesser der Nanostäbchen ist Grundlage für eine spätere ISO-Norm zur Charakterisierung dieser Nanomaterialien. (E. Buhr, A. Schirmacher, FB 4.2, FB 4.5, egbert.buhr@ptb.de)



# Abteilung 5

## Fertigungsmesstechnik





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

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

Fortschritte in der Messtechnik sind häufig sehr eng verbunden mit Fortschritten in der Fertigungstechnologie, die eine präzisere Fertigung von Normalen und deren maßverkörpernden Strukturen und Oberflächen ermöglichen. Die verbesserte Qualität der gefertigten Normale ermöglicht geringere Unsi-

cherheiten bei der Kalibrierung. Fortschritte in der Fertigungstechnologie werden zum einen durch die Entwicklung und Anwendung neuer Bearbeitungsverfahren und zum anderen durch Steigerungen der erreichbaren Bearbeitungsgenauigkeit erzielt. Ermöglicht wird dies durch die Anwendung optimierter Verfahren zur Charakterisierung und Kompensation der systematischen Abweichungen der Bewegungsachsen von Bearbeitungsmaschinen. Bei dem zuletzt genannten Punkt ist die Anwendung von Messtechnik sowie ihre Integration in die Bearbeitungsmaschine eine wesentliche Voraussetzung zur Steigerung der Bearbeitungsgenauigkeit.

Der Schwerpunkt des Berichtes der Abteilung liegt in diesem Jahr auf der Diskussion dieser wechselseitigen Abhängigkeit von erzielbarer Fertigungsgenauigkeit von Normalen einerseits und Erweiterung der Funktion anwendungsspezifischer Normale und Prüfkörper sowie Reduzierung der Kalibrierunsicherheiten von Normalen andererseits.

### **Fertigung von Normalen und Prüfkörpern in der Fertigungsmesstechnik**

#### **Beispiele aus der Oberflächenmesstechnik**

Zur Kalibrierung der vertikalen Achse von Oberflächenmessgeräten werden häufig Stufenhöhen- oder Tiefeneinstellnormale verwendet, wobei man zur Kalibrierung des Gerätes ein Normal wählt, welches mit der zu erwartenden Höhe der zu untersuchenden Probe gut übereinstimmt. Um über den ganzen Bereich der vertikalen Messachse Aussagen treffen zu können, müssten sukzessiv Normale mit verschiedenen kalibrierten Stufenhöhen gemessen werden. Eine Alternative sind Normale, die im Messbereich mehrere Stufen aufweisen. Vorteil dabei ist, dass in einer einzigen Messung der gesamte Messbereich in vertikaler Richtung kalibriert werden kann. Die größere Zahl von Stützstellen erlaubt auch erste Aussagen über die Nichtlinearität der vertikalen Achse. Bedingung hierfür ist aber eine geringe Messunsicherheit der Stufenhöhenmessung.

Für Messungen über den gesamten vertikalen Messbereich, wie dies z. B. bei Formmessungen mit Weißlichtinterferometern der Fall ist, ist die Linearität der vertikalen Achse zu prüfen. Hierzu wurden Prototypen für Multistufenhöhennormale entwickelt, die angepasst an verschiedene optische Mikroskope in zwei unterschiedlichen Ausführungen gefertigt wurden, einer Makro- und einer Mikroausführung. Die Makroausführung weist über einen Bereich von 4,375 mm äquidistante Stufen aus, während die Mi-

#### Titelbild:

Teilausschnitt (11,7 mm × 11,7 mm) eines Funktionsmusters des neuentwickelten makroskopischen Multistufenhöhennormals zur Kalibrierung von großflächig messenden optischen Mikroskopen. Die Abbildung ist hierbei aus insgesamt 25 konfokalen Mikroskopaufnahmen zusammengesetzt. Die Terrassen sind bezüglich der Höhe farblich kodiert dargestellt (rot oben, blau unten). Die Höhendifferenz zwischen benachbarten Ebenen in Richtung der Diagonalen beträgt nominell 375 µm.

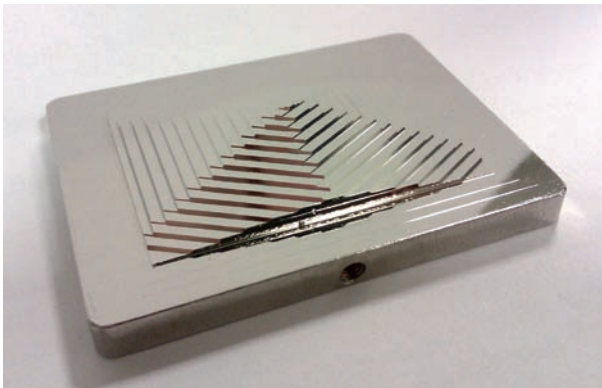


Bild 1a: Multistufenhöhennormal mit Stufen über einen Bereich von 4,375 mm. Die Abmessungen der Grundfläche betragen 53 mm x 42 mm, die der Messfläche 39 mm x 28 mm. Die direkten Stufen haben nominelle Abstände von 375 µm.

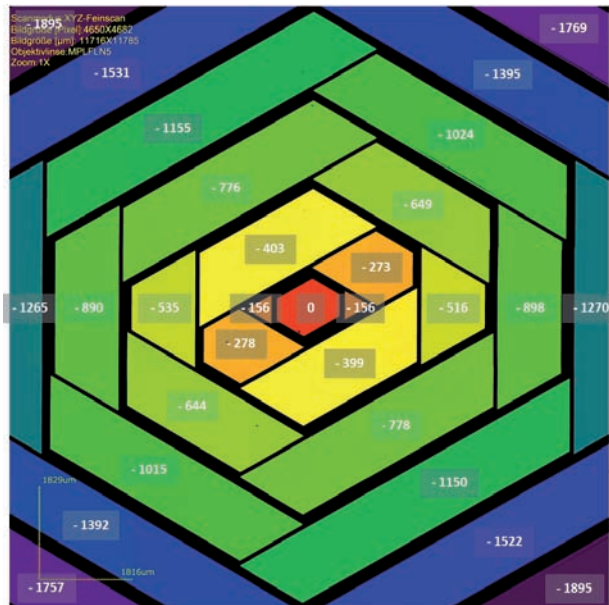


Bild 1b: Zusammengesetzte, konfokale Aufnahmen (Bildfeld ca. 11,7 mm x 11,8 mm) im Zentralbereich des Prototypen mit der jeweiligen Höhe in Mikrometern. Das zentrale Feld (rot) ist hier die Nulllage. Es wurden mit einem 5-fach Objektiv 5 x 5 Einzelbilder (Einzelbildgröße 2574 µm x 2579 µm) zusammengesetzt. Der Überlapp beim Aneinandersetzen (Stitching) beträgt ca. 13 %.

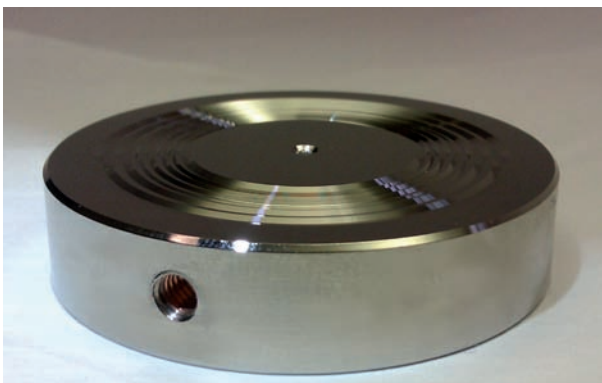


Bild 1c: Mikroskopisches Multistufennormal mit äquidistanten Stufenhöhen von 12 µm, 24 µm und 48 µm über einen vertikalen Bereich von 240 µm.

kroausführung eher für den Bereich der hochauflösenden, interferentiell arbeitenden Mikroskope konzipiert ist.

Beim Makro-Multistufenhöhennormal (Bild 1a) sind die Stufen speziell angeordnet, um im Messbereich (Gesichtsfeld) eines optischen Mikroskops einige Stufen realisieren zu können. Daraus resultieren Anforderungen an die Symmetrie des Normal. Beim Makro-Multistufenhöhennormal betragen die nominellen Abstände der Stufen in einer Richtung 375 µm. Lateral benachbarte Stufen sind um

125 µm vertikal versetzt angeordnet. Die nominelle Gesamthöhe des Normal beträgt 4,375 mm.

An die Fertigungsqualität der jeweiligen Terrassen und der Stufenhöhen werden hohe (Makro) bzw. höchste (Mikro) Ansprüche gestellt. Die Herstellung erfolgte deshalb mit einem Diamantwerkzeug auf einer 3-Achs-Präzisions-Fräsmaschine (Primacon PFM 24 NGd). Das Werkzeug wurde speziell für die Geometrie der Stufenflanken profiliert bzw. angefertigt.

In Ergänzung zur Grundkalibrierung der Bewegungsachsen des Messgerätes ist bei der Messung an Probenoberflächen der Antast- oder Abbildungsprozess des Messgerätes zu analysieren. Eine wichtige Größe ist hierfür die Auflösung der entsprechenden Messsonde. Bei der taktilen Antastung ist diese vielfach durch den Spitzenradius der benutzten Sonde gegeben. Für die Oberflächenmesstechnik ist ferner das Übertragungsverhalten des Messgerätes wichtig. Dieses gibt an, inwieweit die Amplitude einer Strukturfolge, bei der sich die Strukturbreite verringert, noch korrekt vom Gerät gemessen wird. Für die Untersuchung des Übertragungsverhaltens anwendbare, sogenannte „Chirp“-Strukturen lassen sich durch verschiedene Techniken realisieren.

Für Anwendungen in der optischen Mikroskopie wurden in einem Prototyp-Normal zwei unterschiedliche Chirp-Strukturen gefertigt: eine Makrostruktur, bestehend aus einem Sinussignal mit konstanter Amplitude von 400 nm, bei dem sich die Strukturbreite bzw. die Wellenlänge der aneinander gereihten Strukturen von 91 µm bis hinunter zu 10 µm ändert, sowie eine Mikrostruktur mit Wellenlängen von 12 µm bis hinter zu 4,3 µm.

Die beiden Chirp-Gitter wurden mittels einer Ultrapräzisions-Drehmaschine (Typ „250 UPL“ des Herstellers Moore Nanotechnology Systems) durch den Einsatz zweier unterschiedlicher monokristalliner Diamant-Werkzeuge in einer Aufspannung des Werkstückes in Nickel-Phosphor-Schichten gefertigt. Die resultierenden mikrometerbreiten periodischen Strukturen weisen Form-Abweichungen im

Nanometerbereich bei optischer Oberflächenqualität auf.

Bild 2 zeigt das gemessene Oberflächenprofil sowie ein Bild eines gefertigten Chirp-Prototypen.

Bei der Formmessung mit optischen Messgeräten wird häufig der gesamte laterale Messbereich ausgenutzt. Durch formbedingte Variation der Höhe des Prüflings wird gleichzeitig auch ein größerer Bereich des vertikalen Messbereiches benötigt. Insofern sind Abweichungen durch die optische Abbildung fast unvermeidlich und müssen bei der genauen Bestimmung der gemessenen Formabweichung sowie ihrer Messunsicherheit berücksichtigt werden. Normale, die hier zur Prüfung bestimmter Merkmale eingesetzt werden, stellen höchste Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit sowie auch an die zu ihrer Kalibrierung eingesetzten Referenz-Messgeräte. Als Formelemente wurden dabei zunächst einfache konvexe und konkave Elemente, wie z. B. Winkel (Steigungen), Zylindermantel- oder Kugelsegmente, ausgewählt. Hierfür wurden erste Prototypen im Wissenschaftlichen Gerätebau gefertigt, die zurzeit mit verschiedenen Geräten im Fachbereich *Oberflächenmesstechnik* charakterisiert bzw. kalibriert werden.

Die Bilder 3 und 4 zeigen erste Prototypen dieser Normale. Bild 3 zeigt den Prototypen mit konvexen und konkaven Segmenten von Zylindermantelflächen für ausgewählte Radien, Bild 4 konvexe und konkave dreieckförmige Strukturen für einige nominelle Winkel. Die nominellen Werte der Geo-

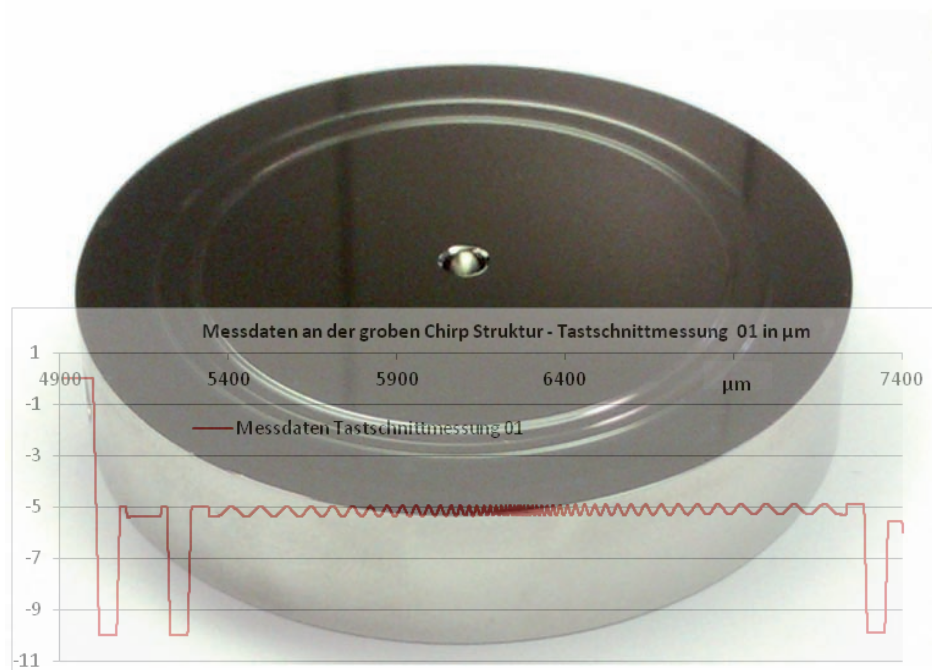


Bild 2: Hintergrund: Bild des gefertigten Chirp-Prototypen. Vordergrund: Taktil gemessenes Profil am größeren Chirp-Gitter. Hier variiert die Wellenlänge im Bereich von 10 µm bis zu 91 µm.

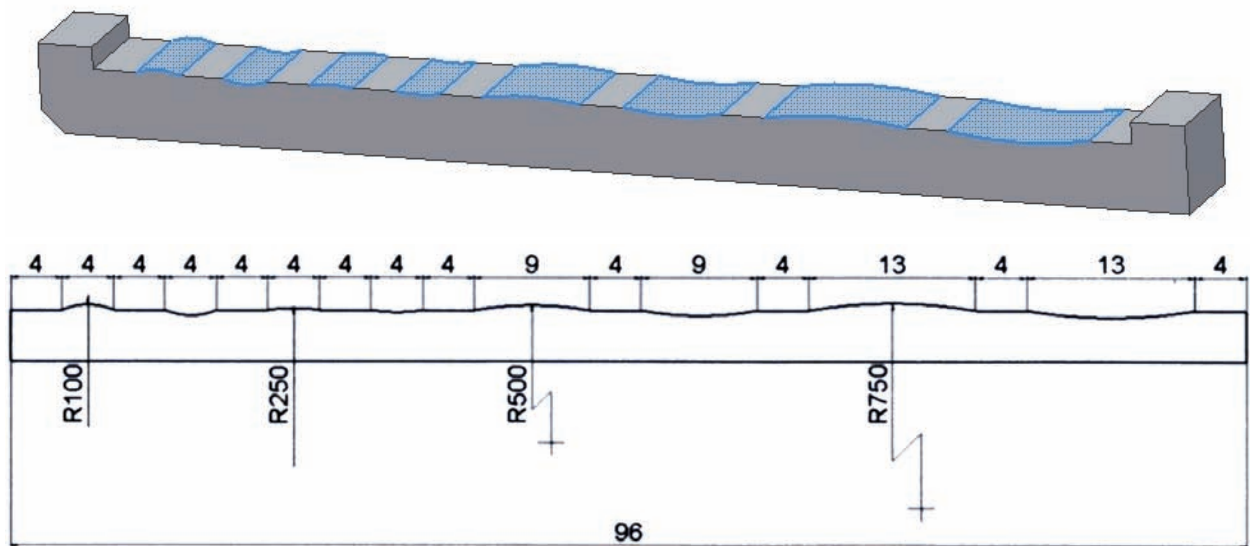


Bild 3: Formnormal mit konvexen und konkaven Zylindermantelsegmenten ( $L \times B \times H$ : 96 mm  $\times$  8,5 mm  $\times$  8 mm) (oben). Skizze mit den nominellen Werten für die Radien von 100 mm bis 750 mm (unten)

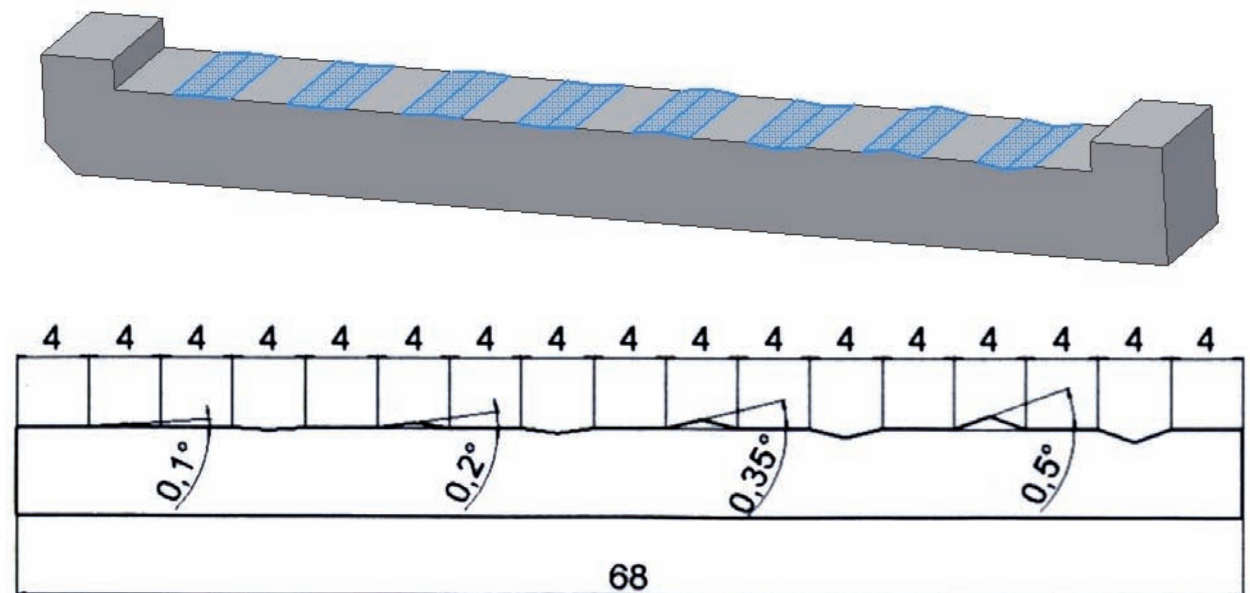


Bild 4: Formnormal mit geneigten Flächen ( $L \times B \times H$ : 68 mm  $\times$  8,5 mm  $\times$  8 mm) (oben). Skizze mit nominellen Werten für die Winkel (unten)

metrielemente sind dabei auf verschiedene Vergrößerungen von optischen Mikroskopen abgestimmt.

Beide Prototypen wurden mittels Drahterosion in Hartmetall auf einer hochgenauen Maschine gefertigt (Typ „CUT 1000 OilTech“ des Herstellers AGIE). Mit dem in dieser Maschine genutzten Dielektrikum Öl ist die Anfälligkeit des Werkstoffs Hartmetall gegenüber der Auswaschung oder Kor-

rosion der Kobalt-Binderphase geringer als im üblicherweise genutzten Dielektrikum Wasser. Somit können korrosionsbeständige und glatte Oberflächen mit hoher Formtreue hergestellt werden. Das Dielektrikum Öl erlaubt zudem die schädigungsfreie Bearbeitung zahlreicher weiterer korrosionsempfindlicher Werkstoffe.

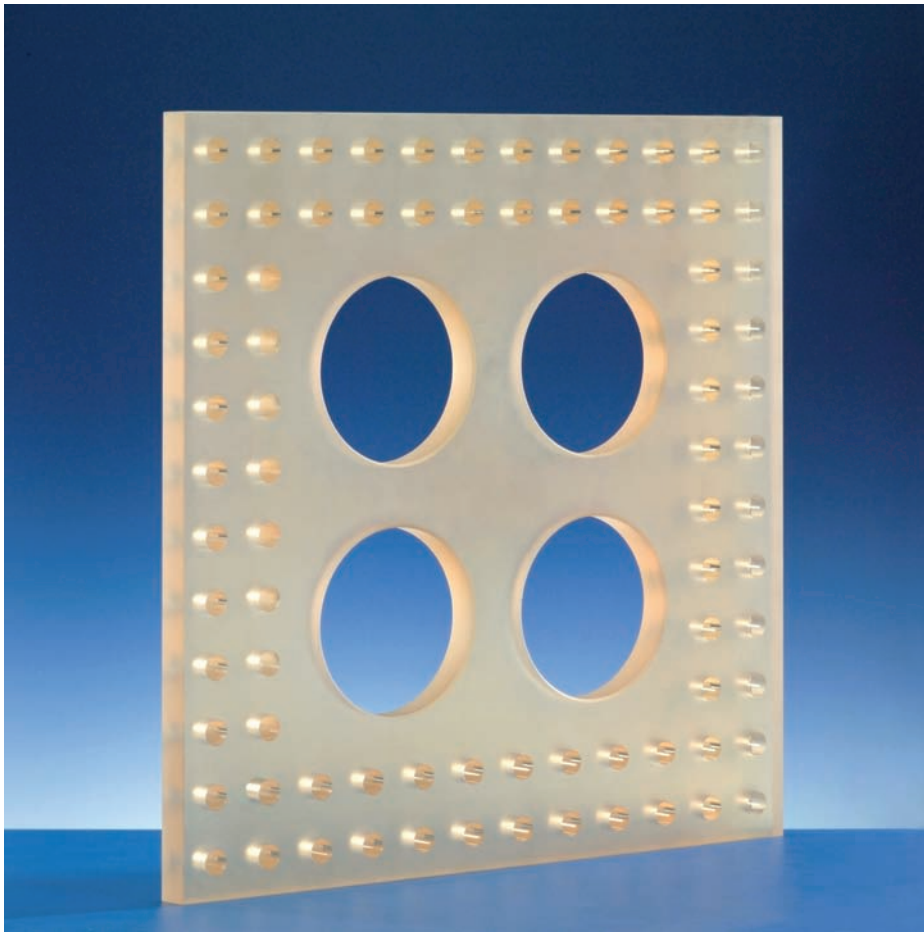


Bild 5: Gefertigte Lochplatte mit den Abmessungen 610 mm × 610 mm × 30 mm aus der Glaskeramik „Zerodur®“.

Die in Bild 3 bzw. 4 gezeigten Prototypen aus Hartmetall sind 8 mm dick, 8,5 mm breit und 96 mm bzw. 68 mm lang. Die zu fertigenden Radien der Strukturen (Bild 3) liegen im Bereich von nominell 100 mm bis hin zu 750 mm und sind somit sehr flach. Die Größe der Strukturen ist auf die Gesichtsfelder, ihre Radien sind auf die numerische Apertur optischer Messgeräte abgestimmt. Die Formnormale ermöglichen somit eine Beurteilung der Abbildungsfehler optischer Oberflächen-Messgeräte. Die Mittenrauheit der hergestellten Oberflächen liegt unter  $R_a = 50$  nm. Die in ersten Messungen ermittelten durchschnittlichen Werte für die Schiefe (Skewness  $R_{sk} = 0,085$ ) und Wölbung (Kurtosis  $R_{ku} = 2,82$ ) der Oberflächen deuten darauf hin, dass die durch Funkenerosion erzeugten Oberflächen Topografien aufweisen, die gut mit einer Gauß'schen Normalverteilung ( $R_{sk} = 0$ ,  $R_{ku} = 3$ ) beschrieben werden können.

Im VDI-GMA-Fachausschuss 3.41 wurden in den letzten Jahren unter wesentlicher Mitwirkung von Experten der PTB drei Richtlinien zur Kalibrierung von und mit optischen Messmikroskopen (Normenreihe 2655) sowie eine für die Grundkalibrierung von Rasterkraftmikroskopen (Normenreihe 2656) erarbeitet. Neben der Grundkalibrierung sind dies auch anwendungsspezifische Richtlinien zur Nut-

zung derartiger bildhafter Verfahren für die Form- und die Rauheitsmesstechnik. Die auf nationaler Ebene bewährten Richtlinien werden dann oftmals durch Beteiligung entsprechender DIN-Gremien auch in die internationale Normung eingebracht. Die hier vorgestellten Normale werden hierin zur Kalibrierung bzw. zur Verifizierung wichtiger Geräteeigenschaften und für die Bestimmung der Messunsicherheitsbeiträge benötigt.

### Beispiel aus der Koordinatenmesstechnik

Kalibrierte Kugel- und Lochplatten werden als Normale für die Abnahme und periodische Überwachung von Koordinatenmessgeräten gemäß der in VDI/VDE 2617 und DIN EN ISO 10360 beschriebenen Verfahren eingesetzt. Zur Erreichung von möglichst geringen Kalibrierunsicherheiten der Normale sind an deren Material sowie an die Bearbeitungsqualität der maßbestimmenden Geometrielemente besondere Anforderungen gestellt.

In enger Kooperation mit dem Fachbereich *Koordinatenmesstechnik* wurde eine Lochplatte mit den Abmessungen 610 mm × 610 mm × 30 mm aus der Glaskeramik „Zerodur“ hochgenau endbearbeitet. Es waren 80 durchgehende Bohrungen mit einem Durchmesser von 20 mm äquidistant in zwei Reihen

in den Abständen 30 mm und 80 mm vom Rand angeordnet anzubringen, siehe Bild 5. Diese spezielle Geometrie der Lochplatte ermöglicht durch geeignete Messstrategien eine hochgenaue Kalibrierung von Koordinatenmessmaschinen. Ziel der Endbearbeitung der Platte war die Gestaltung der Oberflächen in der Form, dass die Lage der Bohrungen mit Messunsicherheiten im Sub-Mikrometerbereich bestimmt werden kann. Die Formabweichungen der Bohrungen müssen dafür ebenfalls unter einem Mikrometer liegen sowie möglichst glatte Oberflächen aufweisen.

Eine spezielle Schleifmaschine (Typ „500-CPWZ“ des Herstellers Moore) wurde für diese Bearbeitungsaufgabe eingesetzt, da diese neben den für Koordinaten-Schleifmaschinen üblichen linearen Bewegungsachsen eine um drei Achsen erweiterte Kinematik aufweist, die insbesondere eine hochgenaue Bearbeitung zylindrischer Konturen ermöglicht. Die einzelnen Fertigungsschritte wurden mithilfe von Probewerkstücken im Rahmen von Versuchsreihen entwickelt. Nur durch die fertigungsbegleitenden Form- und Oberflächenmessungen konnte die angestrebte Präzision der Bearbeitung realisiert werden.

Sowohl beim Schleifprozess als auch beim anschließenden Polierprozess kommt dem sogenannten Abrichtprozess des Werkzeugs eine zentrale Bedeutung zu. Erst wenn das Werkzeug sehr gut auf die zu fertigende Geometrie angepasst und eingearbeitet ist, kann mit dem geeigneten maschinellen Prozess eine derartige Maßhaltigkeit am Werkstück erreicht werden. Die letztlich erreichten Formabweichungen der Bohrungen liegen deutlich unter  $1\ \mu\text{m}$ , die Rauheiten der Bohrungsoberflächen liegen durchschnittlich unterhalb von ca.  $R_a = 30\ \text{nm}$ .

### Beispiel aus dem Bereich Grundlagen der Metrologie

Die Möglichkeit zur Fertigung von Präzisionskugeln aus einkristallinem Silizium-Rohmaterial ist für die Arbeiten zur Bestimmung der Avogadro-Konstanten von großer Bedeutung. Hierfür sind Kugeln der Masse von ca. 1 kg mit Spezifikationen für die Rundheitsabweichung von unter 100 nm und für die Mittenrauheit der Oberfläche von unter 1 nm zu fertigen. Bei den verschiedenen Schritten der Fertigungskette ist dabei unbedingt darauf zu achten, Oberflächendefekte und Kontaminationen durch Fremdmaterial zu vermeiden. Eine besondere Herausforderung für die abschließenden Fertigungsschritte stellt dabei die durch die kubische Kristall-

struktur des Si-Material bedingte Anisotropie seiner Eigenschaften wie z. B. Härte und E-Modul dar.

In der PTB wurde eine mehrstufige Fertigungskette aufgebaut, die den oben genannten Anforderungen genügt bzw. diese teilweise noch deutlich übertrifft. Die Fertigungskette setzt sich in vereinfachter Darstellung aus den Bearbeitungsschritten Trennen, Drehen, Läppen und Polieren zusammen. Bild 6 zeigt die verschiedenen Stadien der Bearbeitung.

Die einzelnen Prozessschritte der in Kernbereichen automatisierten Fertigungskette werden dabei umfassend dokumentiert, die Qualität der verwendeten Werkzeuge sowie Läpp- und Poliermittel wird geprüft und laufend überwacht. Zudem ist die fertigungsbegleitende Messtechnik ein integraler Bestandteil der etablierten Fertigungskette für die Kugelbearbeitung.

Mit den in der Abteilung entwickelten Prozessen für die Präzisions-Kugelbearbeitung und den damit erreichbaren geringeren geometrischen Abweichungen von der idealen Kugelform rückt auch eine relative Gesamtunsicherheit für das Avogadroprojekt von  $< 2 \cdot 10^{-8}$  in greifbare Nähe.

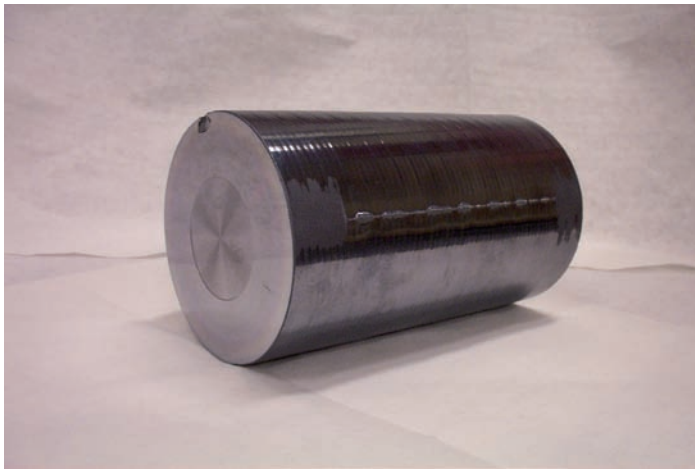
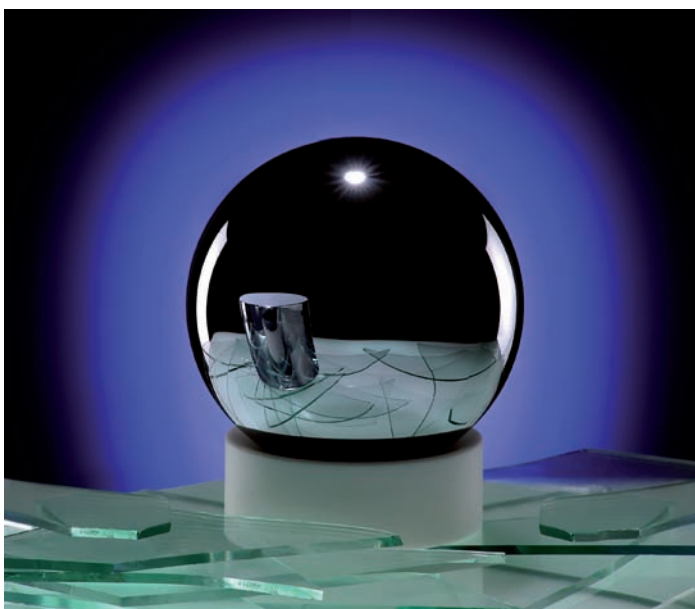
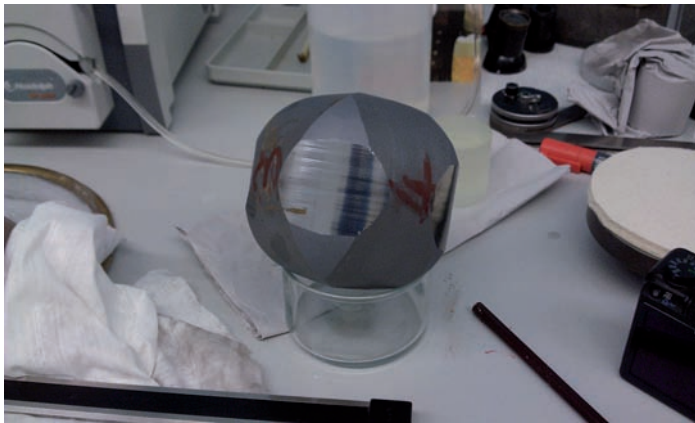


Bild 6: Bilder der verschiedenen Stadien der Kugelfertigung: a) Zylindrischer Si-Rohling, b) nach dem Trennprozess, c) nach dem Läppprozess, d) nach dem Polierprozess



## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Konstruktion und Fertigung eines Primärnormals zur Darstellung der Einheit der Luftkerma

In Zusammenarbeit der Arbeitsgruppe *Dosimetrie für die Röntgendiagnostik* und dem *Wissenschaftlichen Gerätebau* der PTB wurde eine neue Freiluftionisationskammer entwickelt und gefertigt, die u. a. hohe Anforderungen an die Homogenität des elektrischen Feldes bei minimiertem Messvolumen erfüllen muss, um die Messunsicherheit verringern zu können. Die damit für den Aufbau der Messkammer aus plattenförmigen Ringelektroden erforderlichen Fertigungsgenauigkeiten sind eine große Herausforderung an die technische Realisierung. (H. Drösemeyer, FB 5.5, [holger.droesemeyer@ptb.de](mailto:holger.droesemeyer@ptb.de))

#### Spektroskopische Rückführung von optischen Frequenzänderungen in der Absolutinterferometrie

Im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsprojekts untersucht die PTB die Anwendung dopplerfreier Absorptionsspektroskopie zur In-situ-Rückführung absoluter interferometrischer Distanzmessungen von bis zu 100 m mit einem durchstimmbaren Laser. Hierbei muss innerhalb einer Zeitspanne von ca. 10  $\mu$ s eine einzelne, dopplerfreie Absorptionslinie (Lamb-Dip) erfasst werden. Dies wird durch eine intensive Optimierung des experimentellen Aufbaus sowie die Entwicklung geeigneter Algorithmen ermöglicht. (G. Prellinger, K. Meiners-Hagen, F. Pollinger, FB 5.4, [guenther.prellinger@ptb.de](mailto:guenther.prellinger@ptb.de))

#### Einfluss von Wechselwirkungskräften auf Rasterkraftmikroskopsonden bei der Messung an Nanostrukturen

In der PTB wurden numerische Rechnungen zum Einfluss von Wechselwirkungskräften bei der Antastung von Nanostrukturen mit Rasterkraftmikroskopsonden durchgeführt. Simulationsrechnungen von attraktiven Wechselwirkungen zwischen Strukturkanten und Sonden weisen auf eine mögliche Verbiegung von Sondenspitzen hin. (D. Hüser, FB 5.2, [dorothee.hueser-espig@ptb.de](mailto:dorothee.hueser-espig@ptb.de))

#### Ellipsometrische Bestimmung der Schichtdickentopografie von $^{28}\text{Si}$ -Kugeln

Nach der erfolgreichen Entfernung metallischer Kontaminationen von der Oberfläche der Si-28-Kugeln ist deren mittlere Oxidschichtdicke mittels

ellipsometrischer Messung und XRR/XRF-Kalibrierpunkten zu  $d_{\text{av}} = 1,47$  nm bestimmt worden. (I. Busch, FB 5.1, [ingo.busch@ptb.de](mailto:ingo.busch@ptb.de))

### Metrologie für die Wirtschaft

#### Dünne keramische Schichten zur elektrischen Isolation von Metallen

Für den Einsatz von Sensoren auf Basis der Dünnschichttechnik, etwa bei der direkten Applikation auf Werkstücken, ist eine vollständige elektrische Isolierung von den häufig verwendeten metallischen Werkstoffen durch eine mikrometerdünne Isolationsschicht notwendig. Die elektrische Isolationsfähigkeit geeigneter Schichten und der Einfluss diverser Beschichtungsparameter auf deren Qualität wurden in der PTB mit Methoden der statistischen Versuchsplanung untersucht. (F. Schmaljohann, FB 5.5, [frank.schmaljohann@ptb.de](mailto:frank.schmaljohann@ptb.de))

#### Fertigung einer Lochplatte zur Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten

Im Bereich der Koordinatenmesstechnik werden präzise gefertigte, kalibrierte (Kugel-)Lochplatten für die Rückführung der Geräte vielfältig eingesetzt. Auf einer neuen Koordinatenschleifmaschine wurde im *Wissenschaftlichen Gerätebau* eine Lochplatte hochgenau endbearbeitet. Die resultierenden Formfehler der 80 Bohrungen mit einem Durchmesser von 20 mm liegen deutlich unter 1  $\mu$ m. (R. Meeß, FB 5.5, [rudolf.meess@ptb.de](mailto:rudolf.meess@ptb.de))

#### Großverzahnungsmessungen mit einem Gelenkarm-Messgerät

Am Großverzahnungsnormale der PTB wurden Messungen mit einem handgeführten Gelenkarm-Messgerät durchgeführt. Zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit der manuellen Messungen und der Vergleichbarkeit zu Kalibrierwerten wurden anwenderfreundliche Messschablonen entwickelt und erfolgreich eingesetzt. (K. Kniel, J. Hirsch, FB 5.3, [karin.kniel@ptb.de](mailto:karin.kniel@ptb.de))

#### Prüfung von Lasertrackern an der Referenzwand der PTB

An der Referenzwand zur Charakterisierung optischer 3D-Längenmesssysteme der PTB sind im ersten Jahr ihres Bestehens eine Reihe von Lasertrackern unterschiedlicher Bauart mit teils sehr unterschiedlichen Ergebnissen getestet worden. (K. Rost, FB 5.3, [kerstin.rost@ptb.de](mailto:kerstin.rost@ptb.de))



### **Rückführung von Auswertalgorithmen für die Metrologie**

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes „Traceability for computational-intensive metrology“ (TraCIM) werden zusammen mit weiteren Metrologieinstituten Methoden zur Rückführung von Auswertesoftware durch Vergleich mit Referenzdatensätzen entwickelt. Über das Internet sollen hierbei registrierte Nutzer jederzeit und weltweit ausgewählte Auswertalgorithmen auf Richtigkeit der Ergebnisse prüfen können. (F. Härtig, K. Wendt, FB 5.3, frank.haertig@ptb.de)

### **Quantitative Bewertung des Verschleißes von DLC-beschichteten Oberflächen im Nanometerbereich durch Messungen mit dem Rasterkraftmikroskop**

Der Verschleiß an DLC-beschichteten Messobjekten im Nanometerbereich wurde quantitativ durch Messungen mit einem Rasterkraftmikroskop bewertet. In den durchgeführten Untersuchungen stellte sich heraus, dass der Rauheitskennwert  $S_{sk}$ , die Schiefe der Amplitudendichtekurve (ISO 25178-2), der empfindlichste und zuverlässigste Parameter zur Beschreibung der sehr kleinen mit dem Verschleiß verbundenen Oberflächenänderungen ist. (G. Dai, FB 5.2, gaoliang.dai@ptb.de)

### **Rausch- und driftarme Erfassung eines Sensorsignals am Beispiel eines Rasterkraftmikroskops**

Eine neuartige Sensorschnittstellenschaltung ermöglicht die Anregung und Auslesung eines piezoelektrischen AFM-Sensors über einen elektrischen Anschluss. Durch Nutzung eines rein passiven Kompensationsnetzwerkes in Verbindung mit einer speziellen Signaltransformatorschaltung werden eine hohe Driftstabilität und ein großer Rauschabstand erreicht. (H. Illers, H. Danzebrink, FB 5.2, hartmut.illers@ptb.de)

### **Dickenmessung weicher Polymerschichten mit Tastschnittgeräten**

Im Rahmen des EMRP-Projektes MeProVisc entwickelt die PTB neue Verfahren zur Korrektur der Dickenmessung von weichen Polymerschichten auf harten Substraten mit Tastschnittgeräten. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass die systematischen Abweichungen taktiler Schichtdickenmessungen durch ein viskoses rheologisches Modell mit nichtlinearer Dehnungsverfestigung gut beschrieben werden können. (Zhi Li, FB 5.1, zhi.li@ptb.de)

### **Entwicklung eines MEMS-basierten Mikro-AFM-Kopfarrays mit austauschbaren Cantilevern**

Im Rahmen eines DFG-Projektes wurde in Zusammenarbeit mit externen Partnern ein neues auf MEMS basierendes Mikro-AFM-Kopfarray entwickelt. Es kann pro Zeile mit 7 austauschbaren Cantilevern ausgestattet werden, um parallele AFM-Topografiemessungen zu ermöglichen. (Sai Gao, FB 5.1, sai.gao@ptb.de)

### **Neuartiger piezoresistiver Mikrokraftsensor für die Kalibrierung von Tastschnittgeräten**

Bei Tastschnittmessungen an Polymerstrukturen sind aufgrund der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der verwendeten Materialien antastkraftabhängige Deformationen die Hauptursache für Messabweichungen. Im Rahmen eines BMWi-Projektes wurden Mikrokraftsensoren mit kleiner Nichtlinearität in der Kraft-Auslenkungskurve für die Kalibrierung der Antastkraft von Tastschnittgeräten entwickelt. (U. Brand, FB 5.1, uwe.brand@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Rundholzmessung in Harvestern**

Die genaue Bestimmung des Holzvolumens während des Fäll- und Entastungsvorgangs in Holzvollerntern (Harvestern) über die Messung des Scheitdurchmessers ist derzeit relativ ungenau. Eine in der PTB entwickelte neue Kombination aus Sensorik und Prüfkörper ermöglicht eine deutliche Verbesserung bei der Bestimmung des Durchmessers des Rundholzes. Durch geschickte Auswertung kann hierbei neben einer erhöhten Genauigkeit auch die Anzahl der Arbeitsschritte bei der Kalibrierung der Harvester-Messköpfe reduziert werden. (A. Barthel, FB Q.3, andreas.barthel@ptb.de, K. Meiners-Hagen, I. Lohse, FB 5.4, karl.meiners-hagen@ptb.de)

#### **Prüfung von Phantomen für die medizinische Röntgendiagnostik**

Gemeinsam mit dem Klinikum Braunschweig, der BAM und dem TÜV Nord wurden Prozeduren für eine Routineprüfung von Phantomen für die medizinische Röntgendiagnostik entwickelt. Aufgabe der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* war die Bestimmung der Dimensionen von Referenzphantomen. Aus den Projektergebnissen an einer Stichprobe von Phantomen wurden Vorschläge zur Verbesserung der Phantome und der Normen zu deren Spezifikation sowie eine Empfehlung zur Qualitätssicherung

abgeleitet. (Dr. U. Neuschaefer-Rube, FB 5.3, ulrich.neuschaefer-rube@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

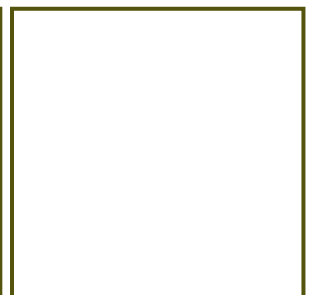
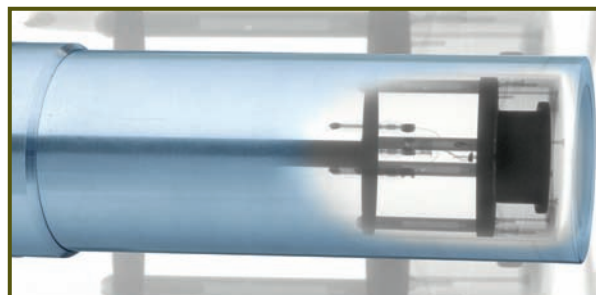
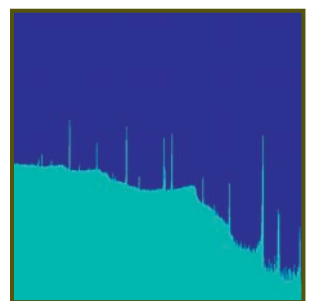
#### **Erfolgreiche Teilnahme an einem internationalen Ringvergleich auf dem Gebiet der Rauheitsmesstechnik**

In dem internationalen Maßvergleich APMPL-K8 haben 16 nationale Metrologieinstitute weltweit ihre Kalibrierdienstleistungen im Bereich Rauheit und für Messungen an Tiefeneinstellnormalen mit optischen- und Tastschnittverfahren verglichen. Zusätzlich erfolgte auch mit Softwarenormalen ein Vergleich der Algorithmen zur Berechnung von Kenngrößen. Alle 35 von der PTB gemessenen Kennwerte zeigten eine gute Übereinstimmung mit dem jeweiligen Referenzwert des Vergleiches und bestätigen damit die von der PTB angebotene Dienstleistung. (L. Jung-Albrecht, FB 5.1, lena.jung-albrecht@ptb.de)



# Abteilung 6

## Ionisierende Strahlung



Gesundheit, Umwelt und Energie sind die Themen, die auch im Bereich „Ionisierende Strahlung“ wichtige Zukunftsfelder deutscher und internationaler Forschungs- und Entwicklungspolitik darstellen. Sie bilden deshalb die großen Arbeitsgebiete der Abteilung. Dabei geht es nicht nur um die direkte metrologische Unterstützung medizinischer Anwendungen wie zum Beispiel die Dosimetrie bei den verschiedensten Formen der Tumorthherapie, sondern auch um Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der Wirkmechanismen ionisierender Strahlung in biologischen Geweben, um Fragen des Strahlenschutzes für Personal und Patienten sowie um die sichere Überwachung unserer Umwelt zum Schutz der Bürger vor den Gefahren radioaktiver Stoffe. Mit der messtechnischen Begleitung wichtiger Umweltthemen tragen wir zum Erhalt und der Verbesserung unserer Lebensbedingungen bei. Mit der Entwicklung moderner Techniken für die Messung ionisierender Strahlung – seien es geladene Teilchen, Photonen oder Neutronen – engagieren wir uns in Projekten der wissenschaftlichen Grundlagenforschung.

### Neues europäisches Forschungsprojekt für die Dosimetrie in der Strahlentherapie

Im Rahmen des European Metrology Research Programme (EMRP) wurde das Forschungsprojekt „Metrology for radiotherapy using complex fields“ bewilligt, an dem neben der PTB acht weitere nationale Metrologieinstitute beteiligt sind. Im Fokus stehen Fragestellungen der Dosimetrie bei modernen Methoden der Strahlentherapie für die Tumorbehandlung. Für das Gebiet der Therapie mit Röntgenstrahlung und für die neue Therapieform mit Protonen oder Kohlenstoffionen soll jeweils eine robuste rückführbare Dosimetrie-Kette aufgebaut werden. Dies umfasst zum einen die Entwicklung und den Vergleich von verschiedenartigen Primärnormalen zur Darstellung der Dosis-Messgröße in der Therapie, der Wasser-Energiedosis, und zum anderen den Aufbau einer gesicherten, rückführbaren Weitergabe der Wasser-Energiedosis mittels Sekundärnormalen für Kalibrierlaboratorien und für die klinische Routine. Der Projekt-Bereich „Brachytherapie“ konzentriert sich auf die Dosimetrie bei der Therapie mit Miniatur-Röntgenanlagen, die sogenannte elektronische Brachytherapie. Hier soll eine Kalibrierkette zur Weitergabe der Wasser-Energiedosis an die Medizinphysiker in den Kliniken auf-

gebaut und etabliert werden. Der größte Teilbereich des Projektes widmet sich der Qualitätssicherung in der modernen externen Strahlentherapie mit hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlung, wie beispielsweise der Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT).

### Alanin-Dosimeter für ultraharte Röntgenstrahlung und hochenergetische Elektronen

Im Laufe des Jahres konnte eine umfangreiche Messreihe abgeschlossen werden, die das Ziel hatte, das relative Ansprechvermögen des Alanindosimeters für die therapeutisch relevante ultraharte Röntgenstrahlung zu bestimmen. Das Ansprechvermögen bezieht sich dabei auf die Wasser-Energiedosis relativ zu  $^{60}\text{Co}$ -Strahlung.

Mithilfe des Wasserkalorimeters waren zunächst Qualitäts-Korrektionsfaktoren  $k_Q$  für Ionisationskammern für die an den beiden klinischen Beschleunigern verfügbaren Strahlungsqualitäten bestimmt worden. Die geringe Unsicherheit von 0,31 % der neuen  $k_Q$ -Werte ermöglichte im Anschluss daran eine genaue Bestimmung des relativen Ansprechvermögens für das Alanindosimeter.

Bisher wurde allgemein die Ansicht vertreten, dass das Ansprechvermögen von Alanin im betrachteten Energiebereich unabhängig von der Beschleunigungsspannung ist. Die neuen Ergebnisse zeigen jedoch, dass sich das relative Ansprechvermögen von 0,996 (für 4 MV und 6 MV) mit zunehmender Beschleunigungsspannung verringert und bei 25 MV einen Wert von 0,989 annimmt.

Scheinbare Widersprüche der neuen Ergebnisse zu Daten, die sowohl von der PTB als auch vom kanadischen NRC veröffentlicht worden waren, konnten inzwischen durch Überprüfung der alten Messdaten und durch eine neue Vergleichsmessung zwischen PTB und NRC aufgeklärt werden. Monte-Carlo-Simulationen, die in Kooperation mit dem Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz der Technischen Hochschule Mittelhessen in Gießen durchgeführt wurden, geben die beobachtete Energieabhängigkeit ebenfalls wieder. Aus den Simulationen konnte zudem der Anteil der Dosis extrahiert werden, der durch Sekundär-Elektronen verursacht wird, die von innerhalb des Detektorvolumens absorbierten Photonen erzeugt werden. Dieser Anteil nimmt von ca. 80 % für  $^{60}\text{Co}$ -Strahlung auf ca. 20 % bei 25 MV ab. Alanin vollzieht damit im betrachteten Energiebereich einen Übergang vom Photonen- zum Elektronendetektor.

Titelbild:

Röntgenaufnahme eines Ge-Spektrometers im Windkanalströmungsfeld

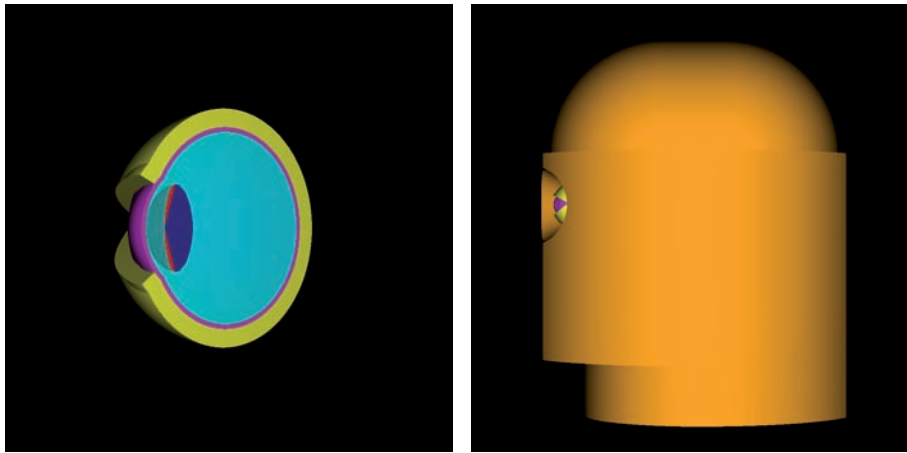


Bild 1: Stilisiertes Modell des Auges (mit Details im Inneren der Linse), welches für die präzisen Dosis-Berechnungen diente; unterschiedliche Farben stehen für unterschiedliche Materialien. Der rechte Bildteil zeigt das gesamte Kopfmodell mit dem eingesetzten Auge.

Die Energieabhängigkeit des Alanindosimeters für die klinisch relevanten ultraharten Röntgenstrahlen und für hochenergetische Elektronen scheint damit, zumindest für Referenzfelder der Größe  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ , gut verstanden zu sein. Aufzuklären bleiben Einflüsse von Feldgröße und Umgebungsmaterial, die bei einer Anwendung des Alanindosimeters für die Qualitätssicherung der modernen Strahlentherapie von großer Bedeutung sind.

### Strahlung am Auge: Welches Dosimeter?

Das menschliche Auge reagiert noch empfindlicher auf ionisierende Strahlung, als bisher vermutet. Weil sich Hinweise darauf verstärkt haben, dass der jetzt gültige Grenzwert nicht ausreicht, um einer Linsen-trübung – dem Grauen Star – vorzubeugen, hat die Internationale Strahlenschutzkommission empfohlen, den Grenzwert der Strahlendosis für Augenlinsen drastisch zu senken: von 150 Millisievert (mSv) auf 20 mSv pro Jahr. Beim bisherigen Grenzwert ging man davon aus, dass es ausreicht, bei beruflich exponierten Personen routinemäßig die Grenzwerte für die Gesamtperson (mit Ganzkörperdosimetern) sowie der Haut (mit Hautdosimetern) zu überwachen. Sollte der Grenzwert für die Augenlinse auch in Deutschland gesenkt werden, könnte dies bedeuten, dass geeignete Dosimeter in unmittelbarer Nähe des Auges hinter einem entsprechenden Augenschutz getragen werden müssen. Mitarbeiter, die ihre maximale Jahresdosis erreicht haben, dürften für den Rest des Jahres nicht mehr in diesem Arbeitsbereich eingesetzt werden. Die PTB hat mithilfe von detaillierten Monte-Carlo-Transportrechnungen die Dosis speziell an der Augenlinse ermittelt, siehe Bild 1, und dann die unterschiedlichen Dosimeterarten auf ihre Eignung für diesen konkreten Einsatz untersucht. Geeignet sind demnach Hautdosimeter, jedoch nur bei reiner Röntgenstrahlung (z. B. in der Radiologie). Sie müssen direkt in Augennähe eingesetzt werden, und ihre Rückseite muss durchlässig

für Röntgenstrahlung sein. Für Beta-Strahlung, die häufig in der Nuklearmedizin eingesetzt wird, können Hautdosimeter die tatsächliche Dosis um das Hundertfache und mehr überschätzen. Sie sind daher ungeeignet. Grundsätzlich geeignet sind Augendosimeter, die die Dosis in dem besonders strahlungsempfindlichen Teil der Augenlinse abschätzen. Da die entsprechende Messgröße bisher nicht verwendet wurde, gibt es jedoch bisher nur sehr wenige Dosimeter-Typen. Deren Eignung für Betastrahlung muss noch geprüft werden. Ganzkörperdosimeter sind in keinem Fall geeignet, denn sie unterschätzen die Strahlendosis der Augenlinsen, insbesondere bei niederenergetischer Röntgenstrahlung und bei Betastrahlung.

### Überschallmolekularstrahlen aus temperaturstabilen Flüssigkeiten

Die Untersuchung von molekularen Fragmentierungsprozessen nach einem Beschuss mit Elektronen liefert Informationen über die an der Aufspaltung beteiligten Reaktionskanäle. Neben der Spurstruktur von primären Teilchen und Sekundärelektronen sind solche Informationen wichtig für das Verständnis von strahleninduzierten Schäden in der DNS.

Während sehr viele Experimente zur Bestimmung der Massenverteilung von Fragmenten durchgeführt worden sind, wurden nur wenige Datensätze für die absoluten Wirkungsquerschnitte für die beim Elektronen- bzw. Ionenstoß entstehende Fragmentierung von Biomolekülen veröffentlicht. Deshalb wurde eine Apparatur mit dem Ziel aufgebaut, diese Datensätze für die DNS-Bausteine möglichst genau zu bestimmen.

Die Apparatur besteht aus einer Vorrichtung zur Erzeugung eines Überschallmolekularstrahls, einer Wechselwirkungskammer, in der der Molekular-

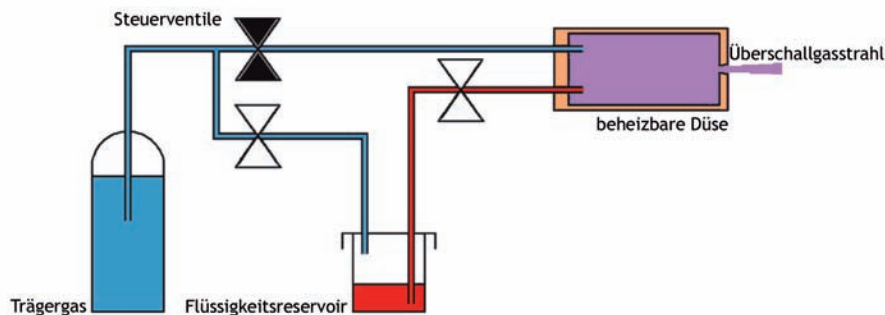


Bild 2: Schematischer Aufbau der Präparationseinrichtung

strahl von Elektronen bzw. Ionen gekreuzt wird, und einem Flugzeitmassenspektrometer, mit welchem die bei einem Stoß produzierten einzelnen Bruchstücke detektiert werden. An dieser Apparatur lässt sich ein Molekularstrahl nicht nur aus gasförmigen Substanzen, sondern auch aus flüssigen und festen Substanzen erzeugen. Diese Eigenschaft ist wichtig, da Biomoleküle bei Zimmertemperatur überwiegend in der flüssigen oder festen Phase vorliegen.

Die Vorrichtung zur Erzeugung des Überschallmolekularstrahls (Bild 2) besteht aus einer beheizbaren Düsenaufnahme aus Kupfer, einer Düse mit einem Durchmesser von 30 µm sowie zwei Rohrleitungen für die Zufuhr der zu untersuchenden Substanz und eines Trärgases. Mit dieser Vorrichtung kann eine Maximaltemperatur von 250 °C und ein Maximaldruck von 8 bar erreicht werden.

Durch diese Technik ist es möglich, chemisch temperaturstabile Flüssigkeiten mit einer Siedetemperatur unter 200 °C als Überschallgasstrahl zu präparieren. Die ersten Testmessungen wurden mit Methanol durchgeführt, wobei die Ionisierung durch Elektronen erfolgte, deren Energie im Bereich zwischen 50 eV und 100 eV eingestellt wurde. Die Energiebreite des Elektronenstrahls lag dabei zwischen 1 eV und 3 eV.

Bei einem Druck von 3 bar steigt die Siedetemperatur von Methanol von 65 °C bei Normaldruck auf ca. 120 °C an. Bei Verwendung einer Düsensentemperatur von 140 °C war somit eine stabile Präparation von Methanol möglich. Bild 3 zeigt ein erstes Massenspektrum der Fragmente von Methanol nach einem Beschuss mit 100 eV-Elektronen.

## Eine Referenzkammer für kleine Radonkonzentrationen

Die Bewertung und Verbesserung der radiologischen Situation in Wohnhäusern, die mit dem natürlichen radioaktiven Edelgas Radon belastet sind, gewinnt zunehmend an Bedeutung. Das ist nicht zuletzt ables-

bar an der intensiven Diskussion um die verbindliche Einführung europäischer Grenzwerte für die Radonkonzentration in Häusern. Die messtechnische Grundlage für die zuverlässige Bestimmung von Radonkonzentrationen in der Luft wurde mit dem Aufbau einer neuen Low-Level-Radon-Referenzkammer in der PTB gelegt. In dieser Kammer können Messgeräte, mit denen Rn-222-Aktivitätskonzentrationen in Luft bestimmt werden sollen, auch in dem in Häusern überwiegend auftretenden Bereich unterhalb von 1000 Bq/m<sup>3</sup> erstmals rückführbar kalibriert werden. Im Rahmen einer Doktorarbeit wurden Radon-Emanationsquellen entwickelt und charakterisiert. Mit den vorhandenen Quellen unterschiedlicher Aktivitäten können stabile Referenzatmosphären von 150 Bq/m<sup>3</sup> bis 1900 Bq/m<sup>3</sup> erzeugt werden, sodass nun auch an kommerziellen Messgeräten Langzeitkalibrierungen durchgeführt werden können.

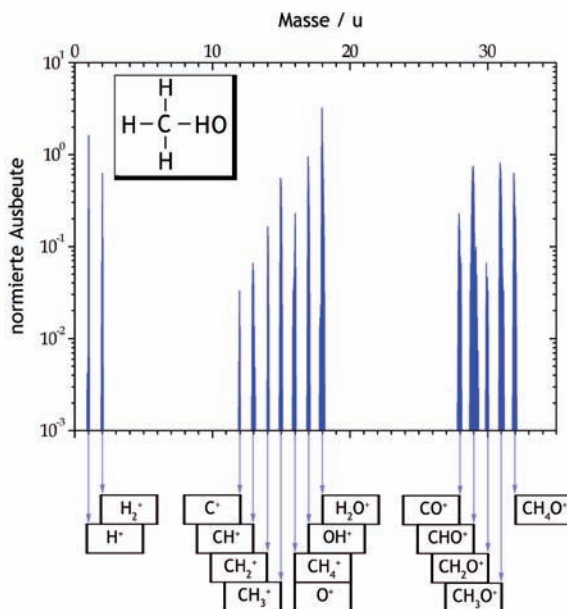


Bild 3: Gemessenes Fragmentationsspektrum von Methanol nach Bereinigung von Mehrfachionisationen und von Fragmenten von Rest- und Trärgasmolekülen. Das Zählratensignal ist auf den Gesamtflächeninhalt des Spektrums normiert.

## Ein Verfahren zur Kalibrierung von photonenstrahlenden Großflächenquellen

Großflächenquellen werden üblicherweise benutzt, um Kontaminationsmessgeräte auf deren Funktion zu überprüfen und zu kalibrieren. Die für solche Quellen relevanten Anforderungen an die Messgrößen Aktivität, Oberflächenemissionsrate und Gleichförmigkeit sind international genormt (ISO 8769:2010). Die Rückführbarkeit auf nationale Normale wird mit sogenannten Klasse-1-Strahlern gewährleistet, die von einem nationalen Metrologieinstitut umfassend charakterisiert worden sein müssen. An Quellen alpha- und beta-strahlender Radionuklide führt die PTB seit vielen Jahren zahlreiche Kalibrierungen durch. Nach der letzten Überarbeitung der internationalen Norm mit deutlich verschärften Kriterien bezüglich der Quelleneigenschaften war allerdings kein Institut mehr in der Lage, Photonenstrahler nach Klasse 1 zu zertifizieren.

Großflächenquellen müssen für den Alltagseinsatz mechanisch robust und abriebfest sein, um durch die Quellen selbst verursachte Kontaminationen zu verhindern. Dies setzt voraus, dass die Oberfläche solcher Quellen versiegelt wird, was andererseits die Oberflächenemissionsrate reduziert. Bei Photonenstrahlern sind außerdem Filter integraler Bestandteil der Quelle, mit denen unerwünschte Alpha-, Beta- oder Röntgenstrahlung abgeschwächt werden. Dies führt aber auch dazu, dass das Photonenpektrum modifiziert und die Oberflächenemissionsrate abhängig von der Photonenenergie teilweise deutlich verändert wird. Zusätzlich entsteht eine Winkelabhängigkeit der emittierten Strahlung, was die Interpretation von Messungen erschwert.

Aus einer digitalen Autoradiografie kann die Gleichförmigkeit der Quelle bestimmt werden. Hierzu ist allerdings eine aufwendige Entfaltung der Bilder nötig, die die durch die große Reichweite der Photonen bedingte Unschärfe der Radiografie eliminiert (siehe Bild 4). Die Aktivität wird auf Primärnormale der PTB zurückgeführt, indem ein großvolumiger NaI-Detektor über eine Fläche von 100 cm<sup>2</sup> nuklidspezifisch kalibriert wird. Das hierzu notwendige Scannen der Fläche in einem Raster mit mindestens 400 Positionen ist durch einen computergesteuerten Kreuztisch automatisiert.

Sekundärprozesse wie Streuung und Absorption sowohl in der Quelle selbst als auch an Material in unmittelbarer Umgebung erschweren eine direkte Messung der Oberflächenemissionsrate von Pho-

tonen. Schon alleine die Halterung für Quelle und Detektor sowie die notwendige Bleiabschirmung verändern die Photonenemission im relevanten Raumwinkel. Durch umfangreiche Simulationsrechnungen konnten diese Effekte qualitativ verstanden und Korrekturfaktoren bestimmt werden, mit denen aus bekannter Aktivitätsverteilung die Oberflächenemissionsrate für Photonen berechnet werden kann (Bild 4).

## Neutronen-Benchmarkexperiment am Stellarator Wendelstein 7-X

Der Stellarator Wendelstein 7-X (W7-X), der gegenwärtig im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald entsteht, soll die Eignung von Fusionsanlagen des Stellarator-Typs zur Energieerzeugung demonstrieren. Die PTB entwickelt dafür ein Monitorsystem zur Messung der gesamten Neutronenstrahlung, die beim Betrieb der Maschine entsteht.

Vor der Inbetriebnahme des W7-X muss entsprechend der Betriebsgenehmigung eine Vor-Ort-Kalibrierung der Neutronenmonitore durchgeführt werden. Diese soll mit einer Radionuklidneutronenquelle erfolgen, die mithilfe eines im Inneren des Plasmagefäßes installierten Schienensystems auf einem Pfad bewegt wird, der dem Verlauf des mittleren Plasmaschwerpunkts entspricht. Ein wesentlicher Bestandteil der Kalibrier-Prozedur sind Monte-Carlo-Simulationen der kompletten Anlage. Zur Überprüfung des Rechenmodells wurde ein Benchmarkexperiment mit einer Radionuklidneutronenquelle bekannter Quellstärke und einem PTB-eigenen, gut charakterisierten Neutronenmonitor vom Typ „Precision Long Counter“ (PLC) am W7-X durchgeführt. In einem ersten Schritt werden die Anzeigen der Neutronenmonitore berechnet, die sich aus der Simulation des Transports der Neutronen von dieser „Linienquelle“ ergeben. Passen Messwerte und Simulation gut zusammen, kann man davon ausgehen, dass das Modell des W7-X die Realität mit ausreichender Genauigkeit wiedergibt. In einem zweiten Schritt kann dann ein ausgedehntes Fusionsplasma simuliert und der Unterschied zwischen ausgedehnter Quelle und Linienquelle berechnet werden. Die Überprüfung von Rechenmodellen durch ein Benchmarkexperiment ist daher ein wichtiger Meilenstein für die spätere Kalibrierung der Neutronenmonitore.

Da der W7-X eine überaus komplexe Maschine ist, können nicht alle Einzelheiten in einem Monte-Carlo-Modell dargestellt werden. Es müssen vielmehr deutliche Vereinfachungen vorgenommen



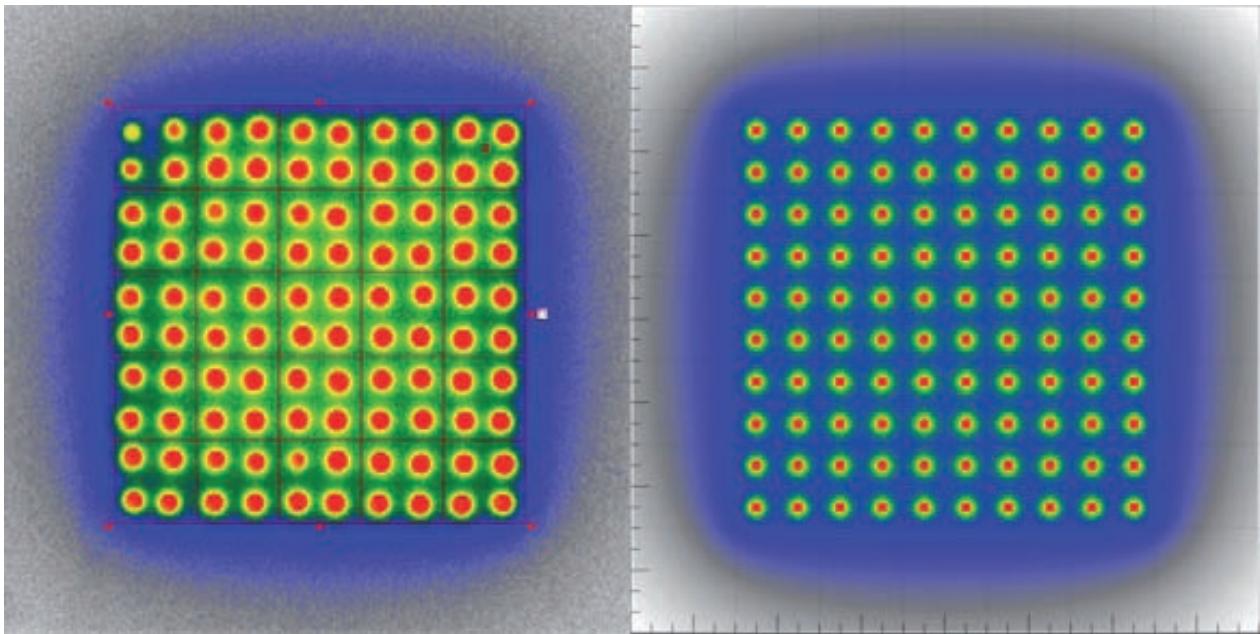


Bild 4: Vergleich der Autoradiografie einer  $^{60}\text{Co}$ -Flächenquelle mit bekannter Aktivitätsverteilung (links) mit der simulierten Oberflächenemissionsrate (rechts). Bei der Simulation wurden Punktquellen angenommen, wohingegen bei der realen Quelle ausgedehnte Tropfen von ca. 5 mm vorliegen. Auch die Variation der Tropfengröße und die Positionierung der Tropfen bei der Quellenpräparation verursacht Unterschiede. Deutlich ist die Unschärfe durch die große Reichweite der Photonenstrahlung zu erkennen. Die relative Intensität entspricht in etwa einer logarithmischen Darstellung.

werden. Zum Zeitpunkt des Experimentes waren vier der insgesamt fünf Module des W7-X auf dem Maschinenfundament aufgestellt. In dieser Konstellation waren zahlreiche Komponenten noch nicht eingebaut; es fehlten z. B. die Diagnosesysteme und das Kühlwasser. Deshalb konnte auch das Rechenmodell entsprechend einfacher sein. Für die Ermittlung der Messwerte wurde schließlich eine  $^{241}\text{AmBe}$ -Radionuklidquelle mit bekannter Neutronenquellstärke innerhalb eines Moduls auf einem Schienensystem verfahren.

Bild 5 zeigt einen Teil des W7-X mit dem um  $32^\circ$  gegen die Senkrechte geneigten „Precision Long Counter“. Auf diese Weise schneidet die Zylinderachse des PLC auf der Höhe der Äquatorialebene des W7-X die Bahn der Neutronenquelle. Die Neutronenquelle wurde auf dem Schienensystem mehrfach hin- und hergefahren und die Zählraten im PLC als Funktion des Fahrweges gemessen.

Die integralen Zählraten aus Experiment und Rechnung stimmen über den gesamten Fahrweg sehr gut überein. Eine experimentelle Überhöhung der gemessenen Zählrate im Bereich des Monitors deutet jedoch darauf hin, dass dessen unmittelbare Umgebung noch nicht ausreichend gut im Monte-Carlo-Modell beschrieben ist. Weiterführende Überlegungen und Tests haben gezeigt, dass die Geometrie

der Diagnoseports noch mit berücksichtigt werden muss.

### Diamantkristalle als Neutronenspektrometer

Detektoren aus künstlich hergestelltem einkristallinem Diamant sind als Neutronenspektrometer mit anders kaum erreichbarer Energieauflösung für den Einsatz in extrem hohen Neutronenflüssen geeignet, wie sie z. B. bei dem im Bau befindlichen Fusionsexperiment ITER erwartet werden. Diese Detektoren arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie Silizium-Halbleiterdetektoren. Durch die auf den Detektor treffenden Neutronen werden durch Kernreaktionen mit den Kohlenstoffatomkernen des Diamantkristalls geladene Teilchen erzeugt, die dann im Halbleiterkristall ihre Energie abgeben und gestoppt werden. Für den Einsatz in Neutronenfeldern hat Diamant den Vorteil, dass es extrem resistent gegenüber strahleninduzierten Schädigungen des Kristalls ist.

Für den Einsatz von Diamantdetektoren als Neutronenspektrometer an Fusionsanlagen müssen die Detektorantwortfunktionen für monoenergetische Neutronen im Energiebereich von etwa 6 MeV bis 16 MeV bekannt sein. Im Rahmen eines durch das European Fusion Development Agreement (EFDA) geförderten Projekts wurde in der PTB ein Messverfahren entwickelt, mit dem die Antwortfunktionen

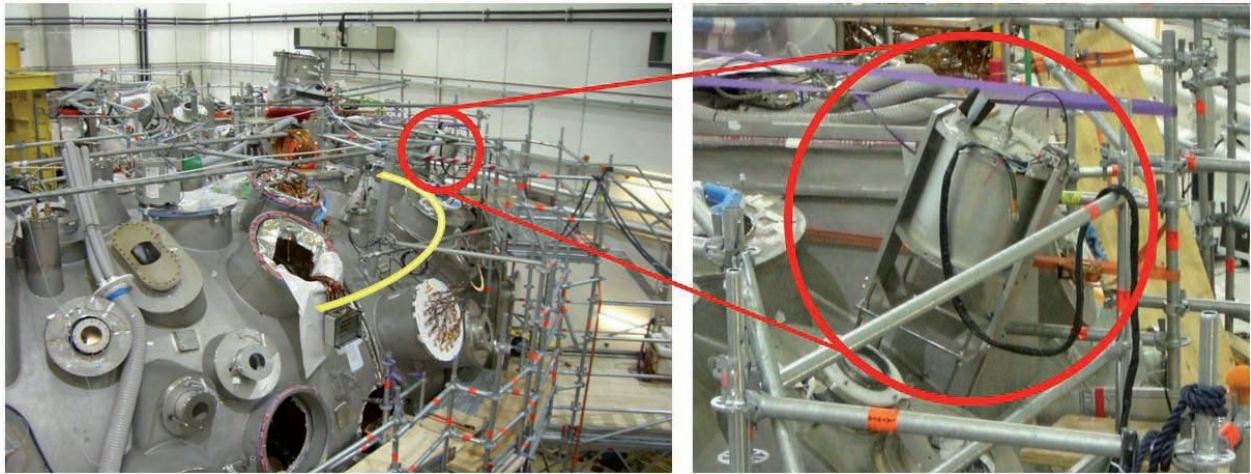


Bild 5: Links: Blick auf das Modul Nr. 5 in der Maschinenhalle des W7-X. Zu sehen sind das äußere Kryostatgefäß mit den Stützen für die verschiedenen Diagnosesysteme und ein Baugerüst. Im rechten oberen Quadranten ist der PTB-Long-Counter zu erkennen, der im rechten Bild vergrößert dargestellt ist. Die Neigung ist so gewählt, dass die Verlängerung der Zylinderachse die Bahn der Neutronenquelle schneidet. Die gekrümmte Bahn der bewegten Neutronenquelle im Inneren des Plasma-gefäßes ist durch die gelbe Kurve angedeutet.

des Detektors in diesem Energiebereich bestimmt werden können.

Das Verfahren beruht darauf, dass ein monoenergetischer Deuteronenstrahl aus dem Zyklotron der PTB auf ein Gastarget trifft und dort hochenergetische Neutronen erzeugt, mit denen dann der Detektor bestrahlt wird. Die Energie des Deuteronenstrahls, und damit die Neutronenenergie, lassen sich quasi kontinuierlich variieren. Signale, die nicht von Neutronen aus dem durch die Reaktionskinematik vorgegebenen monoenergetischen Teil des Neutronenspektrums stammen, können aufgrund der gepulsten Strahlstruktur mit der Flugzeitmethode abgetrennt werden. Abhängig von der eingestrahlten Neutronenenergie werden im Detektor unterschiedliche Kernreaktionen induziert, die zu veränderten Antwortfunktionen des Detektors führen. Ergebnisse dieser Messungen sind in Bild 6 für zwei verschiedene Neutronenenergien dargestellt.

In den Pulshöhenspektren sind deutlich die unterschiedlichen Reaktionskanäle zu erkennen, die mit ansteigender Neutronenenergie möglich sind. Da auf diese Weise der gesamte Energiebereich zwar prinzipiell überdeckt, aber aufgrund der langen Messzeiten nicht lückenlos vermessen werden kann, sind begleitende Rechnungen nach der Monte-Carlo-Methode nötig, um eine vollständige, dann theoretisch begründete Antwortfunktion des Detektors zu erhalten. Dazu müssen vorhandene Rechenprogramme noch entsprechend modifiziert werden. Dann ist es unter Zuhilfenahme von in der PTB etablierten Entfaltungsmethoden möglich, aus gemessenen Pulshöhenspektren die spektrale Neu-

tronenenergieverteilung in einem weiten Neutronenenergiebereich zu bestimmen.

Das neuentwickelte Verfahren erlaubt die quasi kontinuierliche Variation der Neutronenenergie von 6 MeV bis etwa 16 MeV und somit eine vollständige Charakterisierung des Detektors in einem Neutronenenergiebereich, der für die Diagnostik von Neutronen an Fusionsexperimenten relevant ist.

## Mit „Neugierde“ zum Mars

Die Untersuchung von Umweltparametern auf der Marsoberfläche ist Ziel der „Mars Scientific Laboratory“-Mission (MSL), die von der NASA am 26. November 2011 gestartet wurde. MSL ist ein neues Gefährt namens „Curiosity“ (deutsch „Neugierde“), das zehn wissenschaftliche Instrumente an Bord hat, mit denen sowohl die chemische und geologische Zusammensetzung der dortigen Umgebung als auch das Strahlungsfeld untersucht werden kann. Eines dieser Instrumente ist der „Radiation Assessment Detector“ RAD, dessen Sensorsystem von der Universität Kiel (CAU) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR, Köln) entwickelt wurde.

Mit dem RAD soll das Spektrum der Teilchenstrahlung auf der Marsoberfläche charakterisiert werden, inklusive der galaktischen kosmischen Strahlung, der energiereichen solaren Teilchen, der sekundären Neutronen und anderer Teilchen, die sowohl in der Atmosphäre als auch im Marsboden erzeugt werden. Das Instrument besteht aus einem Teilchenteleskop mit drei planaren Silizium-PIN-Dioden zum Nachweis von geladenen Teilchen und einem

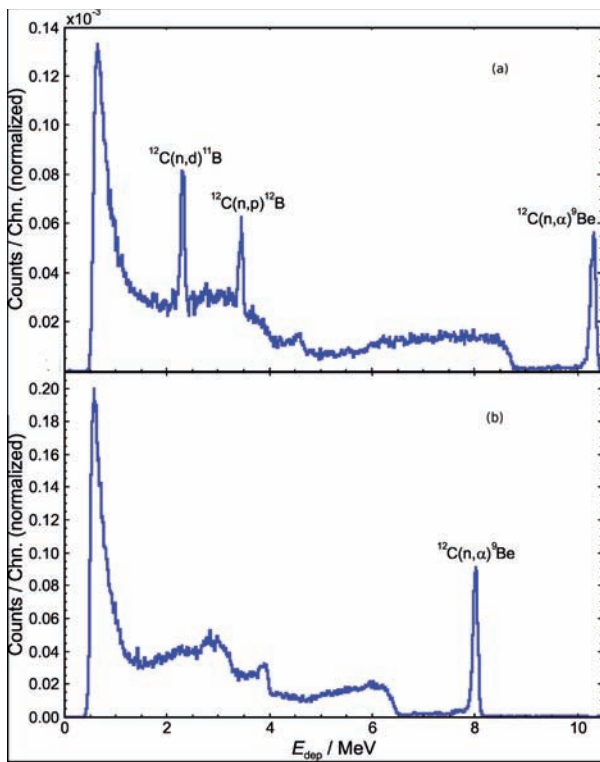


Bild 6: Pulshöhenspektren eines Diamantdetektors bei Bestrahlung mit zwei verschiedenen Neutronenenergien: (a) 16 MeV, (b) 14 MeV

Cäsiumjodid(CsI)-Kalorimeter, das von einem Anti-Koinzidenz-Detektor aus szintillierendem Plastik umgeben ist. Ein zusätzlicher Plastikdetektor wird verwendet, um zusammen mit dem CsI und dem Anti-Koinzidenz-Detektor neutrale Teilchen wie Neutronen oder Photonen nachzuweisen.

CAU, DLR und PTB kooperieren seit vielen Jahren auf dem Gebiet der Dosimetrie kosmischer Strahlung in der Erdatmosphäre. Hier sind Sekundärneutronen die dominierende Komponente der Strahlenexposition in großen Höhen bis hinunter

auf Meereshöhe. Obwohl sich die Marsatmosphäre von der Erdatmosphäre unterscheidet, wird die kosmische Strahlung auf der Marsoberfläche ein ähnliches Neutronenspektrum enthalten wie auf der Erdoberfläche. Deshalb musste das Ansprechvermögen von RAD für Neutronen mit Energien bis zu 200 MeV bestimmt werden, um genaue Informationen über das Strahlungsfeld auf dem Mars zu erhalten.

Das Ansprechvermögen des RAD für monoenergetische und quasi-monoenergetische hoch-energetische Neutronen wurde von Mitarbeitern der PTB an der „PTB Ion Accelerator Facility“ (PIAF) in Braunschweig und am „iThemba Laboratory for Accelerator Based Sciences“ (iTL) in Südafrika eingehend untersucht. Da bei PIAF Neutronenenergien nur bis 19 MeV zur Verfügung stehen, arbeitet die PTB seit vielen Jahren mit dem iTL und der Universität Kapstadt in Südafrika zusammen, um auch gut charakterisierte Neutronenstrahlen mit Energien von 40 MeV bis zu 200 MeV nutzen zu können.

Bild 7: Auf dem Mars-Rover „Curiosity“ befindet sich der „Radiation Assessment Detector“ (RAD). Damit kann das Strahlungsfeld auf der Marsoberfläche untersucht werden. Quelle: NASA / JPL-Caltech / Sw



## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Aktivität und Nuklidaten von Lutetium-177

Es wurden Aktivitätsbestimmungen an mehreren Lösungen des in der Nuklearmedizin eingesetzten Isotops  $^{177}\text{Lu}$  vorgenommen. Einige Messungen erfolgten im Rahmen eines internationalen Vergleichs, bei der die PTB die kleinste Messunsicherheit erzielte. Außerdem konnten Nuklidaten wie Photonen-Emissionswahrscheinlichkeiten und die Halbwertszeit bestimmt werden. (K. Kossert, FB 6.1, [karsten.kossert@ptb.de](mailto:karsten.kossert@ptb.de))

#### ICRU Committee on Radon Measurements and Reporting of Radon Exposures tagt in der PTB

Die neunköpfige internationale Arbeitsgruppe zur Erarbeitung eines ICRU-Reports rund um das Themenfeld Radonmessungen traf sich im April 2012 in der PTB. Dieser Report soll weltweit einheitliche Qualitätsstandards für Radonmessungen (Rn-222 und Rn-220 und deren zugehörige Folgeprodukte) und den Umgang von Expositionsbestimmungen bis hin zu einer einheitlichen Dosimetrie liefern. Die Veröffentlichung des Reports wird in 2013/2014 erwartet. (A. Röttger, FB 6.1, [annette.roettger@ptb.de](mailto:annette.roettger@ptb.de))

#### Langzeitstabilitätstests von Thoron-Emanationsquellen

Der Thoron-Emanationsmessplatz (TEM) der PTB bietet weltweit die einzige Möglichkeit, Rn-220-Messgeräte mit einem Primärnormal zu kalibrieren. Die zugehörigen Emanationsquellen wurden erstmals auf ihre Langzeitstabilität untersucht. Dabei zeigten sich signifikante Trends, deren Ursachen sich bisher nicht eindeutig zuordnen lassen. (A. Röttger, FB 6.1, [annette.roettger@ptb.de](mailto:annette.roettger@ptb.de), A. Honig, FB 6.1, [anja.honig@ptb.de](mailto:anja.honig@ptb.de))

#### Aufbau einer Low-Level-Radon-Referenzkammer

Um Messgeräte zur Bestimmung der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Luft im Bereich unterhalb von  $1000 \text{ Bq/m}^3$  rückführbar zu kalibrieren, wurde eine Low-Level-Radon-Referenzkammer aufgebaut. Diese beinhaltet ein rückgeführtes Volumen zur Erzeugung der Referenzatmosphäre, eine Einrichtung zur Erzeugung und Überführung definierter Aktivität und ein hochsensitives Transfornormal zur Bewahrung und Weitergabe der Einheit. (D. Linzmaier, FB 6.1, [diana.linzmaier@ptb.de](mailto:diana.linzmaier@ptb.de))

#### Schlüsselvergleich der Primärnormale für die Einheit der Wasser-Energiedosis in hochenergetischen Photonenfeldern zwischen der PTB und dem BIPM

Zur Gewährleistung der weltweiten Einheitlichkeit der Dosimetrie und der internationalen Anerkennung von PTB-Kalibrierungen nahm die PTB an dem vom BIPM organisierten Schlüsselvergleich BIPM.RI(I)-K6 teil, bei dem die Primärnormale der PTB und des BIPM zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis in hochenergetischen Photonenfeldern an Beschleunigern verglichen wurden. Die Messungen, für die das Primärnormal des BIPM nach Braunschweig gebracht wurde, fanden an den klinischen Linearbeschleunigern der PTB statt. Im Ergebnis des Vergleichs zeigte sich, dass die Primärnormale der PTB und des BIPM zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis in hochenergetischen Photonenfeldern äquivalente Ergebnisse liefern. (R.-P. Kapsch, FB 6.2, [ralf-peter.kapsch@ptb.de](mailto:ralf-peter.kapsch@ptb.de))

#### Bestimmung der Elektronenenergie am Forschungsbeschleuniger für die Dosimetrie in der Strahlentherapie

Am Forschungsbeschleuniger für die Dosimetrie in der Strahlentherapie wird im Rahmen einer Doktorarbeit ein Experiment zur absoluten Verifikation von Monte-Carlo-Strahlungstransportrechnungen durchgeführt. Dafür ist es notwendig, die Elektronenenergie möglichst genau zu bestimmen. Es wurde ein System zur Bestimmung der Elektronenenergie aufgebaut, welches auf dem Prinzip der Magnetspektrometrie beruht. Ein wichtiger Beitrag für die Energiebestimmung wurde von Andreas Schwab (TU Ilmenau) geleistet, der im Rahmen seiner Masterarbeit eine Methode zur Berechnung von Elektronen-Trajektorien im Magnetfeld des Spektrometers entwickelte. Kernstück ist dabei ein Algorithmus, der auf einer neuentwickelten Tensorinterpolationsmethode beruht. Der Algorithmus wurde in einer Software umgesetzt, die an die spezifischen Bedingungen des aktuellen Experimentes angepasst ist und daher genauere Ergebnisse liefert als frei verfügbare Implementierungen. (F. Renner, FB 6.2, [franziska.renner@ptb.de](mailto:franziska.renner@ptb.de))

#### Blindtest des Alanin-Dosimetriesystems

Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit des Dosimetriesystems auf der Basis von Alanin/ESR wurde mit Unterstützung des BIPM ein Blindtest durchge-

führt. Bei einer Standard-Unsicherheit von ca. 0,4 % sind die ermittelten Dosen nur 0,12 % größer, als nach einem Schlüsselvergleich der Primärnormale erwartet wurde. (M. Anton, FB 6.2, mathias.anton@ptb.de)

### **Erster EURAMET-Vergleich für die Strahlungsmessgröße Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ für Photonenstrahlung abgeschlossen**

Erstmalig wurde ein internationaler EURAMET-Messvergleich (No. 738) für Photonenstrahlung im Bereich Strahlungsdosimetrie durchgeführt. Neben der PTB als Pilotlabor nahmen noch 16 weitere Staatsinstitute teil. (O. Hupe, FB. 6.3, oliver.hupe@ptb.de)

### **Mit „Neugierde“ zum Mars**

Die Untersuchung von Umweltparametern auf der Marsoberfläche ist Ziel der „Mars Scientific Laboratory“-Mission (MSL), die von der NASA am 26. November 2011 von Cape Canaveral (Florida, USA) aus gestartet wurde. MSL ist ein neues Gefährt namens „Curiosity“ (deutsch „Neugierde“), das zehn wissenschaftliche Instrumente an Bord hat, mit denen die chemische und geologische Zusammensetzung der dortigen Umgebung und auch das Strahlungsfeld untersucht werden kann. Eines dieser Instrumente ist der „Radiation Assessment Detector“ RAD, dessen Sensorsystem von der Universität Kiel (CAU) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR, Köln) entwickelt wurde. Die Projektleitung lag beim South West Research Institute (SwRI, San Antonio, Texas, und Boulder, Colorado), das auch die Elektronik für das Instrument lieferte. (R. Nolte, FB 6.4, ralf.nolte@ptb.de; R. Smit, iTL, smit@tlabs.ac.za; A. Buffler, Department of Physics, UCT, andy.buffler@uct.ac.za)

### **Die Lichtausbeutefunktion eines Flüssigszintillators für die Neutrinodetektion im Untergrundexperiment SNO+**

Mit dem SNO+-Detektor sollen verschiedene Aspekte der Neutrinophysik untersucht werden. Der Detektor besteht aus einem Szintillatortank mit einem Durchmesser von 12 m, in dem die neutrino-induzierten Ereignisse von etwa 10 000 Photomultipliern detektiert werden. Als Flüssigszintillator wird lineares Alkylbenzol (LAB) als Lösungsmittel und 2,5-Diphenyloxazol (PPO) als primärer Szintillator verwendet. In einer Zusammenarbeit der Technischen Universität Dresden (TUD) und des Brookhaven National Laboratory (BNL) mit der PTB wurden am Flugzeitspektrometer der PTB die Protonenlichtausbeute aus dem von monoenergetischen Neutronen erzeugten Impulshöhen-

spektrum bestimmt und für verschiedene Kombinationen aus Lösungsmittel, primärem Szintillator und weiteren Komponenten untersucht. (R. Nolte, FB 6.4, ralf.nolte@ptb.de)

### **Benchmarkexperiment am Stellerator Wendelstein 7-X (W7-X)**

Die PTB entwickelt im Rahmen eines Kooperationsvertrages ein Monitorsystem für Neutronenstrahlung am Fusionsexperiment Wendelstein 7-X am IPP Greifswald. Mit einer Radionuklid-Neutronenquelle bekannter Quellstärke und einem gut charakterisierten Messgerät der PTB wurden Messungen am W7-X durchgeführt. Diese dienen der Vorbereitung der späteren Vor-Ort-Kalibrierung der Neutronenmonitore und als Benchmarkexperiment für Teilchentransport-Rechnungen, die bei der Auslegung von Messgeräten am W7-X eine wichtige Rolle spielen. (B. Wiegel, FB 6.5, burkhard.wiegel@ptb.de)

### **Verfahren für die Charakterisierung von Diamantdetektoren als Neutronenspektrometer entwickelt**

Detektoren aus künstlich hergestellten einkristallinen Diamanten sind als hochauflösende Neutronenspektrometer für den Einsatz in extremen Neutronenflüssen, wie sie z. B. in Fusionsanlagen entstehen, geeignet. In einer Messkampagne an der Ionenbeschleunigeranlage der PTB wurde ein Verfahren getestet, mit dem die Antwortfunktionen des Detektors im gesamten für die Fusionsdiagnostik relevanten Energiebereich von 6 MeV bis ca. 16 MeV bestimmt werden können. (A. Zimbal, FB 6.5, andreas.zimbal@ptb.de)

### **Imagingsystem für Frachtinspektionssysteme**

Das vom BMBF unterstützte Verbundforschungsprojekt „ACCIS“ erforscht ein Durchleuchtungssystem für mittelgroße Frachteinheiten, das auf Neutronen- und Gammastrahlung basiert. Mit der Fertigstellung der beiden Neutronen- und Gamma-Imagingsysteme wurde ein wesentliches Zwischenziel erreicht. (V. Dangendorf, FB 6.5, volker.dangendorf@ptb.de)

### **Totale Elektronenstreuquerschnitte von Pyrimidin experimentell bestimmt**

Der totale Elektronenstreuquerschnitt von Pyrimidin ( $C_4H_4N_2$ ), des Grundbausteins für die Nucleobasen Cytosin und Thymin in der DNS, wurde für Elektronenenergien zwischen 5 eV und 1 keV experimentell bestimmt. (W Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

**Elektronenstreuquerschnitte von Pyrimidin mit dem komplexen optischen Potenzialmodell berechnet**

Die totalen Elektronenstreuquerschnitte von Pyrimidin wurden mit Hilfe des komplexen optischen Potenzialmodells für Elektronenenergien zwischen 5 eV und 1 keV berechnet. (W. Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

**Elektronenwirkungsquerschnitte für Ionisierung von Pyrimidin experimentell bestimmt**

Die Wirkungsquerschnitte für die Ionisierung von Pyrimidin durch Elektronen wurden für primäre Elektronenenergien zwischen 20 eV und 1 keV doppelt differenziell als Funktion der Sekundärelektronenenergie und des Emissionswinkels experimentell bestimmt. (W. Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

**Überschallmolekularstrahl für Biomoleküle entwickelt**

Für eine Apparatur zur Bestimmung der absoluten Wirkungsquerschnitte für die Fragmentierung von DNS-Bausteinen nach Elektronen- bzw. Ionenstoß wurde eine Vorrichtung zur Erzeugung von Überschallmolekularstrahlen aus temperaturstabilen Flüssigkeiten entwickelt. (A. Arndt, FB 6.6, alexander.arndt@ptb.de)

**Spurstruktursimulation von Elektronen in Pyrimidin**

Gemessene Elektronenstreuquerschnitte des DNS-Bausteins Pyrimidin wurden in den Monte-Carlo-Code P<sub>Tra</sub> implementiert. Spurstruktursimulationen zeigen eine deutliche Zunahme der Anzahl an Ionisationen von Pyrimidin im Vergleich zu Wasser, welches konventionell als Surrogat der DNS verwendet wird. (M. Bug, FB 6.6, marion.bug@ptb.de)

**Metrologie für die Wirtschaft**

**Erweiterungen für das Beta-Sekundärnormal BSS 2**

Die Bestrahlungseinrichtung zur Bestrahlung mit Betastrahlung „Beta-Sekundärnormal BSS 2“ wurde um diverse Möglichkeiten erweitert, um neuen Herausforderungen im Strahlenschutz zu entsprechen. (R. Behrens, FB 6.3, rolf.behrens@ptb.de)

**Messung der Auswirkungen von ionisierender Strahlung auf 90-nm-CMOS-Schaltungen**

Das Ziel des Projekts FATAL (A Modeling Framework for Fault-Tolerant Asynchronous Logic) ist ein Simulationsmodell für asynchrone Logik, welches Auswirkungen von Strahlungseffekten auf

die Schaltung berücksichtigt. Damit soll es in Zukunft möglich sein, asynchrone Logik zu entwickeln, die resistent gegenüber Strahlungseffekten ist. (U. Giesen, FB 6.4, ulrich.giesen@ptb.de)

**Metrologie für die Gesellschaft**

**7. LSC-Anwendertreffen in der PTB**

Beim 7. LSC-Anwendertreffen haben sich 48 Teilnehmer aus Deutschland, Österreich, Frankreich und der Schweiz über Neuentwicklungen im Bereich der Flüssigszintillationszählung für Aktivitätsmessungen informiert und ausgetauscht. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

**Neubestimmung der Halbwertszeit von <sup>41</sup>Ca – Ein Beitrag zur Erforschung des Sonnensystems**

Mit aufwendigen radiochemischen Arbeiten ist es gelungen, <sup>41</sup>Ca aus kerntechnischem Material zu extrahieren. Die Anzahl der <sup>41</sup>Ca-Atomkerne des gewonnenen Materials wurde mittels thermischer Ionisationsmassenspektrometrie (TIMS) bestimmt. In der PTB wurde die Aktivität des Radionuklids erstmals mit der TDCR-Methode gemessen. Durch Kombination der Ergebnisse gelang die bisher genaueste Bestimmung der Halbwertszeit des langlebigen Isotops <sup>41</sup>Ca. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

**Ergebnisse eines umfangreichen Tests des ersten kommerziellen TDCR-Geräts vorgestellt**

Das erste kommerzielle TDCR-Gerät der Firma Hix Oy wurde auf seine Tauglichkeit für Aktivitätsbestimmungen in der Radionuklidmetrologie getestet. Die Ergebnisse der Untersuchung wurden nun veröffentlicht. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

**Ein Verfahren zur Kalibrierung von photonenstrahlenden Großflächenquellen**

Großflächenquellen mit bekannter Oberflächenemissionsrate, Aktivität und guter Gleichförmigkeit werden zur Kalibrierung von Kontaminationsmonitoren im praktischen Strahlenschutz benötigt. In der PTB wurde nun ein Verfahren entwickelt, um auch photonenstrahlende Großflächenquellen zu kalibrieren und umfassend zu charakterisieren. Sie ist damit das einzige Metrologieinstitut weltweit, das diese Strahler nach Klasse 1 definiert in ISO 8769:2010 kalibrieren kann. (O. Nähle, FB 6.1, ole.j.naehle@ptb.de)

### **Erfolgreiche Vergleichsmessung der Aktivitätskonzentration von Radon-Folgeprodukten zwischen dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und der PTB**

Im Rahmen einer Vergleichsmessung zwischen dem DAkks-akkreditierten BfS-Labor und der PTB wurden mittels eines TransfERNORMALS zwei Radon-222-Folgeprodukt-Atmosphären verglichen. Der Vergleich fand in der neuen Radonnormal-Kammer der PTB statt und lieferte im Rahmen der von der Akkreditierung geforderten Genauigkeit eine gute Übereinstimmung. (A. Honig, FB6.1, anja.honig@ptb.de)

### **TransfERNORMAL geht in Betrieb**

Die als TransfERNORMAL entwickelte Vieldraht-Impuls-Ionisationskammer wurde in der großen Radonnormal-Kammer mit einem Primärnormal kalibriert und steht nun dem Kalibrierbetrieb der PTB zur Verfügung. Bei der Sekundärkalibrierung eines kommerziellen Messgeräts mit der Vieldraht-Impuls-Ionisationskammer bei einer Radon-Aktivitätskonzentration von  $200 \text{ Bq/m}^3$  wurde ein Kalibrierfaktor von  $k_t = 1,048 \pm 0,018$  erreicht. Dies entspricht einer relativen Unsicherheit von 3,5 % für  $k = 2$ . (D. Linzmaier, FB 6.1, diana.linzmaier@ptb.de)

### **Neues europäisches Forschungsprojekt für die Dosimetrie in der Strahlentherapie**

Im Rahmen des European Metrology Research Programme (EMRP) ([www.emrponline.eu](http://www.emrponline.eu)) ist das neue Projekt für die Dosimetrie in der Strahlentherapie „Metrology for radiotherapy using complex fields“ mit einer Laufzeit von 3 Jahren am 1. Juni 2012 gestartet. An dem Vorhaben sind 9 nationale Metrologie-Institute, eine Universität und 15 Kooperationspartner aus Industrie, Kliniken und Forschungseinrichtungen beteiligt. Ziel des Projektes ist der Aufbau von Primärnormalen und die Realisierung von für die Routine geeigneten, rückführbaren Messmethoden für die Dosimetrie bei modernen Methoden der Strahlentherapie für die Tumorbehandlung. (U. Ankerhold, FB 6.2, ulrike.ankerhold@ptb.de)

### **Strahlung am Auge: Welches Dosimeter?**

Die Internationale Strahlenschutzkommission hat empfohlen, den Grenzwert der jährlichen Strahlendosis für Augenlinsen drastisch zu senken. Detaillierte Berechnungen aus der PTB zeigen, dass es insbesondere bei Betastrahlung Handlungsbedarf hinsichtlich der Auswahl geeigneter Dosimeter gibt. (R. Behrens, FB 6.3, rolf.behrens@ptb.de)

### **Untertagelaboratorium UDO an einem neuen Standort**

Das seit fast 20 Jahren von der PTB in der Schachtanlage Asse II betriebene Untertagelaboratorium für Dosimetrie und Spektrometrie (UDO) musste geschlossen werden. Ein neues Untertagelaboratorium (UDO II) konnte auf der 430-m-Sohle im Salzbergwerk Braunschweig-Lüneburg der European salt company (esco) in Grasleben (Nähe Helmstedt) aufgebaut und in Betrieb genommen werden. (S. Neumaier, FB 6.3, stefan.neumaier@ptb.de)

### **Bestrahlungseinrichtung mit thermischen Neutronen betriebsbereit**

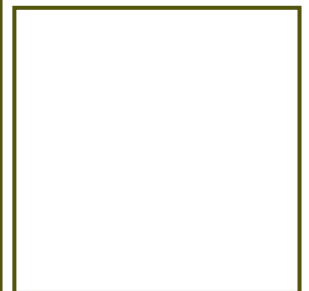
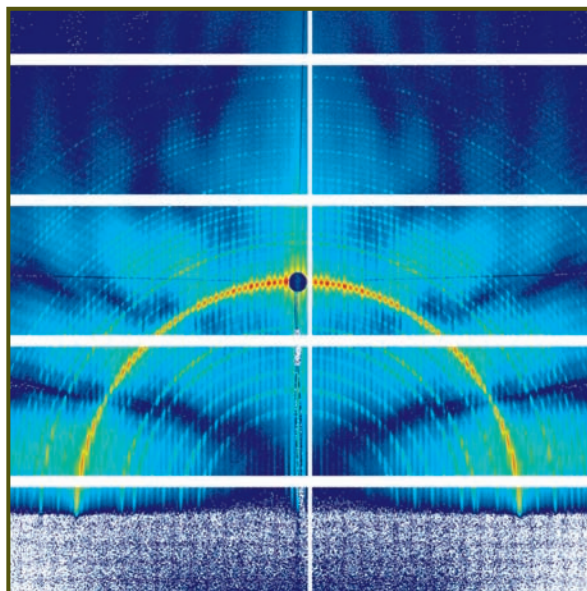
In der PTB wurde eine neue Anlage zur Kalibrierung von Strahlungsmessgeräten mit thermischen Neutronen aufgebaut. Dazu wurden 16 Radionuklidquellen mit  $^{241}\text{AmBe}$  in einen Graphitblock eingebracht. Die Gesamtanlage mit zusätzlichen Abschirmungen wurde mittels Rechnungen optimiert und diese über erste Messungen verifiziert. (M. Luszik-Bhadra, FB 6.5, marlies.luszik-bhadra@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

#### **Erste Erfolge im INS-Projekt „Referenzstrahlungsfelder für gepulste Strahlung“**

Das Projekt hat zum Ziel, die internationale Normung im Bereich gepulster Strahlung voranzubringen. Hierzu wurde von der PTB ein Entwurf für die internationale Technische Spezifikation „ISO 18090-1 Radiological protection – Characteristics of reference pulsed radiation – Part 1: Photon radiation“ erarbeitet und international akzeptiert. (O. Hupe, FB 6.3, oliver.hupe@ptb.de)

Abteilung 7  
Temperatur und  
Synchrotronstrahlung





Die Abteilung *Temperatur und Synchrotronstrahlung* hat in den von ihr bearbeiteten Themenbereichen (Thermometrie, Radiometrie, Nanometrologie, Kryosensorik, Messung thermischer Energie, Vakuummetrologie) in ähnlichem Umfang wie in den Vorjahren Dienstleistungen erbracht. Darüber hinaus wurden in steigendem Umfang Drittmittelvorhaben eingeworben und bearbeitet, insbesondere auch im Rahmen des europäischen Metrologie-Forschungsprogramms EMRP. Dies führt zu einer immer stärker werdenden Vernetzung der Abteilung, sowohl PTB-intern als auch innerhalb der europäischen nationalen Metrologieinstitute, und zu einer weiter ansteigenden Anzahl befristet beschäftigter Mitarbeiter. Nachfolgend werden einige ausgewählte Entwicklungen und Ergebnisse vorgestellt.

### Metrologie mit Synchrotronstrahlung

An dem Elektronenspeicherring Metrology Light Source (MLS) sind nun alle im Rahmen der Erstausstattung geplanten Strahlrohre und Messplätze im Betrieb. Bild 1 zeigt den neuen Messplatz für die Kalibrierung von Strahlungsquellen durch Vergleich mit dem primären Strahlernormal MLS. Hauptbestandteil ist ein Spektrometer mit sechs Reflexionsgittern, das den breiten Wellenlängenbereich von 7 nm bis 400 nm abdeckt.

Am neuen EUV-Strahlrohr der MLS konnten im Rahmen von Kooperationen zur EUV-Lithografie (EUVL) erste Charakterisierungsmessungen an Optiken und Photodetektoren durchgeführt werden. Durch Nutzung ihrer Messmöglichkeiten an der MLS und bei BESSY II kann die PTB nun für die EUV-Metrologie insgesamt 6000 Messzeitstunden pro Jahr anbieten und somit den steigenden Bedarf decken. Die Carl Zeiss SMT GmbH und die PTB haben im Sommer 2012 eine Verlängerung ihrer seit 1998 laufenden Zusammenarbeit zur EUVL um weitere 4 Jahre vereinbart.

Am neuen Undulatorstrahlrohr der MLS wurden gemeinsam mit Arbeitsgruppen der TU Berlin und des ISAS-Instituts erste erfolgreiche Experimente zur Elektronenspektroskopie und UV/VUV-Ellipsometrie durchgeführt. Auf radiometrischer

Grundlage sollen hier in den nächsten Jahren verschiedene quantitative Methoden der Oberflächen- und Materialanalytik etabliert werden.

Im Rahmen des DFG-Vorhabens „Grenzschichtspezifikation“ wurde gemeinsam mit der TU Darmstadt eine zerstörungsfreie Methodik zur Bestimmung chemischer Bindungszustände der Bestandteile von Grenzschichten entwickelt. Der gewählte Ansatz verbindet Röntgenfluoreszenzanalyse unter streifendem Einfall mit Röntgenabsorptionsspektroskopie (NEXAFS) unter Nutzung radiometrisch kalibrierter Instrumentierung. Im Spektralbereich weicher Röntgenstrahlung konnten an dem Plangittermonochromatorstrahlrohr der PTB am Elektronenspeicherring BESSY II verschiedene BCN-Ni-Nanoschichtstrukturen erfolgreich mit dieser Methode in Hinblick auf ihre C- und Ni-Bindungen an der Grenzschicht untersucht werden.

In Zusammenarbeit mit der Freien Universität Berlin (AG Prof. E. Rühl) wurde an der MLS ein Streulicht-Nahfeldmikroskop in Betrieb genommen, das auf einem Rasterkraftmikroskop basiert (Bild 2). Dabei wird eine scharfe Metallspitze – eine sogenannte Nahfeldsonde – in einen fokussierten Lichtstrahl gebracht und die Probenoberfläche in kleinen Schritten gescannt. Das von der Sonde gestreute Signal enthält optische Informationen über die Oberfläche. Die laterale Auflösung wird bestimmt durch den Radius der Sonde, der typisch kleiner als 50 nm ist, sodass unabhängig von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichts Ortsauflösungen von weniger als 100 nm erreicht werden. Als Strahlungsquelle stehen durchstimmbare Gaslaser zur Verfügung, die im CO- bzw. CO<sub>2</sub>-Betrieb die Wellenlängenbereiche von 5,2 µm bis 6,1 µm bzw. 9,2 µm bis 10,8 µm abdecken können. Um den für die Nahfeldmikroskopie nutzbaren Wellenlängenbereich deutlich zu erweitern, wurde das System an das Infrarot-Strahlrohr der MLS angebunden. Die Synchrotronstrahlung eröffnet die Möglichkeit, Nano-Spektroskopie für die Charakterisierung von Oberflächen und verschiedenen Nanosystemen in einem weiten Spektralbereich durchzuführen.

Die Abteilung 7 beteiligt sich an vier neuen EMRP-Vorhaben des Calls 2011 mit Methoden der dimensionellen Nanometrologie. Insbesondere die Arbeiten zur Röntgenkleinwinkelstreuung (Small Angle X-ray Scattering, SAXS) werden dabei von der Entwicklung einer vakuumkompatiblen Version des Hybrid-Pixel-Röntgendetektors PILATUS mit der Schweizer Firma DECTRIS profitieren, der in Bild 3 dargestellt ist (siehe auch „Nachrichten des Jahres“).

Titelbild:

Röntgenkleinwinkelstreuung unter streifendem Strahlungseinfall (0,8°) parallel zu den Linien eines Gitters, aufgenommen mit dem vakuumkompatiblen Pilatus-Detektor bei einer Photonenenergie von 4 keV



Bild 1: Messplatz für die Kalibrierung von Strahlungsquellen im Spektralbereich von UV- und Vakuum-UV-Strahlung an der MLS

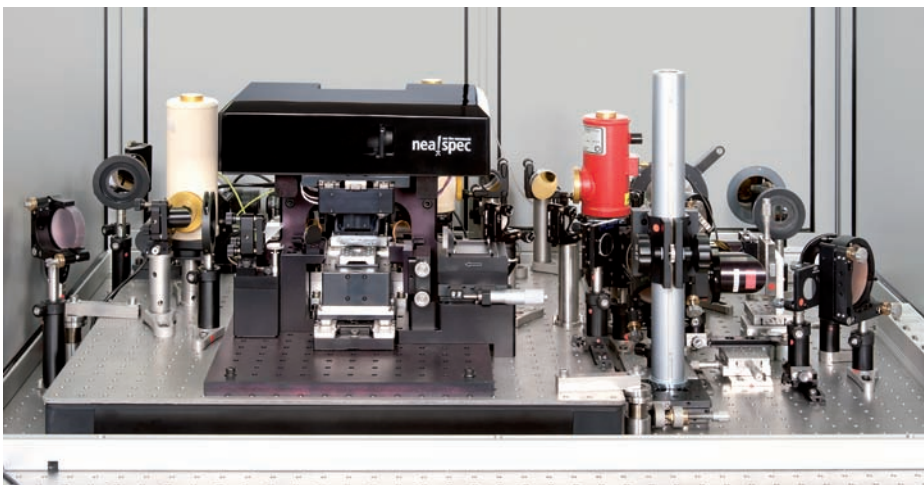


Bild 2: Streulicht-Nahfeldmikroskop für IR-Strahlung (Laser- oder Synchrotronstrahlung)

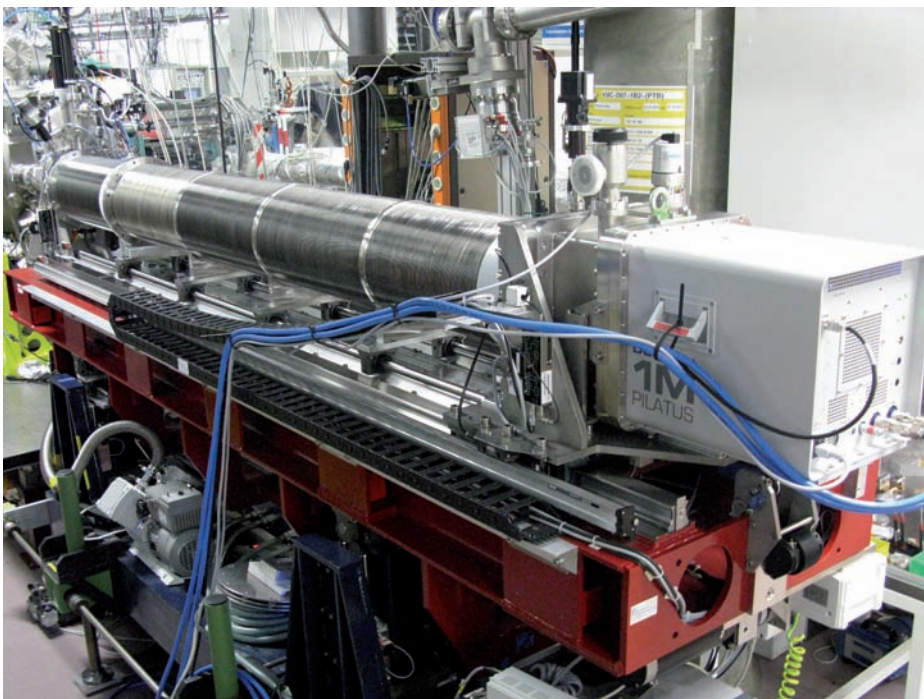


Bild 3: Röntgendetektor PILATUS am SAXS-Aufbau des Helmholtz-Zentrums Berlin im PTB-Laboratorium bei BESSY II



Bild 4: Teilnehmer der 26. Sitzung des beratenden Komitees für Thermometrie (CCT)

Damit lassen sich Messungen an den Absorptionskanten auch leichter Elemente bei Photonenenergien unterhalb von 5 keV mit hoher Dynamik und guter Ortsauflösung durchführen. Das Titelbild des Berichts der Abteilung zeigt eine Grazing-Incidence-SAXS-Aufnahme mit dem neuen PILATUS-Detektor der PTB.

Die im letzten Jahr mit dem Innovationspreis Synchrotronstrahlung ausgezeichneten Arbeiten zur Charakterisierung von Freie-Elektronen-Lasern sind auf das Gebiet harter Röntgenstrahlung oberhalb von 10 keV ausgedehnt worden. An der neuen Röntgenlaseranlage SACLA in Japan wurden gemeinsam u. a. mit Kollegen des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (DESY) und des japanischen Staatsinstituts AIST zwei unabhängige Methoden zur Pulsenergiemessung erfolgreich verglichen.

## Thermometrie

Herausragendes Ereignis für die Temperaturmetrologie war das alle zehn Jahre stattfindende Inter-

national Temperature Symposium. Im März 2012 trafen sich in Anaheim, Kalifornien, alle führenden Temperaturmetrologen und diskutierten neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Skalendarstellung und -Weitergabe, der Einführung von neuartigen eutektischen Hochtemperaturfixpunkten und der Neudefinition des Kelvins, aber auch angewandte Fragestellungen wie die Thermometrie mit fluoreszierenden Sensorelementen sowie geophysikalische und meteorologische Temperaturmessungen. Die Abteilung 7 war mit 15 Beiträgen vertreten, darunter mit einem eingeladenen Vortrag zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante.

Ein kleinerer Kreis von Experten traf sich im Mai 2012 zur 26. Sitzung des beratenden Komitees für Thermometrie in der Meterkonvention (CCT) am BIPM in Paris (Bild 4). Schwerpunkt der Beratungen waren Fragen zur Neudefinition des Kelvins. Dazu wird derzeit unter der Leitung der PTB eine Umsetzungsempfehlung (Mise en Pratique) erarbeitet. Demgemäß werden Temperaturmessungen in einigen Temperaturbereichen zunehmend mit so-

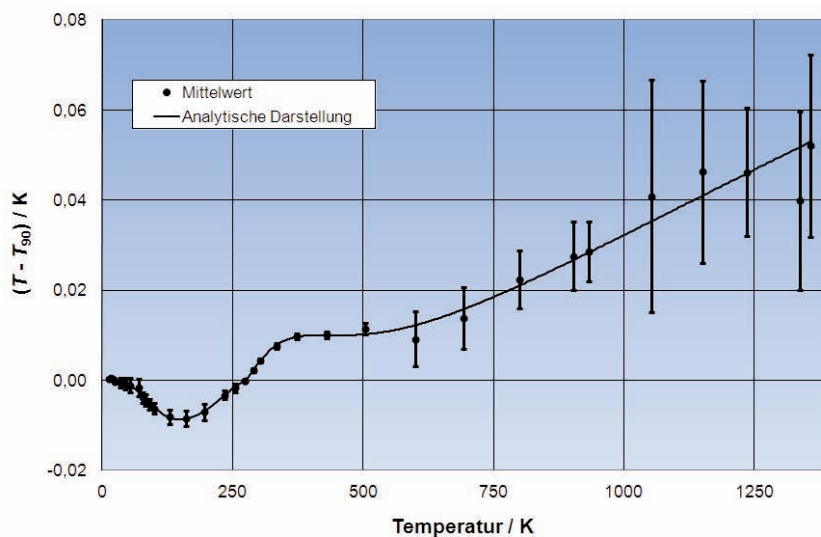


Bild 5: Differenzen zwischen thermodynamischen Temperaturen  $T$  und Temperaturen  $T_{90}$ , bestimmt nach der Internationalen Temperaturskala von 1990, ITS-90. Die Balken zeigen die entsprechenden Unsicherheiten.

genannten Primärthermometern durchgeführt, die direkt thermodynamische Temperaturen bestimmen. Für Primärthermometer ist keine Kalibrierung erforderlich. In weiten Temperaturbereichen wird jedoch die gegenwärtig gültige Internationale Temperaturskala von 1990 (ITS-90) weiterhin ihre Berechtigung behalten. Zur Gewährleistung der Einheitlichkeit des Messwesens sind daher die Differenzen zwischen den thermodynamisch bestimmten und den nach der ITS-90 gemessenen Temperaturen eindeutig festzulegen. Eine Arbeitsgruppe des CCT hatte dazu unter der Leitung der PTB alle verfügbaren Daten kritisch bewertet und diese Differenzen mit fundierten Unsicherheitsangaben veröffentlicht (Bild 5). Die Ergebnisse sind nun online in der aktuellen Mise en Pratique ([http://www.bipm.org/en/publications/mep\\_kelvin/](http://www.bipm.org/en/publications/mep_kelvin/)) als offizielle Empfehlung des CCT abrufbar.

Die kryotechnische Basis für die Realisierung, Darstellung und Weitergabe der internationalen Tieftemperaturskala PLTS-2000 konnte im letzten Jahr mit der Installation und Inbetriebnahme eines kryogenfreien  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ -Mischungskryostatensystems mit einer supraleitenden 8,5 T-Magnetspule wesentlich verbessert werden (Bild 6). Durch den automatischen Kühlbetrieb können Tieftemperaturkalibrierungen deutlich effizienter durchgeführt werden. Der aufwendige Einbau der elektrischen Zuführungen für die Thermometer und der Druckleitungen ist in diesem Jahr abgeschlossen worden, sodass 2013 Vergleichsmessungen zwischen dem bisherigen und dem neuen System erfolgen können.

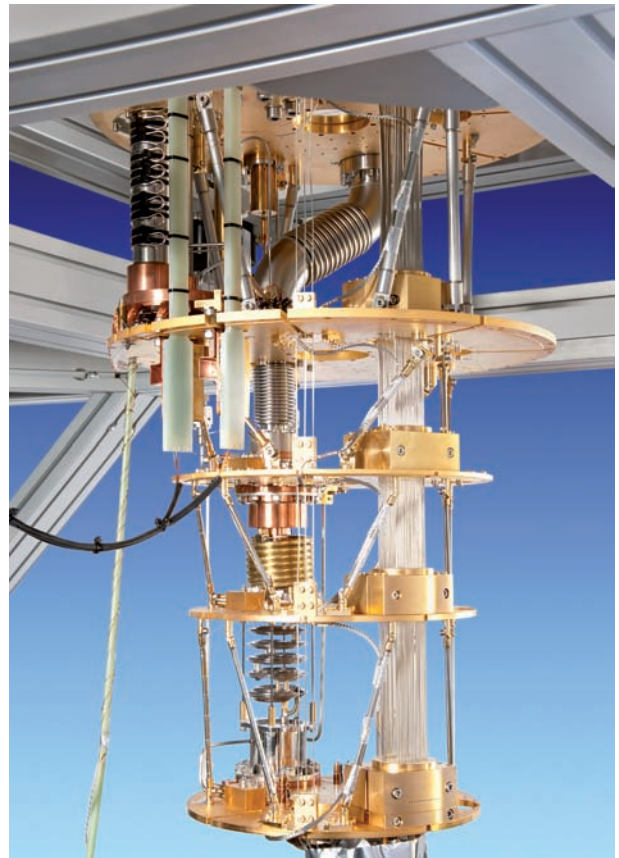


Bild 6: Kryogenfreier  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ -Mischungskryostat für die Darstellung und Weitergabe der internationalen Tieftemperaturskala PLTS-2000. Zwischen den scheibenförmigen Temperaturplattformen sind links die Stufen des Pulsrohr- sowie Mischungskühlers und rechts die zahlreichen elektrischen Zuführungen zu erkennen.

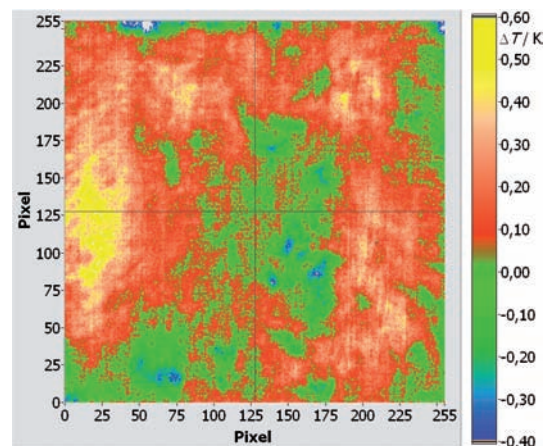
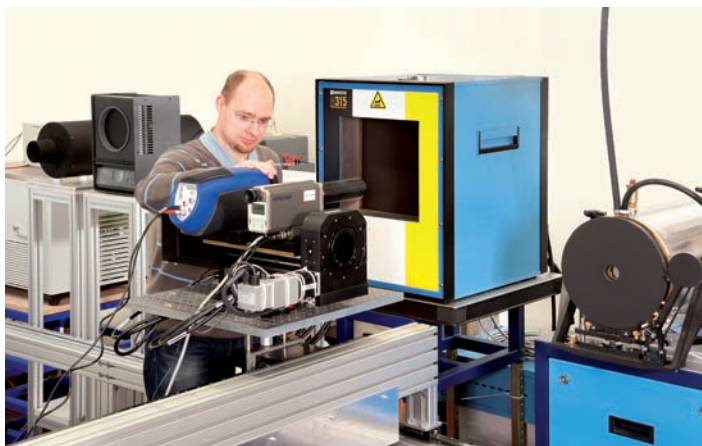


Bild 7: Links: Messplatz zur Kalibrierung von Infrarot-Thermografiegeräten, rückgeführt auf die Internationale Temperaturskala (ITS-90). Rechts: Temperaturabweichung der orts aufgelösten Temperaturanzeige einer Thermografiekamera bei der Beobachtung einer homogen strahlenden Fläche mit einer Strahlungstemperatur von 100 °C. Die Kamera arbeitet in einem Spektralbereich von 3  $\mu\text{m}$  bis 5  $\mu\text{m}$  mit einem gekühlten InSb-Empfänger von 256 x 256 Pixeln. Die beobachteten Abweichungen liegen zwischen  $-0,4$  °C und  $+0,6$  °C.

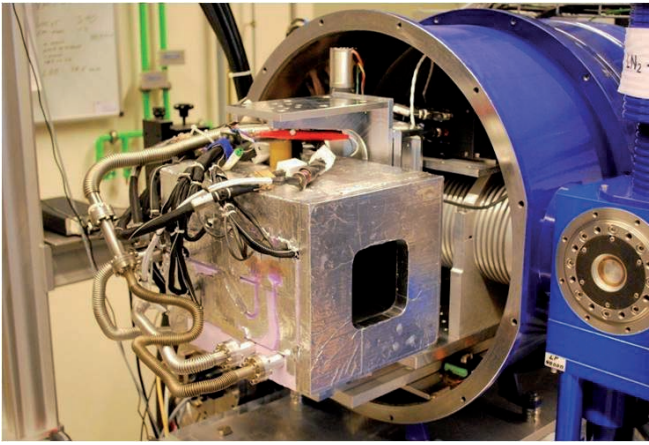


Bild 8: Einer der „In-Flight“-Infrarot-Referenzstrahler des GLORIA-Experiments während des Einbaus in die Strahlerkammer des Kalibriermessplatzes mit reduziertem Strahlungshintergrund in der PTB. Vergrößert ist rechts die pyramidenförmige Oberfläche des Referenzstrahlers zu sehen. Der Messplatz ermöglicht die radiometrische und thermometrische Charakterisierung von Infrarotstrahlern unter Vakuum und den reduzierten Druckverhältnissen der hohen Erdatmosphäre.

Bildgebende Temperaturmessungen gewinnen insbesondere in der industriellen Anwendung zunehmend an Bedeutung. Die PTB hat dieser Entwicklung mit dem Aufbau eines neuen Messplatzes Rechnung getragen, der für Infrarot-Thermografiergeräte im Bereich von  $-40\text{ °C}$  bis  $600\text{ °C}$  eine Rückführung der thermografischen Messung auf die internationale Temperaturskala ermöglicht (Bild 7). Ebenfalls in enger Zusammenarbeit mit der deutschen Industrie wurden am Messplatz für Emissionsgradmessung unter Vakuum Absorberbeschichtungen für die Hochtemperatur-Solarthermie charakterisiert. Die erzielten Messunsicherheiten von weniger als 1 % ermöglichen das Erkennen von Alterungseffekten und die weitere Optimierung dieser hochspezifischen Absorber, die in Parabolrinnen-Solkraftwerken zum Einsatz kommen.

Die Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen aus dem Bereich der Erdfernerkundung wurde fortgesetzt und ausgebaut, insbesondere mit dem Ziel, die metrologischen Grundlagen für hochgenaue rückgeführte thermometrische und radiometrische Messungen im Bereich der Klimaforschung zu gewährleisten. Im Bereich der Strahlungsthermometrie ist die berührungslose Messung von Temperaturen bis hinab zu etwa  $-50\text{ °C}$  für die Klimaforschung in der hohen Erdatmosphäre von wesentlicher Bedeutung. Um die Rückführung von flugzeuggetragenen Spektrometersystemen für die Atmosphärenforschung zu verbessern, wurden in der PTB die detektorgestützte Strahlungstemperaturskala des NPL und die strahlergestützte Skala der PTB im relevanten Temperaturbereich verglichen

und eine Übereinstimmung von deutlich besser als  $100\text{ mK}$  erzielt. Diese Ergebnisse haben im Rahmen des EMRP-Vorhabens „Metrology for Earth Observation and Climate (MetEOC)“ unmittelbare Anwendung gefunden. Gemeinsam mit der Bergischen Universität Wuppertal wurden die „In-Flight“-Referenzstrahler des Gimbalbed Limb Observer for Radiance Imaging of the Atmosphere (GLORIA) in der PTB unter anwendungsnahen Bedingungen mit für die Klimaforschung ausreichend kleinen Messunsicherheiten vollständig radiometrisch und thermometrisch charakterisiert (Bild 8). Der flugzeuggetragenen Infrarot-Hyperspektralkamera GLORIA ermöglichen die Referenzstrahler die spektroskopische Messung von Temperaturen und Spurengaskonzentrationen in der klimarelevanten Übergangszone von Troposphäre und Stratosphäre.

### Radiometrie

Gemeinsam mit der Abteilung 4 *Optik* wurde für die radiometrische Rückführung des Fernerkundungskalibriermessplatzes des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen ein neuartiges Strahldichte-TransfERNormal (Radiance Standard RASTA) von  $350\text{ nm}$  bis  $2500\text{ nm}$  mit zwei voneinander unabhängigen Methoden bezüglich seiner spektralen Strahldichte kalibriert (Bild 9). Die beiden komplementären Methoden erzielten eine sehr gute Übereinstimmung. RASTA dient nun als Strahlungsnormal für die Rückführung von Erdfernerkundungsinstrumenten an der „Calibration Home Base“ des DLR. Um zukünftig das auf einer Strahlungsquelle basierende Transfernormal auch über angepasste Filterradiometer als Detektor-TransfERNormale während des Betriebes zu überwachen und rückzuführen, wird die Zusammenarbeit mit dem DLR fortgesetzt.

Im Rahmen der Ferninfrarot- und THz-Radiometrie wurde eine Methode entwickelt, mit der Reflexions- und Transmissionsgrade bis zu Wellenlängen

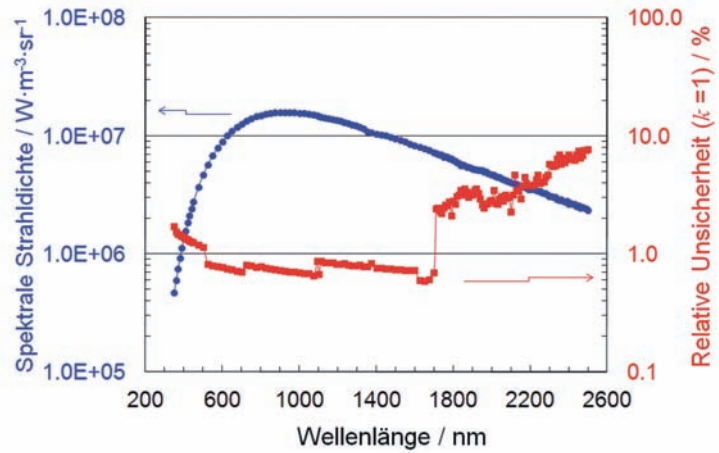
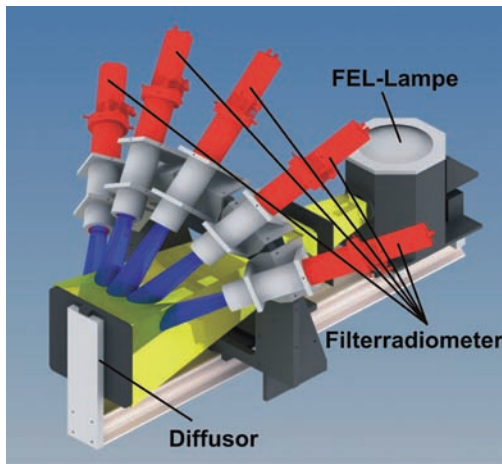


Bild 9: Aufbau des Strahldichte-Transferrnormals RASTA des DLR (links) mit der in der PTB bestimmten spektralen Strahlendichte für 0°:45° Beobachtungsgeometrie (rechts)

Aufbau mit drei pyroelektrischen Sensorelementen ermöglichen einen nahezu vollständigen Nachweis von THz-Laserstrahlung.

von 1 mm mit geringer Unsicherheit bestimmt werden können, ohne dass die Messungen durch die Eigenstrahlung der Probe und des Spektrometers verfälscht werden. Für die Entwicklung eines Transition-Edge-Superconducting (TES)-Bolometers wurde ein für den THz-Bereich und kryogene Umgebungen optimierter Absorber realisiert, der eine hohe und nahezu gleichbleibende Absorption über einen sehr breiten Spektralbereich erzielt. Er besteht aus lithografisch hergestellten strukturierten dünnen Metallschichten auf einer SiN-Membran.

## Kryosensorik

In den vergangenen Jahren wurde eine neue Elektronik für den Betrieb des Kryo-Stromkomparators (Cryogenic Current Comparator, CCC) der Abteilung 2 entwickelt, mit dessen Hilfe Widerstände hochgenau kalibriert und auf den Quanten-Hall-Effekt zurückgeführt werden. Die neue Elektronik ist vollständig computergesteuert und erlaubt Netz- oder Batteriebetrieb. Sie umfasst als Baugruppen rauscharme Stromquellen und hochisolierende Trennverstärker sowie ein neuartiges Nanovoltmeter mit bisher unerreichter Dynamik und Rückwirkungsfreiheit. Im Gegensatz zur bisherigen CCC-Elektronik sind alle benötigten Komponenten in ein gemeinsames 19-Zoll-Gehäuse integriert und nicht mehr als separate Einheiten in einem Rack untergebracht. Dadurch wird der gesamte Messaufbau we-

In Zusammenarbeit mit einem deutschen Hersteller von Energie- und Leistungssensoren wurde ein neuartiger thermischer THz-Detektor bei Raumtemperatur entwickelt, der hochwertig kalibrierbar ist. Fünf aufeinanderfolgende Absorptionsprozesse in einem patentierten polarisationsunempfindlichen



Bild 10: Test des CCC-Systems am KRISS in ungeschirmter Laborumgebung durch die PTB-Mitarbeiter Dietmar Drung (links) und Martin Götz (Mitte). Rechts im Bild ist der koreanische Kollege Dong Hun zu sehen, der das neue System in Zukunft für hochpräzise Widerstandskalibrierungen verwenden wird.

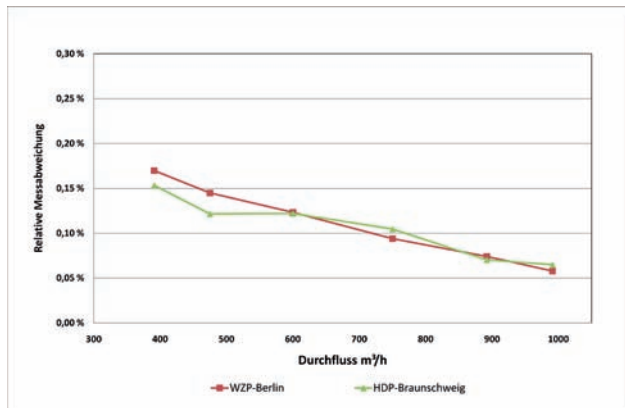


Bild 11: Vergleich der Resultate bei 20 °C zwischen den Durchflussnormalmessanlagen der PTB in Braunschweig und in Berlin (Bild rechts). Die Messabweichung ist die Differenz der Anzeige des Sensors zum realisierten Durchfluss der jeweiligen Anlage.

sentlich robuster gegenüber Störungen von außen. Dies wurde am koreanischen Partnerinstitut KRISS erfolgreich demonstriert, wo das neue CCC-System erstmals außerhalb der PTB installiert und getestet wurde (Bild 10). Obwohl sich der gesamte Messplatz dort in ungeschirmter Laborumgebung befand, wurde die gleiche Stabilität und Messunsicherheit erzielt wie in der PTB innerhalb eines elektromagnetisch geschirmten Raumes.

### Thermische Energie

In Vorbereitung eines geplanten BIPM-Ringvergleichs für große Durchflüsse bei hohen Temperaturen wurde in der PTB ein Ultraschall-5-Pfad-Sensor charakterisiert und hinsichtlich seiner Integrationsverfahren optimiert. In einem ersten Versuch wurde das Messgerät bei Volumenströmen von 300 m<sup>3</sup>/h bis 1000 m<sup>3</sup>/h bei einer Medientemperatur von 20 °C am Hydrodynamischen Prüffeld (HDP) der PTB in Braunschweig und der Wärmezählerprüfstrecke (WZP) der PTB in Berlin vermessen. Das Ergebnis zeigt eine Übereinstimmung der Skalendarstellung der beiden Prüfanlagen der PTB im Bereich von < 0,020 % (Bild 11).

Die PTB hat sich im Rahmen des EMRP-Projekts „Metrology for Improved Power Plant Efficiency“ die Aufgabe gestellt, die Messunsicherheit von Kraftwerks-Volumenstromsensoren von derzeit über 3 % auf weniger als 0,5 % zu reduzieren. Da die Durchflussmessung die wesentliche Prozessleitgröße für den Kraftwerksbetrieb ist, wirkt sich eine Reduzierung der Messunsicherheit unmittelbar auf die Kraftwerkseffizienz aus. Kraftwerkzähler können jedoch nicht bei ihren Einsatzbedingungen kalibriert werden. Die PTB verfolgt daher das Ziel, ein rückgeführtes Extrapolationsmodell für die Mess-



abweichungen von Kraftwerkzählern aufzubauen. Für die wesentliche Haupteinflussgröße, nämlich die Abhängigkeit des Messergebnisses eines Ultraschall-Durchflusssensors vom temperatur- und durchflussabhängigen Strömungsprofil im Sensor, ist dies nun gelungen: Ein Ultraschall-10-Pfad-Sensor zeigte nach einer Korrektur, welche die Strömungszustände im Messgerät berücksichtigt, eine weitgehende Unempfindlichkeit gegenüber Temperatur und Durchfluss in einem bisher experimentell unerreichten Band von +/- 0,05 %.

In der Norm EN 1434 wird zur Untersuchung von Wärmemengenzahlen u. a. eine voll ausgebildete turbulente Strömung mit einer rotationssymmetrischen und drallfreien Geschwindigkeitsverteilung gefordert, welche sich ohne Fremdeinwirkung nach einer ungestörten geraden Einlaufstrecke von ca. 100 Rohrdurchmessern einstellt. Aufgrund von baulichen Einschränkungen kann aber eine solch lange Einlaufstrecke in der Praxis nicht immer realisiert werden, und so sind auf den meisten Prüfständen typischerweise Bauteile wie Krümmer und Reduzierstücke vor der Messstrecke verbaut, die das Strömungsprofil nachhaltig beeinflussen und die Einhaltung der in der Norm genannten Anforderungen verhindern. Die PTB hat aus diesem Grund eine Strömungsgleichrichter-Baugruppe, bestehend aus einer eigens konzipierten Teilkreis-Lochplatte und dem aus der Norm bekannten Zanker-Strömungskonditionierer, entwickelt, welche an die typische Einbausituation kleiner Prüfstände angepasst ist (Bild 12). Mit dieser Baugruppe ist es gelungen, die Strömung auf einer Prüfanlage der PTB nach einer Strecke von nur 24 Durchmessern unabhängig vom Durchfluss in den nahezu voll ausgebildeten Zustand zu versetzen.

### Vakuummetrologie

Im Rahmen des EMRP-Projekts „Vacuum Metrology for Production Environments“ wurden erfolgreich Leckelemente untersucht, die an der Universität



Bild 12: Strömungsgleichrichter als Kombination eines Lochkreises zur Anfachung der Turbulenz mit einem Zanker-Gleichrichter

Genua mittels Nanotechnologie hergestellt wurden. Diese bestehen jeweils aus einer 200 nm dicken SiN-Membran, in die mit fokussierten Ionenstrahlen ein Loch geätzt wurde, dessen Durchmesser etwa 100 nm beträgt. Die Elemente haben den Vorteil, dass die Strömung bis zum atmosphärischen Druck im relativ einfach zu berechnenden molekularen Strömungsgebiet bleibt, sodass der Leitwert und der Gasfluss durch diese Elemente für jedes Gas ohne Kalibrierung vorhergesagt werden können. Die aus den geometrischen Messungen und den Simulationsrechnungen vorhergesagten Leitwerte stimmten voll mit den gemessenen Werten überein. Der Einsatz solcher Leckelemente bringt der Industrie sowohl Kosten- als auch Genauigkeitsvorteile.



# In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

## Grundlagen der Metrologie

### Dickenbestimmung von organischen Schichten durch Röntgenreflektometrie

Im Rahmen des EMRP-Projektes „SurfChem“ wurde die Methode der Dickenbestimmung von Nanoschichten durch Röntgenreflektometrie mit Synchrotronstrahlung, die im PTB-Labor am Elektronenspeicherring BESSY II bisher im Wesentlichen auf Metall- und Siliziumdioxidschichten beschränkt war, erfolgreich auf organische Schichtsysteme ausgedehnt. (M. Krumrey, FB 7.1, [michael.krumrey@ptb.de](mailto:michael.krumrey@ptb.de))

### Charakterisierung von strukturierten Oberflächen mit Scatterometrie

Im Rahmen des EMRP-Projektes „Scatterometry“ wurden Modelle zum Einfluss von Oberflächenrauheit in der goniometrischen EUV-Scatterometrie auf reale 2D-Strukturen erweitert. Für entsprechende experimentelle Untersuchungen im PTB-Labor am Elektronenspeicherring BESSY II konnte eine Vereinbarung mit dem Institut für Nanometroptik und Technologie am Helmholtz-Zentrum Berlin zur Herstellung geeigneter Teststrukturen abgeschlossen werden. (F. Scholze, FB 7.1, [frank.scholze@ptb.de](mailto:frank.scholze@ptb.de))

### Nutzerbetrieb am EUV-Strahlrohr der Metrology Light Source

Am neuen EUV-Strahlrohr der Metrology Light Source konnten erste Messungen im Rahmen von Forschungsk Kooperationen durchgeführt werden. Sie beziehen sich unter anderem auf die Untersuchung von Photodetektoren und Spiegeln für die welt raumbasierte sonnenphysikalische Forschung und auf den Einfluss der Polarisation von Synchrotronstrahlung bei der Charakterisierung optischer Komponenten. (F. Scholze, FB 7.1, [frank.scholze@ptb.de](mailto:frank.scholze@ptb.de))

### Nutzerbetrieb am Undulatorstrahlrohr der Metrology Light Source

Am neuen Strahlrohr für monochromatisierte Undulatorstrahlung der Metrology Light Source für den Spektralbereich von UV-, VUV- und EUV-Strahlung hat der Nutzerbetrieb begonnen. Mit einem VUV-Ellipsometer und einem hochauflösenden Photoelektronenspektrometer externer Forschungsgruppen wurden erste erfolgreiche Experimente zur Oberflächenphysik unter anderem an organischen Photoleiterschichten

durchgeführt. (A. Gottwald, FB 7.1, [alexander.gottwald@ptb.de](mailto:alexander.gottwald@ptb.de))

### Streulicht-Nahfeldmikroskop an der Metrology Light Source

Am IR-Strahlrohr der Metrology Light Source wurde ein Messplatz für Nahfeldmikroskopie und -spektroskopie aufgebaut. Das Streulicht-Nahfeldmikroskop kann sowohl mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung im Wellenlängenbereich von 9,2 µm bis 10,8 µm betrieben werden als auch im gesamten IR- und THz-Bereich mit breitbandiger Synchrotronstrahlung, wodurch die spektroskopische Charakterisierung von unterschiedlichen Nanosystemen möglich wird, bei einer Ortsauflösung von weniger als 100 nm. Der Messplatz, der durch weitere Lasersysteme ergänzt werden soll, wird u. a. in Kooperation mit der FU Berlin genutzt. (P. Hermann, FB 7.2, [peter.hermann@ptb.de](mailto:peter.hermann@ptb.de))

### Bestimmung von Fundamentalparametern für die Röntgenanalytik

Für eine verbesserte Röntgenanalytik sind atomare Fundamentalparameter mit einem neuen Ansatz und einem verlässlichen Unsicherheitsbudget bestimmt worden. Dies ermöglicht es, auf bisher teilweise nur geschätzte Unsicherheiten für Fundamentalparameter zu verzichten und Analysen zuverlässiger zu bewerten. Um das Potenzial dieses Ansatzes für die Fundamentalparameterbestimmung zu zeigen, wurden Coster-Kronig-Übergangswahrscheinlichkeiten und L-Kanten-Fluoreszenzausbeuten für die Elemente Molybdän, Palladium, Gold und Blei bestimmt. (P. Hönicke, FB 7.2, [philipp.hoenicke@ptb.de](mailto:philipp.hoenicke@ptb.de))

### SQUID-Sensor mit differenziellem Signalausgang

Für die Anwendung von SQUID-Sensoren in der Präsenz starker elektromagnetischer Interferenzen (EMI) wurde ein neues Schaltungskonzept („diffSQUID“) aus zwei nominell identischen SQUID-Sensoren aufgebaut, das ein differenzielles Ausgangssignal liefert. Im Ergebnis werden Gleichtaktsignale, z. B. von EMI-verursachten Potenzialdifferenzen entlang der SQUID-Verdrahtung, um mehrere Größenordnungen unterdrückt. Das neue Schaltungskonzept soll unter anderem für die Auslesung von höchstempfindlichen Bolometern für die Astrophysik eingesetzt werden. (D. Drung, FB 7.2, [dietmar.drung@ptb.de](mailto:dietmar.drung@ptb.de))

### **Thermodynamische Modellierung von thermischen Relaxationsmessungen bei tiefen Temperaturen**

Im Rahmen der Forschungs Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin zur Bestimmung der Wärmekapazität dielektrischer Festkörper im Tieftemperaturbereich (unterhalb 1 K) konnte eine neue Methode zur thermodynamischen Modellierung der in der Relaxationskalorimetrie gemessenen Temperatur-Zeit-Profile erfolgreich getestet werden. Dadurch konnte nicht nur die spezifische Wärme der magnetischen Anregungszustände in Spin-Eis mit verbesserter Präzision angegeben, sondern auch ihr gesamtes Spektrum präsentiert werden. (P. Strehlow, FB 7.2, peter.strehlow@ptb.de)

### **Erfolgreicher Vergleich der Strahlungstemperaturmessung von $-57\text{ °C}$ bis $50\text{ °C}$ für die Atmosphärenforschung**

Die berührungslose Messung von Temperaturen in der hohen Erdatmosphäre bis hinab zu etwa  $-50\text{ °C}$  auf der Grundlage von Infrarotstrahlung ist für die Klimaforschung von wesentlicher Bedeutung. Um die Rückführung von flugzeuggetragenen Spektrometersystemen für die Atmosphärenforschung zu verbessern, wurden in der PTB die detektorgestützte Strahlungstemperaturskala des NPL und die strahlergestützte Skala der PTB im relevanten Temperaturbereich verglichen und eine Übereinstimmung von deutlich besser als 100 mK erreicht. (B. Gutschwager, FB 7.3, berndt.gutschwager@ptb.de)

### **Charakterisierung von Verunreinigungen in Pt-Dünnschichtthermometern**

Kontaminationen des Platinsensors sind in Pt-Widerstandsthermometern bei Temperaturen oberhalb von  $600\text{ °C}$  von entscheidender Bedeutung. Pt-Dünnschicht-Sensoren wurden charakterisiert und bei  $700\text{ °C}$  gealtert. Durch die Zusammenarbeit mit der AG 7.24 konnten neben der Änderung der Charakteristik als Thermometer zusätzlich die Verunreinigungen mit Ag, Fe, Cu, Ni und Mg in den Sensoren mithilfe von Röntgenfluoreszenzanalyse erstmals identifiziert werden. (I. Jursic, FB 7.4, ivan.jursic@ptb.de)

### **EMRP-Projekt „Implementing the new Kelvin“ gestartet**

Das gestartete EMRP-Projekt „Implementing the new Kelvin“, an dem Partner aus 14 Ländern teilnehmen, hat zum Ziel, die neue Definition des Kelvin durch eine substanzielle Verbesserung der Primärthermometrie über nahezu sechs Dekaden in der Temperatur umzusetzen. Die Fachbereiche 7.3 und 7.4 sind an drei Arbeitspaketen des Projekts

mit der berührungslosen und berührenden Bestimmung von thermodynamischen Temperaturen beteiligt, wobei das Arbeitspaket für den Bereich der PLTS-2000, der Temperaturskala von 0,9 mK bis 1 K, vom Fachbereich 7.4 selbst geleitet wird. (J. Engert, FB 7.4, jost.engert@ptb.de)

### **Bestimmung elastischer Konstanten fester Körper**

Für die Messung der Boltzmann-Konstante mittels Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie ist die Kenntnis der effektiven Kompressibilität des Messkondensators erforderlich. Hierfür muss die Kompressibilität der Kondensatormaterialien Edelstahl bzw. Wolframcarbid mit einer extrem geringen relativen Unsicherheit (0,1 % und darunter) gemessen werden. Dies wurde mittels resonanter Ultraschallspektroskopie erreicht. Um die Auswertung der Ergebnisse auf eine sichere Basis zu stellen, wurde dabei das inverse Problem der Bestimmung der elastischen Konstanten aus den Resonanzfrequenzen mit zwei grundsätzlich unterschiedlichen numerischen Methoden gelöst. (T. Zandt, FB 7.4, thorsten.zandt@ptb.de)

### **Neues Verfahren zur Positionsbestimmung des Messvolumens für Laser-Doppler-Velozimetrie-Messungen**

In der PTB wurde ein neuartiges Verfahren entwickelt, um die Position des Messvolumens bei der Laser-Doppler-Velozimetrie (LDV) zu bestimmen. Das entwickelte Verfahren basiert auf der Messung der Intensitätsverteilung der beiden sich kreuzenden Laserstrahlen. Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass durch die Anbringung des Targets am Messort (z. B. in einer Fensterkammer) die Position des Messvolumens in situ bestimmt werden kann. Mit dem Verfahren ist für die Bestimmung des Messorts eine Standardabweichung von etwa  $30\text{ }\mu\text{m}$  zu erreichen. Dies stellt eine Verbesserung gegenüber herkömmlichen Verfahren um ca. einen Faktor 5 dar. (M. Juling, FB 7.5, markus.juling@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Erste Messungen mit einem vakuumkompatiblen Hybrid-Pixel-Röntgendetektor**

Im Rahmen einer Kooperation mit der Schweizer Firma Dectris wurde die vakuumkompatible Version eines Hybrid-Pixel-Röntgendetektors („Pilatus-Detektor“) entwickelt, die zum Beispiel Röntgenkleinwinkelstreuung für die dimensionelle Nanometrologie auch an den Absorptionskanten leichter Elemente bei Photonenenergien unterhalb

von 5 keV mit hoher Dynamik und guter Ortsauflösung ermöglicht. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

### **Metrologie für die EUV-Lithografie**

Die Carl Zeiss SMT GmbH und die PTB haben vereinbart, ihre seit 1998 laufende umfangreiche Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Optik-Entwicklung für die EUV-Lithografie in den nächsten vier Jahren noch auszuweiten. Carl Zeiss liefert die optischen Systeme für ASML, den niederländischen Weltmarktführer für Lithografie-Anlagen zur Herstellung von Computer-Chips und anderen mikroelektronischen Bauelementen. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

### **Laborquelle für EUV-Strahlung mit durchstimmbarem Spektrum**

In Rahmen einer Forschungsk Kooperation hat die PTB die BESTEC GmbH in Berlin-Adlershof bei der Entwicklung einer laserbasierten Laborquelle für EUV-Strahlung mit durchstimmbarem Spektrum messtechnisch unterstützt. Die Arbeiten stehen im Zusammenhang mit der bevorstehenden industriellen Nutzung von EUV-Strahlung und -Messtechnik bei der mikrolithografischen Fertigung von Halbleiterbauelementen. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

### **EMRP-Projekt NEW08 „MetNEMS“ gestartet**

Nanomechanische Aktuatoren und Resonatoren sind für verschiedene metrologische Anwendungen wie z. B. bei der Messung kleiner Kräfte und Massen oder als stabile miniaturisierte Frequenzreferenzen interessant. Der Fachbereich 7.2 beteiligt sich im Rahmen des Vorhabens zusammen mit dem Fachbereich 2.4 an der Entwicklung von NEMS-Resonatoren mit supraleitenden elektronischen Komponenten. (Th. Schurig, FB 7.2, thomas.schurig@ptb.de)

### **Abschluss eines MNPQ-Vorhabens zur Entwicklung von Kalibrierproben für die Röntgenspektrometrie**

In Kooperation mit der Firma AXO Dresden GmbH wurde ein MNPQ-Projekt zur Entwicklung und Charakterisierung neuartiger Kalibrierproben mit Schichtabscheidungen im Submonolagenbereich für die quantitative Röntgenfluoreszenzanalyse in verschiedenen Strahlgeometrien erfolgreich abgeschlossen. Die Charakterisierung und Validierung dieser Proben erfolgte durch referenzprobenfreie Röntgenspektrometrietechniken unter Nutzung von Synchrotronstrahlung. (B. Beckhoff, FB 7.2, burkhard.beckhoff@ptb.de)

### **Abschluss des EU/BMBF-Vorhabens EEMI450 „European Equipment and Materials Initiative for wafers with a diameter of 450 mm“**

Für eine Messtechnik-Plattform zur 450-mm-Wafer-Analytik wurde eine Designstudie erstellt. Dabei wurde die Komplementarität von verschiedenen analytischen Methoden im Design berücksichtigt, um die Bewertung von Oberflächen von Siliziumwafern mit einem Durchmesser von 450 mm hinsichtlich Zuverlässigkeit und Rückführbarkeit der Ergebnisse zu verbessern. (B. Beckhoff, FB 7.2, burkhard.beckhoff@ptb.de)

### **Kalibriermessplatz für bildgebende Infrarot-Temperaturmessgeräte in Betrieb**

Ein neuer Messplatz für die Kalibrierung von Infrarot-Thermografiegeräten ist in Betrieb gegangen. Wärmerohrstrahler mit Aperturen von bis zu 70 mm im Durchmesser und Temperaturen bis zu 962 °C sowie Flächenstrahler von bis zu 300 mm × 300 mm Fläche und Temperaturen bis 600 °C erlauben eine auf die Internationale Temperaturskala ITS-90 rückgeführte Kalibrierung. (B. Gutschwager, FB 7.3, berndt.gutschwager@ptb.de)

### **Absorber für die Hochtemperatur-Solarthermie charakterisiert**

In Kooperation mit der SCHOTT Solar CSP GmbH wurde der Emissionsgrad von Absorbermaterialien, die in Parabolrinnen-Solkraftwerken zum Einsatz kommen, mit Messunsicherheiten unter 1 % vermessen. Die kleine Messunsicherheit ermöglicht das Erkennen von Alterungseffekten und die weitere Verbesserung des selektiven Absorptionsvermögens. (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)

### **Gut kalibrierbarer Terahertz-Detektor entwickelt**

In Zusammenarbeit mit einem deutschen Hersteller von Energie- und Leistungssensoren und gefördert mit Mitteln des europäischen Fonds für regionale Entwicklung EFRE wurde ein neuartiger Terahertz-Detektor entwickelt. Fünf aufeinanderfolgende Absorptionsprozesse in einem patentierten polarisationsunempfindlichen Aufbau mit drei pyroelektrischen Sensorelementen ermöglichen einen nahezu vollständigen Nachweis von THz-Laserstrahlung und damit eine gute Bestimmung der Empfindlichkeit des Detektors. (A. Steiger, FB 7.3, andreas.steiger@ptb.de)

### **Lithografisch strukturierter Dünnschichtabsorber für den THz-Bereich entwickelt**

Im Rahmen der Entwicklung eines Transition-Edge-Superconducting (TES)-Bolometers wurde ein für den THz-Bereich und kryogene Umge-

bungen optimierter Absorber entwickelt, der eine hohe und nahezu gleichbleibende Absorption über einen sehr breiten Spektralbereich erreicht. Er besteht aus lithografisch hergestellten strukturierten dünnen Metallschichten auf einer SiN-Membran. Die Anpassung des Flächenwiderstandes an die Vakuumimpedanz erlaubt eine optimale Absorption der zu detektierenden Strahlung. (M. Kehrt, FB 7.3, mathias.kehrt@ptb.de)

### **Reflexions- und Transmissionsgrade im FIR untergrundfrei bestimmen**

Reflexions- und Transmissionsgradmessungen im langwelligen fernen infraroten Spektralbereich (FIR) werden leicht durch die Eigenstrahlung der Probe und des Spektrometers verfälscht. Im FB 7.3 wurde ein Messverfahren entwickelt, mit dem Reflexions- und Transmissionsgrade im FIR bis hin zu Wellenlängen von 1 mm untergrundfrei und mit geringer Unsicherheit bestimmt werden können. (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)

### **Rauschtemperaturmessungen am Erstarrungspunkt von Kupfer (1084,62 °C)**

Im Rahmen des EMRP-Projekts „HiTeMS“ (High Temperature Metrology for Industrial Applications) wurden Rauschtemperaturmessungen zur metrologischen Charakterisierung eines kombinierten Thermoelement-Rauschtemperatursensors durchgeführt, der zur In-situ-Überprüfung des Driftverhaltens von Thermoelementen bei hohen Temperaturen dient. Die gute Übereinstimmung der gemessenen Rauschtemperatur am Kupfererstarrungspunkt mit der ITS-90-Temperatur dieses Fixpunkts innerhalb von 0,3 K erlaubt die Verwendung des kombinierten Rauschtemperatursensors mit einer relativen Unsicherheit von nur 0,1 %. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

### **Rückführbare Messungen des Seebeck-Koeffizienten thermoelektrischer Materialien**

Im Rahmen des EMRP-Projektes „Metrology for Energy Harvesting“ wurden Verbesserungen der Messanlage zur Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten durchgeführt. Die Einführung von Au/Pt-Differenzthermoelementen und die Verwendung eines kalibrierten Pt100-Thermometers zur Messung der Referenztemperatur führten zu einer deutlich verbesserten Reproduzierbarkeit der Messungen, die es erlauben wird, Referenzmaterialien für Seebeck-Koeffizienten auf Basis einer Cu-Ni-Legierung und eines dotierten Halbleiters (PbTe) zu zertifizieren. (E. Lenz, FB 7.4, ernst.lenz@ptb.de)

### **Kalibrierplatz für Schallgeschwindigkeitssensoren**

Für Temperaturmessungen in strömenden Flüssigkeiten und Gasen werden zunehmend Verfahren verwendet, welche auf der Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit beruhen. Daher wurde im Rahmen eines EMRP-Projektes ein Kalibrierplatz für Schallgeschwindigkeitssensoren entwickelt, die in der Ozeanografie eingesetzt werden. Erste Ergebnisse zeigen, dass für die Schallgeschwindigkeit in wässrigen Lösungen Messunsicherheiten unter 100 ppm erreicht werden können. (C. v. Rohden, FB 7.4, christoph.v.rohden@ptb.de)

### **Wärmeableitfehler bei Kapselthermometern**

Die Bestimmung von Temperaturmessfehlern durch Wärmeleitung in elektrischen Zuleitungen bei Kapselthermometern, insbesondere bei industriell breit angewendeten Platin-Widerstandsthermometern, war bisher ein ungelöstes Problem. Auf der Basis detaillierter Modelle für den thermischen Ausgleich konnten zwei neue Thermometerparameter definiert werden: der Wärmewiderstand zwischen den elektrischen Kontakten und der Kapsel des Thermometers und der Faktor für die Reduzierung von Temperaturdifferenzen innerhalb des Thermometers. Die experimentelle bzw. theoretische Bestimmung dieser beiden Parameter erlaubt es nun, die Messunsicherheit über die Beschreibung des vorliegenden thermischen Netzwerkes zuverlässig abzuschätzen. (Ch. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

### **Schnellst-öffnendes Hochvakuum-Schieberventil der Welt getestet**

Im Rahmen des EMRP-Projekts IND12 „Vacuum metrology for production environments“ wird ein dynamisches Drucknormal aufgebaut, in dem sich der Druck von 100 kPa auf 100 Pa innerhalb einer Sekunde und zu jedem Zeitpunkt auf vorhersagbare Weise ändern lässt. Damit für die dazu nötigen Simulationsrechnungen definierte Randbedingungen herrschen, wurde ein Schieberventil (DN40) entwickelt, das sich innerhalb von 10 ms öffnet. Die Öffnungszeit wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera analysiert und beträgt selbst bei 100 kPa Differenzdruck nur 5,7 ms. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)

### **Workshop zu den metrologischen Eigenschaften von Quadrupolmassenspektrometern**

Gemeinsam mit dem Institut für Metallphysik in Ljubljana (IMT) hat die PTB einen sehr erfolgreichen „Workshop on measurement characteristics and use of quadrupole mass spectrometers for va-

cuum applications“ organisiert. Dabei sollten die Anforderungen von Nutzern aus Industrie und Forschung an die Rückführung und die Kalibrierung von Quadrupolmassenspektrometern ermittelt und von den Herstellern die neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der Quadrupolmassenspektrometer vermittelt werden. Diese Informationen dienen der Bearbeitung des Work Package 3 des EMRP-Projekts IND12. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)

### **Überarbeitete Technische Richtlinien zur korrekten Verwendung von Wärmehählern**

Für die Energiemessung in thermischen Kreisläufen zur Heizungs- und Kälteversorgung wurde eine neue Technische Richtlinie (K 9) „Inbetriebnahme von Wärme- und Kältezählern“ erarbeitet. Die Technische Richtlinie K 8 „Auswahl und Einbau von Temperaturfühlern für Messgeräte thermischer Energie“ wurde darüber hinaus vollständig überarbeitet und gegenüber der bisherigen Fassung in Bezug auf Wärme- und Kältemessungen in Haustechnik und Fernwärme vereinheitlicht. (J. Rose, FB 7.5, juergen.rose@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Charakterisierung einer Gasjet-Strahlungsquelle**

In Rahmen einer Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde eine neuartige Vakuum-UV-Gasjet-Strahlungsquelle konditioniert und anschließend, basierend auf der berechenbaren Synchrotronstrahlung des Elektronenspeicherringes BESSY II, im Wellenlängenbereich von 40 nm bis 400 nm radiometrisch charakterisiert. Die Quelle wird von der DLR an einer Sonnensimulationsanlage zum Test von Detektoren und Materialien eingesetzt. (R. Thornagel, FB 7.1, reiner.thornagel@ptb.de)

#### **Messungen für „Solar Orbiter“**

Mit dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung und dem Royal Observatory of Belgium wurde vereinbart, an der Metrology Light Source der PTB die Messungen zur radiometrischen Charakterisierung der Instrumente SPICE (Spectral Imaging of the Coronal Environment) und EUI (EUV full-Sun and high-resolution Imager) der Sonnenmission „Solar Orbiter“ auszuweiten. Sowohl einzelne optische Komponenten als auch die Gesamtsysteme sollen dabei untersucht werden. (A. Gottwald, FB 7.1, alexander.gottwald@ptb.de)

#### **Radiometrische Charakterisierung der Referenzstrahler des Atmosphärenforschung-Spektrometers GLORIA**

In Zusammenarbeit mit der Bergischen Universität Wuppertal wurden im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens „Metrology for Earth Observation and Climate“ (MetEOC) die „In-Flight“-Referenzstrahler des Gimballed Limb Observer for Radiance Imaging of the Atmosphere (GLORIA) am Messplatz mit reduziertem Strahlungshintergrund der PTB unter anwendungsnahen Bedingungen mit für die Klimaforschung ausreichend kleinen Messunsicherheiten vollständig radiometrisch und thermometrisch charakterisiert. (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)

#### **Radiometrische Rückführung für das Institut für Methodik der Fernerkundung des DLR**

Für die radiometrische Rückführung des Fernerkundungs-Kalibriermessplatzes des DLR in Oberpfaffenhofen wurde ein neuartiges Strahldichte-Transfornormal (RASTA) mit zwei voneinander unabhängigen Kalibriermethoden im Spektralbereich von 350 nm bis 2500 nm mit einer Standardmessunsicherheit von 0,8 % bis 7,5 % kalibriert. Die beiden komplementären Methoden, die zum einen in der Arbeitsgruppe *Hochtemperaturskala* und zum anderen in den Arbeitsgruppen *strahlergestützte Spektroradiometrie* und *Reflektometrie* durchgeführt wurden, erzielten eine sehr gute Übereinstimmung im Rahmen der kombinierten Messunsicherheit. (D. Taubert, FB 7.3, dieter.taubert@ptb.de)

#### **Adaptation eines Fourier-Transform-Spektrometers zur Messung der solaren UV-Bestrahlungsstärke**

Im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens „Traceability for Surface Spectral Solar Ultraviolet Radiation“ wurde ein kommerziell erhältliches Fourier-Transform-Spektrometer an solare Bestrahlungsstärkemessungen adaptiert. Es wurde nachgewiesen, dass die Wellenlängenunsicherheit des Geräts im ultravioletten Spektralbereich für die exakte Messung des steilen Abfalls der solaren UV-Strahlung, die auf der atmosphärischen Ozon-Absorption beruht, ausreichend klein ist. (P. Meindl, FB 7.3, peter.meindl@ptb.de)

## Internationale Angelegenheiten

### Bilateraler Detektorvergleich im weichen Röntgenbereich

In einem bilateralen Vergleich wurden die Skalen der spektralen Empfindlichkeit im weichen Röntgenbereich zwischen dem japanischen Staatsinstitut AIST und der PTB verglichen. Mithilfe zweier Photodioden konnte die Übereinstimmung der jeweils auf Kryoradiometern basierenden Skalen im Photonenenergiebereich von 0,36 keV bis 5 keV gezeigt werden. Die Skala der PTB erstreckt sich darüber hinaus bis 60 keV. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

### Röntgenlaser kalibriert

Mitarbeiter der PTB haben an der neuen, gut 700 m langen Röntgenlaseranlage SACLA in Japan gemeinsam mit Kollegen des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (DESY), des japanischen Forschungszentrums RIKEN und des japanischen Staatsinstituts AIST absolute Photonenflüsse mit zwei unabhängigen Methoden gemessen und diese damit verglichen. SACLA befindet sich seit Sommer 2011 in Betrieb und ist der weltweit erste Freielektronen-Laser (FEL) für den harten Röntgenbereich oberhalb einer Photonenenergie von 10 keV. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

### Metrologische Infrastruktur für Tunesien

Während der vergangenen Jahre wurden Temperaturfixpunktzellen, Normalthermometer und Thermoelemente des Nationalen Metrologieinstituts von Tunesien (CME, Centre de Métrologie Légale & Industrielle) in der PTB kalibriert und Mitarbeiter für die Weitergabe der Internationalen Temperaturskala von 1990 geschult. In diesem Jahr erfolgte eine Vor-Ort-Begutachtung in Tunis durch einen PTB-Fachexperten, um die Akkreditierung durch den Tunesischen Akkreditierungsrat TUNAC und die Einreichung von CMC-Einträgen vorzubereiten. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

### Verbesserte Regeln für die Darstellung der Basiseinheit Kelvin

In der 26. Beratung des Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) konnte die Arbeitsgruppe 1 unter der Leitung der PTB wesentliche Fortschritte bei der Festlegung von Regeln und Empfehlungen für die Darstellung der Basiseinheit Kelvin erzielen. Das betrifft die „Mise en Pratique“ ([http://www.bipm.org/en/publications/mep\\_kelvin/](http://www.bipm.org/en/publications/mep_kelvin/)), eine übergreifende Umsetzungsempfehlung, die bereits jetzt im Vorgriff auf die neue Definition des Kelvin die indirekte Realisierung thermodynamischer Tem-

peraturen über die ITS-90 ermöglicht, und auch die dringend notwendige Aktualisierung der vom CCT empfohlenen Methoden für die Darstellung der ITS-90 ([http://www.bipm.org/en/publications/mep\\_kelvin/its-90\\_supplementary.html](http://www.bipm.org/en/publications/mep_kelvin/its-90_supplementary.html)). (B. Fellmuth, FB 7.4, bernd.fellmuth@ptb.de)

### Metrologische Staatsinstitute bereiten sich auf die Neudefinition der Basiseinheiten vor

Entsprechend der geplanten Neudefinition des Kelvin werden Temperaturmessungen in einigen Temperaturbereichen zunehmend mit Primärthermometern durchgeführt werden, die direkt thermodynamische Temperaturen bestimmen. In weiten Temperaturbereichen wird jedoch die gegenwärtig gültige Internationale Temperaturskala von 1990 (ITS-90) weiterhin ihre Berechtigung behalten. Zur Gewährleistung der Einheitlichkeit des Messwesens sind die durch die Arbeitsgruppe 4 des Comité Consultatif de Thermométrie unter der Leitung der PTB bestimmten Differenzen zwischen den thermodynamischen und den nach der ITS-90 gemessenen Temperaturen nun online abrufbar. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)



Abteilung 8  
Medizinphysik und metrologische  
Informationstechnik





## Einleitung

Willkommen zum diesjährigen Rundgang durch die Abteilung. Diesmal wählen wir als Eingang den im umseitigen Titelbild präsentierten neuen Zugang zum ehemaligen Quarzuhrenkeller. Hier, wo vor 80 Jahren Scheibe und Adelsberger die ersten Quarzuhren entwickelten und an den Zeitdienst anschlossen, befindet sich jetzt ein modernes Forschungslaboratorium für Magnetresonanztomografie und –spektroskopie mit einem 3T-Ganzkörper-tomografen als zentralem Versuchsaufbau. Zwei der daran bearbeiteten Themen, die Gewährleistung der Patientensicherheit und die Vergleichbarkeit von Messergebnissen, werden exemplarisch im nachfolgenden Kapitel behandelt.

Der neue Anbau wurde als lichtdurchflutetes Souterrain gestaltet, um den ungestörten Anblick des neu renovierten ältesten Gebäudes des PTB, des Observatoriums, zu ermöglichen. Im Observatorium sind überwiegend die Arbeitsgruppen der Biomedizinischen Optik angesiedelt. Beispielhaft beleuchten wir hier ein europäisches Projekt zur Nah-Infrarot-Bildgebung.

Für das anschließende Thema bewegen wir uns in ein anderes Gebäude, das – ähnlich wie das Observatorium vor 120 Jahren – speziell ausgerichtete Versuchsbedingungen vorweist: den magnetisch ruhigsten Raum der Erde. Ein idealer Ort für extrem empfindliche Magnetsignalmessungen.

Schließlich zeigen wir anhand eines Spektrums an Beispielen, dass wir gebäude-, orts- und abteilungsübergreifend kooperieren und unsere mathematische Expertise zur Unterstützung anbieten und einsetzen. Ähnlich interdisziplinär durchdringend wirkt die Informationstechnik; entsprechend runden die aufgeführten Beispiele aus diesem Bereich das „mobile“ Bild der Abteilung ab.

Dieser Bericht reflektiert nur schlaglichtartig die vielfältigen Aktivitäten der Abteilung. Die nachfolgenden Schlagzeilen weisen in Kurzform auf viele andere Aspekte unserer Arbeit hin. Wir laden Sie ein: Kommen Sie mit uns ins Gespräch! Die am Ende der Schlagzeilen genannten Ansprechpartner diskutieren die Themen gerne ausführlicher mit Ihnen.

Titelbild:

Patio des Eingangsbereiches zum Magnetresonanzlaboratorium im ehemaligen Quarzuhrenkeller des Observatoriums

Insgesamt wird deutlich, dass wir dank EMRP viele Themen mit unseren europäischen Partnern bearbeiten; insofern vollzieht sich mit dem Rundgang durch die Abteilung auch eine virtuelle Rundreise durch Europa.

## Patientensicherheit und Vergleichbarkeit medizinischer Bilddaten: Metrologie für die Magnetresonanztomographie im europäischen Kontext

Metrologische Fragestellungen im Zusammenhang mit medizinischer Bildgebung im Allgemeinen und Magnetresonanztomografie (MRT) im Besonderen lassen sich unter folgenden Themenblöcken zusammenfassen: Patientensicherheit, Vergleichbarkeit von Messdaten in der Medizin, Quantifizierung und Entwicklung neuer Messverfahren. Auf allen vier Gebieten ist der Fachbereich 8.1 *Medizinische Messtechnik* aktiv, aber eine Besonderheit der beiden erstgenannten ist es, dass sie die Bearbeitung in größeren Konsortien, z. B. auf europäischer Ebene, nahelegen.

Seit April 2012 koordiniert der Fachbereich ein EMRP-Projekt mit dem Titel „Metrology for next-generation safety standards and equipment in MRI“. Erst die Zusammenarbeit mit Partnern aus Turin, Delft, London und nicht zuletzt Braunschweig (FB 6.6) gestattet es, das weite Feld MRT-Sicherheit in großer Breite anzugehen. Während 8.1 seine Kompetenz auf dem Gebiet der Messung von Hochfrequenz-Feldverteilungen innerhalb und außerhalb des menschlichen Körpers beiträgt (Bild 1), werden von den Partnern komplementäre Themen wie „Numerische Feldsimulationen“, „Physiologische Effekte des MRT-Streufelds“, „Metallische Implantate“ oder „Photonendosimetrie im Magnetfeld“ bearbeitet. Schon aufgrund des breiten Ansatzes hat das EMRP-Projekt eine viel größere Sichtbarkeit und damit deutlich bessere Chancen, mit seinen Ergebnissen konkreten Einfluss auf künftige Normungs- oder Regulierungsverfahren zu nehmen, als dies bei unkorrelierten Einzelvorhaben möglich wäre. Erfahrungsaustausch und Synergiegewinne innerhalb des Projekts versprechen dann noch einen zusätzlichen Bonus.

Nachgerade unabdingbar ist eine Zusammenarbeit über Instituts- und noch besser Ländergrenzen hinweg beim Thema „Vergleichbarkeit von Messdaten in der Medizin“. In der multizentrischen Studie kommt die medizinische Forschung einem Ringvergleich am nächsten und offenbart gleichzeitig, wie weit man noch von klassischen metro-

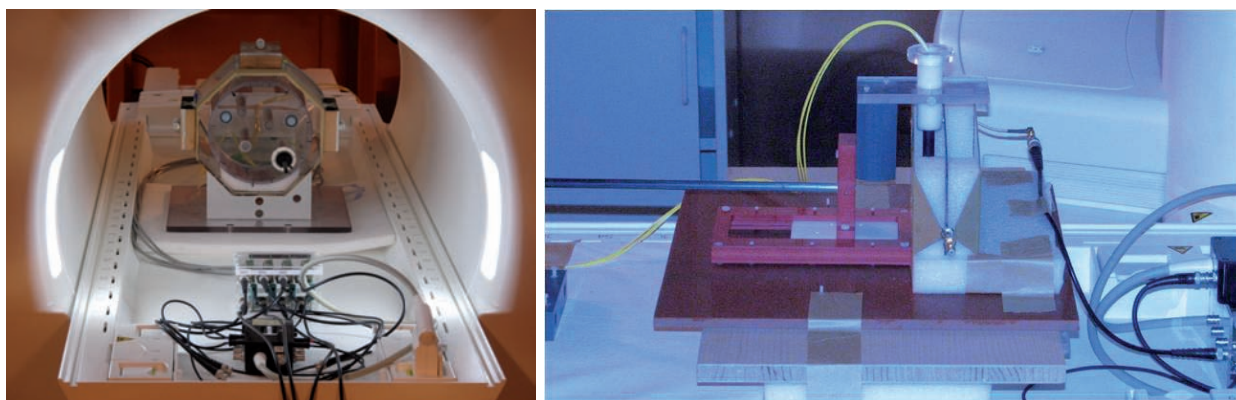


Bild 1: Links: Messung der hochfrequenten E-Felder, die von den starken Hochfrequenzpulsen während eines MRT-Scans in einem Prüfkörper erzeugt werden, mit einem elektrooptischen E-Feldsensor. Rechts: Aufbau zur rückführbaren Kalibrierung des E-Feldsensor in einer berechenbaren TEM-Zelle

logischen Standards entfernt ist. Seit 2008 arbeiten 8.1-Wissenschaftler an dem EU-Projekt „IMAGEN – reinforcement-related behaviour in normal brain function and psychopathology“ mit, in dem in acht europäischen Zentren insgesamt 2000 Jugendliche im MRT gescannt wurden und ab 2013 ein zweites Mal gemessen werden sollen. Aufgabe und Interesse der PTB bei diesem psychiatrischen Forschungsprojekt ist es, die Auswirkungen zu untersuchen, die der jeweilige Untersuchungsort mit seinen Mitarbeitern und dem verwendeten MRT unweigerlich auf die Ergebnisse hat (Bild 2). Wenn es gelänge, diesen Einfluss auf MRT-Bilder und daraus gewonnene neuro-anatomische und funktionelle Messgrößen zu quantifizieren und nachträglich zu korrigieren, könnte die statistische und damit wissenschaftliche Signifikanz der Daten erheblich gesteigert werden. Nutznießer wären nicht nur die Forschungspartner, sondern auch die Gesellschaft allgemein.

### Nicht-invasive funktionelle Bildgebung des Gehirns mittels nahinfraroter Lichtimpulse

Im Fachbereich 8.3 *Biomedizinische Optik* der PTB werden unter anderem neuartige optische Bildge-

bungsverfahren entwickelt, die für nicht-invasive In-vivo-Anwendungen zur Diagnose, für die Verlaufskontrolle sowie die Prognose neurologischer Erkrankungen eingesetzt werden können. In den letzten vier Jahren wurden diese Arbeiten in enger Zusammenarbeit mit 17 Partnern aus vier Ländern im Europäischen Verbundvorhaben nEUROPt mit Förderung aus dem 7. Rahmenprogramm durchgeführt. Die Besonderheit der im Projekt untersuchten Verfahren liegt in der Verwendung sehr kurzer (Pikosekunden-)Lichtimpulse in Kombination mit zeitaufgelösten Detektionsverfahren, um den Nutzen der diffus-optischen Bildgebung zu verbessern.

Neuroradiologische Bildgebungsverfahren haben ganz wesentlich zum Verständnis neurologischer Erkrankungen wie Schlaganfall, multipler Sklerose und Epilepsie beigetragen. Die Computer-Tomografie, Magnetresonanz-Bildgebung und Positron-Emissions-Tomografie stellen eine Vielzahl an anatomischen und physiologischen Informationen bereit, die in der klinischen Praxis eine unverzichtbare Hilfe bei der Diagnose und Therapiekontrolle darstellen. Dennoch gibt es während des sehr dynamischen Krankheitsverlaufs beim akuten Schlagan-

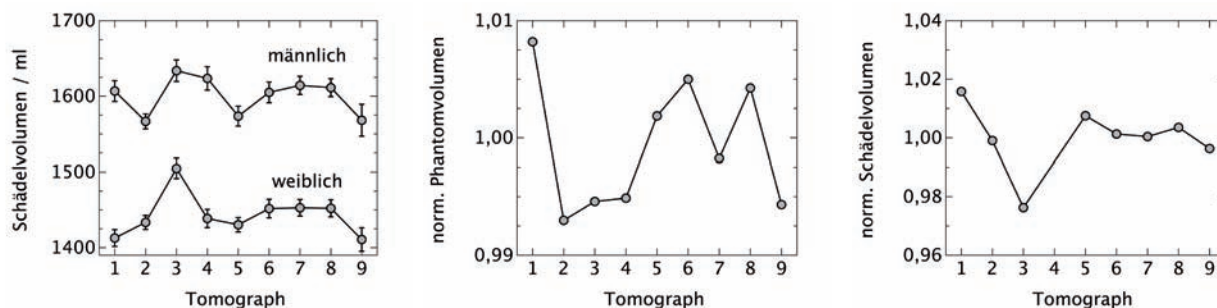


Bild 2: Aus MRT-Bildern abgeleitete Volumenmessungen für neun IMAGEN-Tomografen. Links: Die mittleren Schädelvolumina der lokalen Probanden-Kohorten schwanken stärker als statistisch erklärbar. Mitte: Bereits die Messungen an baugleichen Phantomen zeigen systematische, allerdings deutlich geringere Variationen. Rechts: mittleres Schädelvolumen von zwei Referenz-Probanden, die innerhalb weniger Wochen an allen Zentren gemessen wurden

fall oder bei Epilepsie derzeit kaum Möglichkeiten für eine (quasi-) kontinuierliche Überwachung und Bildgebung des Gehirns am Krankenbett. Selbst auf speziellen Neuro-Intensivstationen werden in der Regel lediglich systemische Parameter wie der Blutdruck oder der Herzschlag überwacht, nicht jedoch das Gehirn an sich.

Die Motivation für die hier vorgestellten Arbeiten bestand darin, verbesserte Methoden zu entwickeln, die eine kontinuierliche Überwachung und Darstellung insbesondere wichtiger hämodynamischer Parameter wie der zerebralen Sauerstoffsättigung und der Gewebepfusion am Krankenbett erlauben. Entscheidende Nachteile der bisher eingesetzten optischen Methoden sollten damit überwunden werden. Dazu zählen die vergleichsweise schlechte räumliche Auflösung, die schlechte Trennung von extra- und intrazerebralen Signalanteilen sowie eine unzureichende Möglichkeit zur Quantifizierung hämodynamischer Parameter. Hauptansatzpunkt für die angestrebten Verbesserungen waren substanzielle Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der diffusen optischen Spektroskopie und Bildgebung unter Einsatz kurzer Lichtimpulse und zeitaufgelöster Messverfahren. Durch die Messung und Analyse der Flugzeiten (Verweildauern) von Photonen im Gewebe können Aussagen über deren Eindringtiefe gewonnen und oberflächliche Signalanteile von solchen aus dem Kortex getrennt werden. Dadurch lassen sich auch Absorptions- und Streueigenschaften des Gewebes differenzieren, was sowohl eine verbesserte spektroskopische Analyse und quantitative Bestimmung der hämodynamischen Parameter erlaubt als auch zu einer verbesserten räumlichen Auflösung führen kann.

Als Beispiel für einen methodisch neuen Ansatz, der von der PTB in enger Zusammenarbeit mit dem Politecnico di Milano und der italienischen Firma Microphoton Devices S.r.l. im Rahmen des Projektes entwickelt und erprobt wurde, sei hier ein neues Raster-Bildgebungsverfahren vorgestellt. Dabei wird die zeitaufgelöste diffuse Reflexion von Gewebe kontaktlos gemessen und nicht mithilfe von optischen Fasern, wie sonst üblich. Bild 3 zeigt ein Schema der optischen Messanordnung. Der Abstand zwischen Einstrahl- und Detektionspunkt ist sehr klein (wenige Millimeter) im Vergleich zu dem üblicherweise bei funktionellen optischen Messungen verwendeten Abstand von einigen Zentimetern. Das damit verbundene Problem einer sehr hohen Anzahl „früher“ Photonen, die keine Information über Prozesse im Kortex enthalten, wurde mithilfe neuartiger Detektoren („Time-Gated Single

Photon Avalanche Diodes“) gelöst, mit denen im Wesentlichen nur die späten, nicht jedoch die frühen Photonen erfasst werden. Mit diesem Verfahren wird die räumliche Auflösung verbessert, und ein Gebiet von z. B.  $(4 \times 4) \text{ cm}^2$  kann mit dicht liegenden Messpunkten abgetastet werden. Damit lassen sich aktivierte Bereiche des Kortex sehr gut lokalisieren, wie erste In-vivo-Versuche gezeigt haben. Das Verfahren kann allerdings problemlos nur an haarlosen Gewebearealen (z. B. dem frontalen Kortex) eingesetzt werden. Andererseits sind auch andere Einsatzgebiete denkbar, z. B. die nicht-invasive Erfassung von Biomarkern wie Oxy- und Deoxyhämoglobin in Haut oder Muskeln.

Der diagnostische Wert der eingesetzten Verfahren wurde in klinischen Pilotstudien zu den neurologischen Krankheitsbildern Schlaganfall und Epilepsie untersucht und mit etablierten neurophysiologischen und Neuro-Bildgebungsmethoden verglichen. Die Perspektiven der klinischen Anwendung der zeitaufgelösten optischen Methoden wurden auf Basis dieser Studien von den beteiligten klinischen Gruppen positiv bewertet. Die Ergebnisse schaffen eine gute Ausgangslage für eine weitere Verbreitung und für eine potenzielle wirtschaftliche Verwertung dieser neuartigen Technik in Europa.

### Neuartige Biosignalmessungen

Seit über 30 Jahren werden in der PTB supraleitende Quanteninterferometer („Superconducting Quantum Interference Devices“, abgekürzt „SQUIDs“) für hochempfindliche Magnetfeldmessungen hergestellt. Mit einem Rauschniveau von bis unter  $1 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  gehören die im Fachbereich 7.2

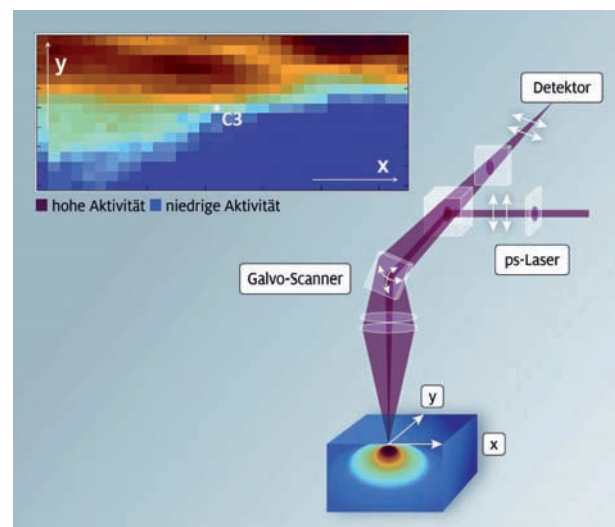


Bild 3: Schema zur kontaktlosen diffus-optischen Bildgebung und Hirnaktivitätskarte (©webersupiran.de)

entwickelten SQUIDs zu den empfindlichsten Magnetfeldsensoren weltweit. Der Fachbereich 8.2 *Biosignale* nutzt diese Sensoren für biomagnetische Messungen, die insbesondere für die Untersuchung der schwachen Magnetfelder eingesetzt werden, die die Nervenzellen des Gehirns oder des peripheren Nervensystems erzeugen.

SQUIDs müssen bei tiefen Temperaturen von wenigen Kelvin betrieben werden. Das erfordert den Einsatz von Kühlmedien, in der Regel von flüssigem Helium. Hier ist in den letzten Jahren ein Problem entstanden, da die Vorräte an Helium auf der Erde zur Neige gehen. Das ist für die Arbeit in der PTB nicht so gravierend, da hier schon seit Langem das verbrauchte Kühlmittel über Rückführungsanlagen zurückgewonnen wird. Für viele vorwiegend medizinisch ausgerichtete Anwender, die über derartige aufwendige Anlagen nicht verfügen, stellt sich jetzt aber das Problem, wie die Arbeit mit dem MEG bei den dramatisch ansteigenden Preisen für Helium weiter finanziert werden kann. Heute werden weltweit etwa 150 MEG-Geräte für Forschung und Diagnostik eingesetzt, von denen jedes einige hundert SQUIDs enthält. Ein Ausweg aus der notwendigen Kühlung mit dem knapper werdenden Helium könnte für diese Anwender die Nutzung von Magnetfeldsensoren sein, die ohne Kühlung arbeiten. Hier bieten sich insbesondere sogenannte optische Magnetometer an, deren Empfindlichkeit in den letzten Jahren enorm verbessert wurde.

Optische Magnetometer enthalten Gase von Alkaliatomen wie z. B. Rubidium, die einen ungepaarten Elektronenspin besitzen und resonantes, zirkular polarisiertes Licht absorbieren können. Indem der Photonen spin auf das Atom übertragen wird, wird in einem Gas von Alkaliatomen eine makroskopische Polarisation aufgebaut, bis kein weiteres Photon mehr absorbiert wird. In einem Magnetfeld ändern die ungepaarten Elektronenspins ihre Orientierung, sodass die Atome wieder Photonen mit Spins in Richtung des Laserstrahles absorbieren. Diese Änderung der Absorption ist ein hochempfindliches Maß für Magnetfelder.

Im National Institute of Standards and Technology (NIST) in Boulder, USA, ist es gelungen, diese Messtechnik zu miniaturisieren. In den Messzellen dieser Chip-Scale Atomic Magnetometer (CSAM) sind das Rubidiumgas sowie die für die Detektion erforderliche Mikrooptik in einem Volumen von etwa einem Kubikzentimeter untergebracht (Bild 4). Im magnetisch geschirmten Raum BMSR-2 wurden vom Fachbereich nun die messtechnischen Eigen-

schaften dieser Sensoren charakterisiert und insbesondere auf ihre Eignung für biomedizinische Anwendungen getestet.

Die Wissenschaftler von NIST und PTB hatten bereits 2010 einen Vorläufer des jetzigen CSAM für Magnetfeldmessung erfolgreich am menschlichen Herzen getestet. Diesmal wurden die CSAM-Sensoren in vier Millimeter Abstand vom Kopf gesunder Testpersonen in Position gebracht. Am Hinterkopf konnten bei wachen Personen sogenannte Alphawellen gemessen werden – ein Grundrhythmus der elektrischen Hirnaktivität, der sich spontan bei Entspannung einstellt. In einer weiteren Versuchsreihe konnte mit den CSAM-Sensoren sogar die Verarbeitung von Berührungsreizen im Gehirn durch das damit verbundene, sehr schwache Magnetfeld aufgezeichnet werden.

Zur Validierung der Messergebnisse wurden zu allen CSAM-Messungen parallel MEG-Aufzeichnungen mit SQUID-Sensoren durchgeführt. Bei diesen vergleichenden Untersuchungen zeigte sich, dass CSAM-Sensoren zwar noch ein erheblich höheres Rauschniveau als die besten SQUIDs aufweisen, dies aber zum Teil ausgeglichen wird durch die höhere Signalintensität. Das ist darauf zurückzuführen, dass SQUIDs nur im thermisch isolierenden Dewargefäßen betrieben werden können, sodass ihr Abstand zur Signalquelle immer einige Zentimeter beträgt, während CSAM-Sensoren direkt auf der Kopfhaut platziert werden können und somit einen wesentlich geringeren Abstand zur Signalquelle besitzen. Zudem bietet die hohe mechanische Flexibilität dieser Sensoren interessante neue Einsatzmöglichkeiten für die biomagnetische Messtechnik. So können CSAM-Sensoren beispielsweise parallel am

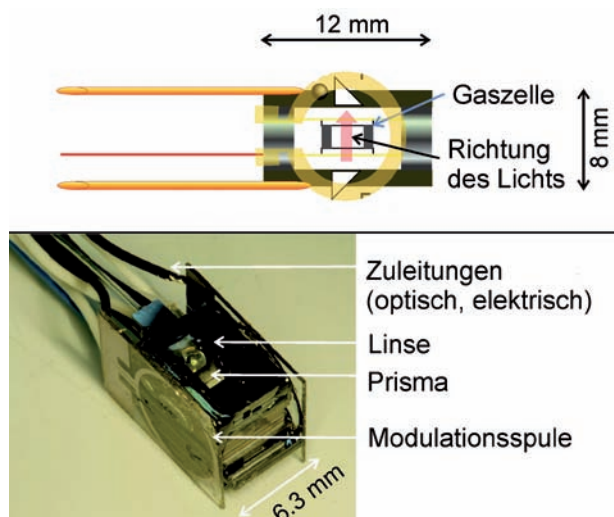


Bild 4: Schematische Darstellung und Abbildung eines CSAM-Sensors (©NIST/ OSA)

Kopf und an der Brustwand angebracht werden, um simultan Hirn- und Herzsignale aufzuzeichnen, was mit den an das Dewargefäß gebundenen SQUIDs nicht möglich ist.

### **Neue mathematische und statistische Methoden für die Berechnung von Messunsicherheiten**

Messungen können nur dann aussagekräftig miteinander oder mit Referenzwerten verglichen werden, wenn man weiß, wie gesichert der jeweilige Messwert ist, d. h. wenn man seine Unsicherheit kennt. Dies betrifft nicht nur die Streuung von Werten, wenn Messungen mehrfach durchgeführt werden, sondern auch systematische Einflüsse. Jeder Schritt in der Kalibrierkette vom Primärstandard zum Messgerät eines industriellen Endnutzers ist mit einer Fortpflanzung der Messunsicherheit verbunden. Eine unzuverlässige Unsicherheitsabschätzung hat daher unmittelbare negative wirtschaftliche Folgen. So haben etwa Untersuchungen ergeben, dass eine Überschätzung des Wassergehalts in Rohöl von 0,5 % in einer Nordsee-Pipeline allein zu einem jährlichen Verlust von 2,7 Mio. € führen kann. Verbesserungen in der Genauigkeit von Cholesterin-Messungen seit 1968 haben in den USA zu einer Reduzierung falscher negativer Ergebnisse von 23,7 % auf 3 % geführt, woraus eine Kostenersparnis von rund 100 Mio. \$ pro Jahr im Gesundheitsbereich resultierte.

Neue mathematische und statistische Ansätze werden benötigt, um Unsicherheitsabschätzungen in einer Vielzahl moderner metrologischer Anwendungen wie biochemischen Messungen und Nanometrologie vornehmen zu können. Der Fachbereich *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* der PTB koordiniert daher ein europäisches Projekt mit 9 weiteren Metrologieinstituten und einem Industriepartner unter dem Titel „NEW04 – Novel mathematical and statistical approaches to uncertainty evaluation“, das von 2012 bis 2015 dauern und im Rahmen des Europäischen Metrologieforschungsprogramms gefördert wird.

Das Konsortium wird neue verbesserte Methoden zur Unsicherheitsabschätzung bei inversen und Regressionsproblemen sowie Verfahren zur Behandlung von Anwendungen mit computeraufwendigen Messmodellen entwickeln. Darüber hinaus sollen Methoden zur Konformitätsbewertung auf der Grundlage von Messunsicherheiten weiterentwickelt werden. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse sollen in „Guidelines“ zusammengefasst werden,

die später unter anderem Eingang in den Leitfaden für die Bestimmung der Messunsicherheit (GUM) finden sollen. Kernziele in methodischer Hinsicht sind die Entwicklung eines Bayes-Verfahren zur Bestimmung von Unsicherheiten in Regressionsproblemen, das die Einbeziehung von Vorwissen erlaubt, sowie die Anpassung von schnellen Samplingmethoden und Surrogatmodellierung in metrologische Anwendungen.

Bereits im Projekt werden die neuen Methoden auf eine Reihe von Anwendungsbereichen angewendet werden, für die ein dringender Bedarf an neuen Verfahren zur Unsicherheitsbestimmung besteht. Hierzu gehören aus dem Bereich der metrologischen Forschung neue analytische Technologien für die Biochemie und Biotechnologie (ELISA, PCR), Transportprozesse (thermophysikalische Eigenschaften von Materialien, Durchflussmessungen) sowie die Scatterometrie als Werkzeug der Nanometrologie. Weiterhin sollen auch praktische Fragestellungen z. B. zur Kalibrierung, sowie zum Brandschutz oder auch Konformitätsprüfungen von Gesundheitsprodukten betrachtet, und Softwarelösungen sowie Weiterbildungsseminare für Metrologen in öffentlichem Dienst und Industrie entwickelt werden. Einen Überblick über die Struktur des Projektes sowie die zu behandelnden Anwendungen gibt Bild 5.

Das neue EMRP-Projekt soll auch die Grundlage zur Schaffung eines virtuellen „European Centre for Mathematics and Statistics in Metrology“ sein, das nicht nur die wachsende europäische Zusammenarbeit der mathematischen Experten der europäischen Metrologieinstitute institutionalisieren soll, sondern vor allem auch das vorhandene und im Laufe des Projektes neu zu entwickelnde „Know-how“ der europäischen Industrie und europäischen und internationalen Organisationen, z. B. auf dem Gebiet der Normung und Standardisierung, zur Verfügung stellen wird.

### **Informationstechnische Expertise für den Verbraucherschutz im Messwesen**

Im Fachbereich 8.5 *Metrologische Informationstechnik* ist auf die zunehmende informationstechnische Durchdringung von Messsystemen mit einer entsprechenden Konzentration der Kräfte reagiert worden. So ist das Potenzial für die Softwareprüfung und -beratung bei gesetzlich geregelten Messsystemen nun in einer eigenen Arbeitsgruppe *Metrologische Software* gebündelt worden. Diese Gruppe besitzt in Breite und Tiefe eine anerkannte Prüf-, Be-

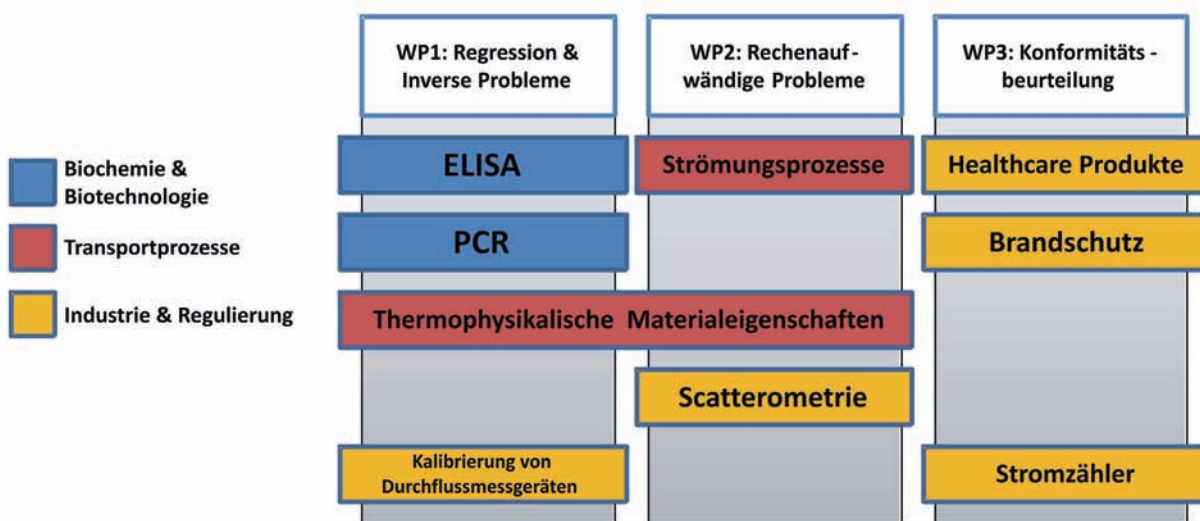
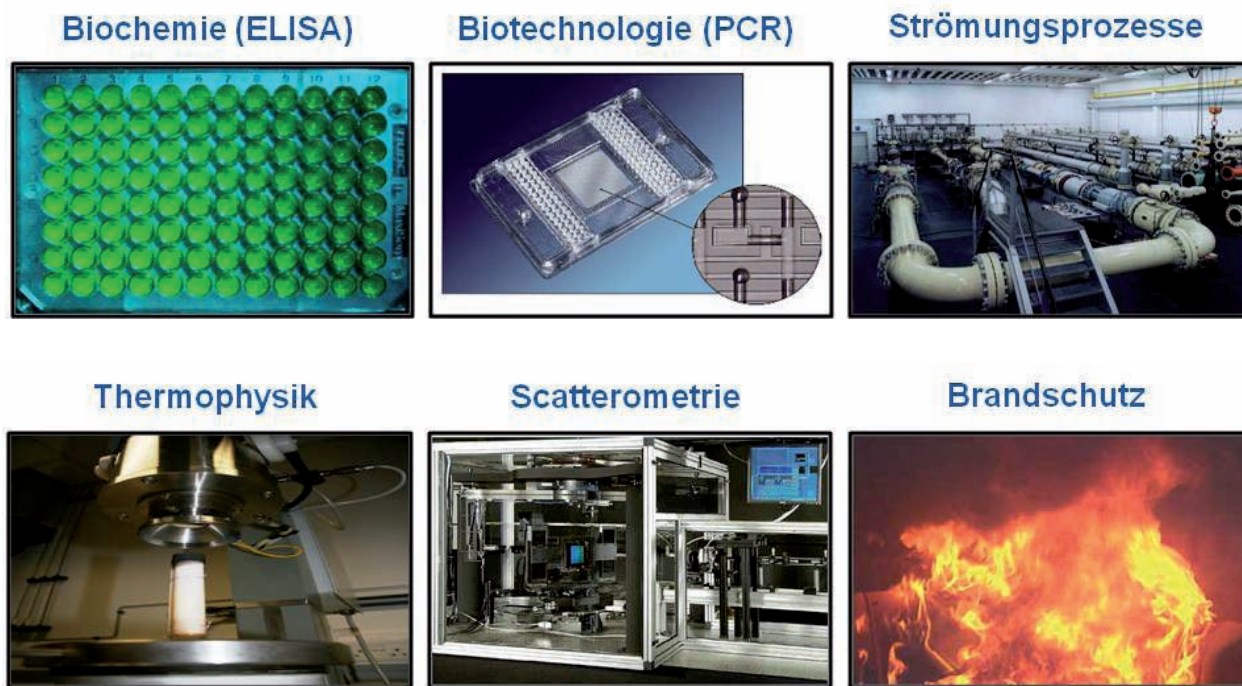


Bild 5: Arbeitspakete, Methoden und Anwendungen, die im EMRP-Projekt NEW04 von 2012–2015 behandelt werden

ratungs- und Begutachtungskapazität mit ausgewiesener Expertise in den Bereichen der Informationstechnik, des Messwesens und ihres regulatorischen Überbaus. Die Konzentration betrifft auch die in der Arbeitsgruppe *Datenkommunikation und -sicherheit* durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die auf die Sicherung von Messdaten bei Anwendung neuer Technologien im Messwesen oder bei der Verwendung von Messdaten ausgerichtet sind.

Softwareprüfungen werden inzwischen gemäß dem auf europäischer Ebene eingeführten und maßgeb-

lich vom Fachbereich *Metrologische Informationstechnik* begründeten System der Risikoklassen differenziert. Dieses System hilft nun entscheidend, die Expertise des Fachbereiches wirksam einzusetzen, indem Prüfungen mit eher geringeren Anforderungen dezentral und Prüfungen mit hohen Ansprüchen an die IT-Expertise zentral im Fachbereich bearbeitet werden.

Herausforderungen moderner Messsysteme sind die immer stärkere Verbreitung von eingebetteten Betriebssystemen, die Verwendung kryptografischer Datensicherungsverfahren und die angestrebte Flexibilität der Software. Zur metrologischen Bewertung solcher Komponenten sind Hilfsmittel und Vorgehensweisen entwickelt worden. Die hohe

Dynamik dieses Bereiches fordert ständige Weiterentwicklungen der Verfahren zur Gewährleistung der Messsicherheit, Messbeständigkeit und Prüfbarkeit der metrologischen Systeme. Neue Herausforderungen entstehen z. B. durch die Einführung des Cloud-Computing oder durch neue Betriebsystemphilosophien.

Neben den Prüfungen wird die spezielle Expertise des Fachbereiches auch von externen Stellen nachgefragt. Ein ständiger, wichtiger Adressat der Beratungsleistungen auf nationaler Ebene sind die Eichbehörden, im Jahr 2012 auch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Zusammenhang mit der Novellierung des Mess- und Eichgesetzes und des Energiewirtschaftsrechts.

Seit 2011 erfolgt eine intensive fachliche Begleitung der im Bundesamt für die Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) entstehenden Sicherheitskonzepte für Smart Meter Gateways. Es geht dabei um die Zusammenführung der metrologischen Anforderungen mit den Anforderungen zum Datenschutz und zur Sicherung der Energieinfrastruktur. Der vom BSI im Jahre 2012 herausgegebene Entwurf einer Technischen Richtlinie ist auch das Resultat der Abstimmungen mit der PTB. Die Richtlinie ergänzt das bereits im Vorjahr entwickelte und mit der PTB abgestimmte Schutzprofil für Smart Meter Gateways.

Auf europäischer und internationaler Ebene steuert und bereichert der Fachbereich maßgeblich die Abstimmungsthemen. Das findet darin seinen Ausdruck, dass sowohl bei der WELMEC als auch bei der OIML die Leitung der entsprechenden Fachgruppen bei der PTB liegt. Darüber hinaus erfolgt

eine Mitarbeit bei nationalen und europäischen Normungs- bzw. Normungssteuerungsgremien.

Ein Schwerpunkt bei den F&E-Vorhaben ist das zunächst bis 2012 vom BMWi geförderte Vorhaben zum On-Board-Metering (OBM). Beim OBM-Vorhaben geht es um eine innovative Systemlösung für Elektrofahrzeuge mit mobiler Messtechnik, die in die wachsende E-Mobility-Landschaft Deutschlands integriert werden soll. Im Unterschied zu stationär messenden Ladesäulen wird die Messtechnik beim OBM-Vorhaben in das Fahrzeug integriert. Dabei sind besondere eichrechtliche Anforderungen sowie Anforderungen an Datenschutz und Datensicherheit zu erfüllen. Damit verbunden sind Fragen der korrekten Energieabrechnung und der metrologischen Überwachung dieser Zählerverwendung. Bisher konnte mit Prototypen ein Funktionsnachweis für den neuen Ansatz geführt werden (Bild 6).

Die Förderung wurde bis 2014 verlängert. In dieser Phase wird nun ein breit angelegter Feldtest durchgeführt, und es werden Verfahren zur metrologischen Überwachung der On-Board-Systeme entwickelt und erprobt. Die zur Sicherung der Messdaten eingesetzten digitalen Signaturen sollen auf Zertifikate einer Public-Key-Infrastruktur zurückgeführt werden.

Während beim On-Board-Metering die Technologie noch in der Entwicklung und Erprobung ist, konnte im Jahre 2012 das System zur Sicherung messwertverarbeitender Kassensysteme (INSIKA), das in den Jahren davor unter Führung des Fachbereiches entstanden ist, in Hamburg in den praktischen Betrieb überführt werden. Die dafür benötigten INSIKA-



Bild 6: Der Leiter des OBM-Projekts, Dr. Norbert Zisky, erläutert dem Abteilungsleiter des BMWi, Dr. Halldorn (rechts), und dem Mitglied des Präsidiums der PTB, Dr. Stenger (Mitte), die Abrechnung der mobil gemessenen Verbrauchsdaten.



Bild 7: INSIKA-Smartcards für die Benutzung in Taxis

Smartcards (Bild 7) werden von der Bundesdruckerei GmbH in Berlin produziert und vertrieben.

Einen weiteren Forschungsschwerpunkt im Fachbereich stellt das EMRP-Vorhaben „Metrology for Smart Electrical Grids“ dar, in dem die Thematik der Netzzustandsüberwachung für Niederspannungsnetze als Voraussetzung für eine stabile Energieversorgung im Mittelpunkt steht. Es wurden Lösungsansätze zur Bestimmung von Netzzuständen entwickelt, die eine bessere Netzsteuerung ermöglichen können. Es werden in diesem Ansatz auch Photovoltaik-Anlagen, Elektromobile oder regelbare Ortsnetztrafos berücksichtigt. Mit intelligenten Ladestrategien sollen die Elektro-Fahrzeuge als Pufferspeicher für überschüssige Energie in die Netze eingebunden werden. Zum Erreichen der Sicherheitsziele werden eine angepasste Sicherheitsarchitektur konzipiert und geeignete Kommunikationskomponenten mit spezieller Sicherheitstechnik entwickelt. Diese werden in der begonnenen letzten Phase des Vorhabens in Versuchsnetzwerke implementiert und validiert. Die Ergebnisse der Arbeiten fließen in die europäischen Normungsvorhaben von CEN/CENELEC und ETSI (Mandat M/441 und M/490 der EU-Kommission) ein.

Zum Aufgabenbereich des Fachbereiches gehört auch die Zulassung von Geldspielgeräten. Dieser Tätigkeitsbereich weitet sich aus. Er stellt bei der Prüftätigkeit ähnliche Anforderungen an die Expertise wie bei Prüfungen im gesetzlichen Messwesen. Beide Bereiche profitieren von der Nähe zueinander, da sich bei informationstechnischen Kernthemen ähnliche Fragen stellen.



## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Vergleichsstudie zur spektralen Korrektur von Spektrometern durchgeführt

Eine „State-of-the-art“-Vergleichbarkeitsstudie korrigierter Emissionsspektren wurde durch vier nationale Metrologieinstitute (NMI) durchgeführt. Dabei wurden physikalische Transfer-Standards (PTS) und Kalibrierverfahren mit Referenzmaterialien (RM) – eingesetzt. Die Emissionsspektren von drei Test-Farbstoffen wurden in dem Wellenlängenbereich von 300 nm bis 770 nm korrigiert und mit den beiden Kalibrierverfahren überprüft. Für spektrofluorometrische und kolorimetrische Messgeometrien konnte eine hohe Übereinstimmung der korrigierten Emissionsspektren erreicht werden. Ein wesentliches Ergebnis dieser Studie ist die ebenfalls hohe Übereinstimmung bei RM-gestützten Kalibrierverfahren, deren Einsatz einen deutlich geringeren Zeitaufwand erfordert. (B. Ebert, FB 8.3, [bernd.ebert@ptb.de](mailto:bernd.ebert@ptb.de))

#### Methode zur Erweiterung des GUM auf kontinuierliche Messungen

In einer in diesem Jahr abgeschlossenen Promotion wurde eine konsistente Erweiterung des Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) auf kontinuierliche Messungen entwickelt. Die neue Methodik basiert auf stochastischen Prozessen als Modell der unsicheren Kenntnis einer kontinuierlichen Funktion. Es wurde gezeigt, dass diese Erweiterung natürlicherweise konsistent zu den bisherigen Richtlinien des GUM für diskrete Messungen ist. Damit konnte erstmals eine vollständig rückführbare Auswertung von dynamischen Messungen entwickelt werden. (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))

#### EMRP-Projekt zur Entwicklung metrologischer Verfahren für den Nachweis von Infektionskrankheiten gestartet

Bei der Diagnostik von Infektionserkrankungen wird zunehmend die Polymerase-Ketten-Reaktion (PCR) eingesetzt, mit der die jeweiligen Erreger spezifisch über ihre DNA nachgewiesen werden können. Die Quantifizierung der Konzentrationen von Viren oder Bakterien in Körperflüssigkeiten mit den verschiedenen PCR-Methoden (Digitale PCR, Real-Time PCR, isotherme PCR) ist jedoch äußerst schwierig, sodass derzeit bei nationalen Ringversu-

chen als Bewertungsgrenzen  $\pm 0,5$  Dekaden zugelassen werden müssen. Der Unterschied von einem Faktor 10 zwischen den niedrigsten und höchsten akzeptablen Konzentrationswerten ist für die effiziente Unterstützung der medizinischen Diagnostik nicht zufriedenstellend. In dem EMRP-Projekt „Metrology for monitoring infectious diseases, antimicrobial resistance, and harmful micro-organisms“ sollen Verfahren und Messtechniken entwickelt und erprobt werden, mit denen die Messunsicherheit deutlich reduziert werden können. (A. Kummrow, FB 8.3, [andreas.kummrow@ptb.de](mailto:andreas.kummrow@ptb.de); J. Neukammer, FB 8.3, [joerg.neukammer@ptb.de](mailto:joerg.neukammer@ptb.de))

#### Entwicklung eines primäres Referenzmessverfahrens zur Messung der Hämoglobinkonzentration in Blut im Rahmen des EMRP-Projekts „Metalomics“

Als Teilaufgabe im Projekt „Metrology for Metaloproteins“, koordiniert von der PTB (FB 3.1), soll ein primäres Referenzmessverfahren zur Bestimmung der totalen Hämoglobinkonzentration im Blut entwickelt und validiert werden. Das Verfahren beruht auf der Umwandlung aller Hämoglobinvarianten durch die AHD-Methode (Alkalisches Hämatin und Detergenz) und nachfolgende spektrofotometrische Extinktionmessung. Das Verfahren wird zunächst mit dem derzeit etablierten Referenzmessverfahren, der HiCN-Methode, verglichen werden. Daneben wird die Eignung des Chlorhäm in als Kalibrator untersucht, und es werden Störgrößen wie z. B. die Untergrundabsorption durch Bilirubin charakterisiert. (K. Witt, FB 8.3, [klaus.witt@ptb.de](mailto:klaus.witt@ptb.de); A. Kummrow, FB 8.3, [andreas.kummrow@ptb.de](mailto:andreas.kummrow@ptb.de); J. Neukammer, FB 8.3, [joerg.neukammer@ptb.de](mailto:joerg.neukammer@ptb.de))

#### 100 Stunden $T_2$ -Zeit in $^3\text{He}$ -Präzessionsexperimenten

Im magnetischen Abschirmraum BMSR2 der PTB ist es gelungen, die Präzession der Kernspins von  $^3\text{He}$  mit einer extrem langen Abklingkonstanten  $T_2 > 100$  h zu messen. Dieser Wert wurde in einem sehr homogenen Haltefeld erreicht, das mit 400 nT hundertmal kleiner als das Magnetfeld der Erde war. Eine gleichzeitige Messung der  $^3\text{He}$ - und  $^{129}\text{Xe}$ -Spinpräzession konnte erstmals länger als 24 Stunden aufgezeichnet werden, wodurch es möglich ist, die Frequenz beider Präzessionen sehr genau zu bestimmen. Diese Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz und der Universität Heidelberg durchgeführt. (S. Knap-

pe-Grüneberg, FB 8.2, silvia.knappe-grueneberg@ptb.de; W. Kilian, FB 8.1, wolfgang.kilian@ptb.de)

## **Messtechnische Erfassung des Netzzustands verteilter Energiesysteme**

Der Wandel in Energienetzen, insbesondere durch eine größere Anzahl dezentraler Einspeiser, erfordert die Entwicklung neuartiger Lösungsansätze für die Messung und Steuerung. Im Vorhaben „Metrology for Smart Electrical Grid“ des Europäischen Metrologieforschungsprogramms (EMRP) wurden Ansätze zur Zustandsschätzung auf der Grundlage unvollständiger Messungen entwickelt. Ein weiterer Aspekt des Vorhabens sind IT-Sicherheitsmechanismen zum Schutz verteilter Energiemesssysteme. Arbeitsergebnisse sind in den Leitfaden der Smart Grid Information Security Gruppe von CEN/CENELE/ETSI unter dem Mandat M/490 zur IT-Sicherheit von Energienetzen eingeflossen. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)

## **Erprobung von Referenzmessverfahren zur Zellzählung für die Bestimmung der Konzentrationen von immunologisch markierten Zellen**

Im Rahmen eines vom BMWi geförderten Projektes zur Standardisierung von Verfahren zur (Relativ-) Bestimmung von Zellkonzentrationen in Körperflüssigkeiten wird ein in der PTB entwickeltes Durchflusszytometer beim Kooperationspartner, der Deutschen Vereinten Gesellschaft für Klinische Chemie und Laboratoriumsmedizin (DGKL) im Klinikum Karlsruhe, erprobt. Dabei werden die Targetzellen-Konzentrationen durch eine direkte Volumenmessung bestimmt und auch Relativmessungen bezüglich eines Kalibrators mit bestimmter Partikelkonzentration vorgenommen. Ziel ist die Bestimmung der Konzentrationen von CD4-positiven (T-Helfer-) Zellen im Blut und von CD34-positiven (Stammzellen) in Apheresaten mit größtmöglicher Genauigkeit, um die Therapie und Verlaufskontrolle zu optimieren. (M. Kammel, FB 8.3, martin.kammel@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

## **Modellierung und Bewertung systematischer Fehler in der Scatterometrie**

Systematische Fehler tragen in vielen Anwendungen zu einem erheblichen Teil zur Messunsicherheit bei. Ihre Berücksichtigung erhöht die Modellkomplexität und damit die Rechenzeit, die für die Auswertung scatterometrischer Messungen benötigt wird. Für EUV-Messungen konnte mit Hilfe des Akaike-Informationskriteriums gezeigt werden, dass nur durch die gleichzeitige Modellierung von Linienrauigkeiten und von Fehlern in der Substratstruktur

Photomasken eine deutliche Verbesserung für die Rekonstruktion kritischer Dimensionen von Photomasken erreicht werden kann. (M. A. Henn, FB 8.4, mark-alexander.henn@ptb.de; H. Groß, FB 8.4, hermann.gross@ptb.de, M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

## **Neues statistisches Auswerteverfahren für die Magnetfeldfluktuationsthermometrie**

Für die im Temperaturbereich unter 1 K verwendeten Magnetfeldfluktuationsthermometer wurde ein verbessertes Auswerteverfahren entwickelt. Das Verfahren beruht auf dem Prinzip der Bayes'schen Inferenz, wobei die numerische Berechnung mittels der Markov-Chain-Monte-Carlo-Methode erfolgt. Das neue Verfahren ermöglicht erstmals eine zuverlässige Bestimmung der Messunsicherheiten für die Magnetfeldfluktuationsthermometrie unter Einbeziehung aller relevanten Einflussfaktoren. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de; F. Schmähling, FB 8.4, franko.schmaehling@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

## **Kompaktes Vektormagnetometer**

Viele physikalische Grundlagenexperimente, wie z. B. die Suche nach dem elektrischen Dipolmoment des Neutrons am Paul Scherrer Institut (PSI), stellen hohe Anforderungen an die Abschirmung externer Magnetfelder. Zur vektoriellen Vermessung der magnetischen Eigenschaften der Abschirmung, wie z. B. Restfelder, Driften, Eigenrauschen und Störungsdämpfung, wurde ein kompaktes, SQUID-basiertes Messsystem entwickelt. Das System weist bei einer Bandbreite von nahe DC bis 10 kHz eine Feldauflösung im fT-Bereich auf. (J. Voigt, FB 8.2, jens.voigt@ptb.de)

## **Die multivariante Normalverteilung – Sensitivität der Bayes'schen Mittelwertschätzung**

Die Bestimmung einer A-Priori-Verteilung ist entscheidend in Bayes'schen Analysen. Die Bestimmung nicht-informativer Priors ist jedoch nicht eindeutig, zum Beispiel wenn bei unbekannter Korrelation der Erwartungswert multivariater Gaussverteilungen geschätzt werden soll. Weil dies ein Standardproblem ist (z. B. in der Metrologie bei der Anwendung von GUM S2), haben wir eine Reihe sinnvoller nicht-informativer Priors untersucht. In Abhängigkeit von der Wahl des Priors variiert die Unsicherheit der Schätzung des Mittelwertes erheblich für kleine und mittlere große Samples. (K. Klauenberg, FB 8.4, katy.klauenberg@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Statistische Analyse von Messungen der Planck-Konstanten**

Zur Festlegung eines Zahlenwerts für die Planck-Konstante werden entsprechende Messungen verschiedener Metrologieinstitute verwendet. Die betrachteten Messungen sind allerdings im Rahmen der angegebenen Messunsicherheiten inkonsistent und werden durch CODATA üblicherweise mittels der „Birge ratio“-Methode kombiniert. Gemeinsam mit Statistikern des NIST wurde die statistische Grundlage dieses Verfahren kritisch hinterfragt und eine alternative Methode vorgeschlagen. Das neugewonnene Ergebnis für die Planck-Konstante unterscheidet sich vor allem in der Messunsicherheit, die nun deutlich größer – und wohl auch realistischer – bestimmt wird. (C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de; J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Großgerät zum „Magnetic Particle Imaging“ (MPI) bewilligt**

Im Rahmen einer Großgeräteinitiative hatte die DFG für das Jahr 2012 die Förderung eines präklinischen MPI-Scanners ausgeschrieben. MPI ist ein neuartiges Verfahren, das mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung und hoher Empfindlichkeit magnetische Nanopartikel als Tracer im lebenden Organismus nachweist. Die Charité hat sich zusammen mit der PTB um diese Förderung beworben und als eines von zwei Zentren den Zuschlag erhalten. Der MPI-Scanner wird voraussichtlich Anfang 2014 in Betrieb gehen und von der PTB schwerpunktmäßig für methodische Studien zur Messtechnik eingesetzt werden. (L. Trahms, FB 8.2, lutz.trahms@ptb.de)

#### **Entwicklung neuer Sensoren für die durchflusszytometrische Zellzählung**

Zur Differenzierung und Zählung von Blutzellen wird üblicherweise entweder die Änderung der Leitfähigkeit beim Durchtritt einzelner Zellen durch eine Messöffnung gemessen oder die Lichtstreuung sowie die Fluoreszenz immunologisch markierter Zellen registriert. Um die Zelldifferenzierung zu verbessern und insbesondere seltene Zellen sicher identifizieren zu können, wurde mit der Entwicklung von durchflusszytometrischen Messzellen begonnen, mit denen für jede Zelle die Leitfähigkeit bei Gleich- und Hochfrequenzspannungen, die Lichtstreuung und die Fluoreszenz mit hoher Empfindlichkeit gemessen werden kann. Die neuen Sensoren sollen für Referenz-Durchflusszytometer eingesetzt und im Rahmen eines MNPQ-Projektes mit der Partec GMBH für die Verwendung in kommer-

ziellen Instrumenten optimiert werden. (P. Simon, FB 8.3, peter.simon@ptb.de; M. Frankowski, FB 8.3, marcin.frankowski@ptb.de; R. Häfner, Technischer Gerätebau, robert.haefner@ptb.de; A. Kuhn, Technischer Gerätebau, axel.kuhn@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

#### **Laden von Elektrofahrzeugen an einfachen Ladesteckdosen**

Mit der Inbetriebnahme einer neuartigen Prototyp-Ladesteckdose für Elektrofahrzeuge in der PTB wurde beim Projekt „On-Board Metering“ ein wichtiger Meilenstein erreicht. Damit und mit der Integration von mobiler Messtechnik in Versuchsfahrzeuge wurde die erste Etappe des vom BMWi geförderten Projektes, in dem die PTB mit Kooperationspartnern der Industrie zusammenarbeitet, abgeschlossen. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de; J. Weil, FB 8.5, jan.weil@ptb.de)

#### **Schnelle Verfahren für die Auswertung scatterometrischer Messungen**

Für die Auswertung scatterometrischer Messungen werden mathematische Modelle verwendet, deren numerische Lösung sehr zeitintensiv ist. Zur Beschleunigung des Auswerteverfahrens und Anwendung statistischer Verfahren zur Bestimmung von Messunsicherheiten wurde die sogenannte Polynomchaos-Methode („Polynomial Chaos“) als Approximation für Finite-Elemente-Berechnungen entwickelt und validiert. Es konnte eine Beschleunigung von etwa zwei Größenordnungen erreicht werden. (S. Heidenreich, FB 8.4, sebastian.heidenreich@ptb.de, H. Groß, FB 8.4, herrmann.gross@ptb.de, M. A. Henn, FB 8.4, mark-alexander.henn@ptb.de)

#### **Simulation des Druck- und Temperaturabfalls bei schneller dynamischer Gasexpansion**

Im Rahmen des EMRP-Projektes IND12 „Vacuum metrology for production environments“ konnten durch numerische Simulationen für verschiedene Geometrien die Druck-, Temperatur- und Strömungsverhältnisse zur Entwicklung eines dynamischen Vakuumkalibriersystems beschrieben werden. Dabei zeigte sich, dass der Druck und die Temperatur in der kleineren Messkammer nahezu homogen abfallen und die Strömung laminar verläuft. Im Verbindungsrohr zur großen Vakuumkammer hingegen treten in bestimmten Bereichen starke Turbulenzen bei hohen Geschwindigkeiten und niedrigen Temperaturen auf. Insbesondere wurde das dynamische Abklingverhalten des Druckes bis zum Druckausgleich angegeben. (R. Model, FB 8.4, regine.model@ptb.de; S. Schmelter,

FB 8.4, sonja.schmelter@ptb.de; K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)

## **Modellierung von Mischprozessen in Rußmessstrecken**

Die Verdünnungsstufe, ein im experimentellen Aufbau von Rußmessstrecken wesentliches Bauelement zur Vorkonditionierung des Aerosolstromes, wurde bezüglich ihrer Mischungsfähigkeit systematisch auf der Basis numerischer Simulationen untersucht. Durch Auswertung charakteristischer Strömungsprofile einer großen Anzahl virtueller Testszenarien konnten der Einfluss des Anstellwinkels für die Rohrverbindungen sowie die Wirkung einer kugelförmigen Mischkammer quantitativ bestimmt werden. (G. Lindner, FB 8.4, gert.lindner@ptb.de; R. Model, FB 8.4, regine.model@ptb.de, M. Bär, markus.baer@ptb.de, FB 8.4)

## **Virtuelle Experimente für das Tilted-Wave-Interferometer (TWI)**

Im Rahmen des ERMP-Projektes IND10 wird ein neues Interferometerprinzip (TWI) in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart und den Kooperationspartnern der Industrie untersucht. Für die komplexe Messdatenauswertung des TWIs wurde ein mathematisches Verfahren entwickelt. Dazu wurde die in der PTB erstellte Simulationsumgebung zur Durchführung virtueller Experimente um das Raytracing komplexer optischer Systeme erweitert, damit sie für Sensitivitätsanalysen angewendet werden kann. Als Ergebnis liegt nun ein Werkzeug vor, mit dem die Genauigkeit derartiger Verfahren auf Basis virtueller Experimente untersucht werden kann. (I. Fortmeier, FB 8.4, ines.fortmeier@ptb.de; M. Stavridis, FB 8.4, manuel.stavridis@ptb.de)

## **Neuer EEG-Verstärker misst bisher nicht zugängliche Hirnsignale**

Über lange Zeit wurde davon ausgegangen, dass der Frequenzbereich oberhalb von 1 kHz für das an der Kopfhaut abgeleitete Elektroenzephalogramm (EEG) irrelevant ist. Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Verbundprojekts (Bernstein Fokus Neurotechnologie) wurde ein EEG-Verstärker entwickelt, der auch im Bereich oberhalb von 1 kHz ein niedriges Rauschen aufweist. In Zusammenarbeit mit der Charité wurden erste Messungen mit diesem neuen Verstärker durchgeführt. Sie zeigen nach somatosensorischer Stimulation am Handgelenk neben den bekannten niederfrequenten Anteilen auch Frequenzanteile oberhalb 1 kHz, die bereits aus invasiven Messungen am Gehirn bekannt waren. Damit ist erstmals nicht-invasiv der Nachweis dieser „hoch-frequenten“ Frequenzanteile im

Oberflächen-EEG gelungen. (H.-J. Scheer, FB 8.2, hans-juergen.scheer@ptb.de)

## **Realistische Validierung von Methoden zur Sinuskalibrierung**

Eine dynamische Kalibrierung basiert häufig auf sinusartiger Anregung des Aufnehmers, welche für lineare Systeme zu einer sinusartigen Antwort führt. Die Charakterisierung des Aufnehmers erfolgt dann über die Bestimmung von Amplitude und Phase der erhaltenen Zeitreihen. In der Arbeitsgruppe wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, welche es erlaubt, Signale zu generieren, wie sie realistischerweise in solchen Kalibrierungsmessungen auftreten. Das bedeutet, die zufälligen Störungen in den simulierten Daten stimmen mit denen aus Messdaten nahezu überein. Dies ermöglicht erstmals einen realistischen Vergleich von verschiedenen Methoden zur Bestimmung von Amplitude und Phase und ihrer Unsicherheiten. (B. Arendackä, FB 8.4, barbara.arendacka@ptb.de, S. Eichstädt, FB 8.4, sascha.eichstaedt@ptb.de)

## **Simultane Streulicht- und Bandpasskorrektur für Array-Spektroradiometer**

Array-Spektroradiometer ermöglichen eine schnelle und kostengünstige Bestimmung spektraler Messgrößen. Hierfür wurde ein neues Verfahren entwickelt, mit dem die bei Messungen mit diesen Geräten häufig auftretenden Störungen durch Streulicht- und Bandpasseffekte unterdrückt werden können. Das Verfahren beruht auf der Invertierung der Gerätematrix unter Verwendung der Tikhonov-Regularisierung. Hierdurch wird erstmals eine simultane Korrektur beider Störeinflüsse bei Spektroradiometermessungen möglich. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de, C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

## **Nachweissichere Aufzeichnung von Kassendaten**

Im Februar 2012 wurde das MNPQ-Projekt „INSIKA“ (Integrierte Sicherheitslösung für messwertverarbeitende Kassensysteme) erfolgreich abgeschlossen. Ein wesentliches Ergebnis ist die praxiserprobte Signaturerstellungseinheit (INSIKA-Smartcard). Ein typisches Einsatzgebiet ist das Umfeld von Taxis. Das Land Hamburg fördert seit Anfang 2012 den flächendeckenden Einsatz dieser Technik für Taxis. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)

## **Technische Richtlinie für das Smart Meter Gateway**

Das Bundesamt für die Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) hat den Entwurf einer Technischen Richtlinie herausgegeben, in der funktionelle An-

forderungen an das Smart Meter Gateway aufgestellt werden. Daran war die PTB durch intensive Abstimmungen beteiligt. Die Richtlinie ergänzt das bereits im Vorjahr entwickelte und mit der PTB abgestimmte Schutzprofil für Smart Meter Gateways. Das Ziel der Abstimmung war die Zusammenführung der aus dem Eichrecht abgeleiteten Anforderungen mit den Sicherheitsanforderungen, die sich aus dem Schutz der Energieinfrastruktur und des Datenschutzes ergeben. (U. Grottker, FB 8.5, ulrich.grottker@ptb.de; D. Richter, FB 8.5, dieter.richter@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Funktionelle Magnetresonanztomographie**

Funktionelle MR-Bildgebung (fMRI) ist weltweit eine Standard-Methode in neurowissenschaftlichen Arbeitsgruppen, denn sie zeigt uns, wo im Gehirn bestimmte Stimuli verarbeitet werden. Funktionelle MR-Spektroskopie (fMRS) kann uns darüber hinaus sagen, wie solche Prozesse ablaufen, indem sie zeigt, wie die Konzentration bestimmter Neurotransmitter auf die Variation eines externen Stimulus reagiert. Dass es dennoch bisher nur ganz wenige Beispiele erfolgreicher fMRS-Messungen gibt, liegt an der besonderen messtechnischen Schwierigkeit: Die Effekte sind klein und das physiologische Rauschen groß. In einem Kooperationsprojekt der PTB mit der Charité – Universitätsmedizin Berlin wurde jetzt erstmals gezeigt, wie sich die Konzentrationen von Neurotransmittern in einer selektierten Gehirnregion während einer kognitiven Stimulation verändern. (F. Schubert, FB 8.1, florian.schubert@ptb.de)

#### **Zuverlässige Messung der Glutamat-Konzentration in der menschlichen Amygdala**

Die Amygdalae oder Mandelkerne sind Teil des limbischen Systems im menschlichen Gehirn und gelten gemeinhin als „Zentrum der Angst“. Über Netzwerke, die durch die Ausschüttung von Neurotransmittern moduliert werden, spielt die Amygdala eine wichtige Rolle bei der Steuerung menschlicher Regungen wie Bedrohungsempfinden und Aggression. Durch sorgfältige Justage der Hochfrequenz-Anregungspulse und aufwendige Homogenisierung des lokalen Magnetfeldes, kombiniert mit speziell optimierten Pulssequenzen für MR-Spektroskopie mit kurzen Echozeiten, ist es jetzt gelungen, ein breites Spektrum von Gehirnmetaboliten einschließlich des exzitatorischen Neurotransmitters Glutamat in der menschlichen Amygdala zu messen und zu quantifizieren. (R. Mekle, FB 8.1, ralf.mekle@ptb.de)

#### **Implementierung der neuen Pulssequenz Semi-LASER für die MR-Hochfeldspektroskopie**

Grundsätzlich kann die MR-Spektroskopie durch ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis und durch vergrößerte spektrale Auflösung gleich doppelt von höheren Magnetfeldern profitieren. Allerdings stehen dem auch Herausforderungen wie inhomogene Hochfrequenz-Sendefelder und ein größerer chemischer Verschiebungs-Artefakt gegenüber. Um diese Herausforderungen zu meistern, wurde eine neue Pulssequenz, die sogenannte semi-LASER (Localized Adiabatic SElective Refocusing)-Sequenz für die Akquisition einzelner Voxel implementiert und optimiert. Erste Testmessungen in vitro und in vivo wurden erfolgreich am 3-Tesla-Tomografen der PTB in Charlottenburg und am 7-T-Scanner in Berlin-Buch durchgeführt. Die Verfügbarkeit dieser Pulssequenz soll vor allem der MR-Spektroskopie mit 7-Tesla-Geräten nützen. (R. Mekle, FB 8.1, ralf.mekle@ptb.de)

#### **Herzbewegungsdetektion mittels UWB-Radar durch schnelle MR-Messungen verifiziert**

Die kontaktlose Bewegungsdetektion des menschlichen Herzen mit Ultrabreitband(UWB)-Radar konnte durch die Entwicklung einer eindimensionalen MR-Sequenz mit hoher zeitlicher Auflösung verifiziert werden. Durch die gezielte Erweiterung der Radarkonfiguration für die abdominale Atemkomponente wurde die Erfassung der mechanischen Verschiebung des Herzens, die sich aufgrund der Atmung ergibt, möglich. (Olaf Kosch, FB 8.1, olaf.kosch@ptb.de)

#### **Selbstjustierende UWB-Radarkonfiguration für das Kardio-MRT**

Bei der Magnetresonanztomografie (MRT) des Herzens wird eine Triggerung benötigt, um Bewegungsartefakte durch den Herzschlag eliminieren zu können. Eine Bewegungsdetektion mittels Ultrabreitband(UWB)-Radar, die in den letzten Jahren von Wissenschaftlern der PTB und der TU Ilmenau entwickelt worden, ist jetzt in der praktischen Anwendbarkeit für die Kardio-MRT durch eine selbstjustierende Konfiguration mit 32 UWB-Kanälen noch einmal deutlich verbessert worden. Damit wurde die Voraussetzung für eine feste Integration der Antennen zur kontaktlosen Bewegungsdetektion im MR-Scanner geschaffen. (Olaf Kosch, FB 8.1, olaf.kosch@ptb.de)

#### **EMRP-Projekt „EARS“ gestartet**

Mit 5 Partnern aus 4 europäischen Ländern ist das Vorhaben „Metrology for a universal ear simulator and the perception of non-audible sound

(EARS)“im Rahmen des EMRP-Calls „Health“ gestartet. Koordiniert vom FB 1.6, werden im FB 8.2 neue Methoden für die magnetische Vermessung von Gehirnantworten auf akustische Reize im Infra- und Ultraschallbereich entwickelt. Dazu werden neuartige akustische Stimulatoren an biomagnetische Messsysteme angepasst und Messungen an Probanden durchgeführt. Ziel ist die Verbesserung der Sicherheit in der Nähe von Infra- und Ultraschallquellen wie z. B. Reinigungsbädern oder Windkraftanlagen. (T. Sander-Thömmes, FB 8.2, [tilmann.sander-thoemmes@ptb.de](mailto:tilmann.sander-thoemmes@ptb.de))

### **MKG-Erfassung mittels Chip-Scale-Magnetometern in normal geschirmter Umgebung**

„Chip-Scale Atomic Magnetometer“ (CSAM) sind neuartige, hochempfindliche Magnetfeldsensoren, die auf der Technologie miniaturisierter Atomuhren basieren und, anders als SQUIDs, bei Raumtemperatur betrieben werden können. Bisher konnten diese Sensoren, die im National Institute of Standards and Technology entwickelt werden, ihre Leistungsfähigkeit nur in einer stark geschirmten Umgebung, wie sie im BMSR-2 der PTB realisiert ist, unter Beweis stellen. Durch eine verbesserte Kompensation von statischen Feldern war es nun möglich, in einem einfachen kommerziell verfügbaren Abschirmraum eine akzeptable Signalqualität zu erreichen und z. B. die vom Herzen erzeugten Magnetfelder (Magnetokardiogramme, MKG) am menschlichen Körper zu messen. (T. Sander-Thömmes, FB 8.2, [tilmann.sander-thoemmes@ptb.de](mailto:tilmann.sander-thoemmes@ptb.de))

### **Workshop „Innovative Verarbeitung Bioelektrischer und Biomagnetischer Signale“ – BBS2012**

Vom 19.–20. April 2012 trafen sich 70 Experten und Nachwuchswissenschaftler auf Einladung des FB 8.2 in Berlin, um sich auf einem Workshop der Deutschen Gesellschaft für Biomedizinische Technik über die neuesten Trends und Ergebnisse in der Biosignalverarbeitung auszutauschen. Im Vordergrund standen aktuelle Themen wie die Analyse von Kopplungen zwischen verschiedenen Biosignalen oder die Online-Verarbeitung. Dabei wurde besonderes Gewicht auf den Bezug zu den vielseitigen Anwendungen der Methoden gelegt: von kardiovaskulären Fragestellungen über Störungen im motorischen System bis hin zur Entwicklung von Brain-Computer-Interfaces. (T. Sander-Thömmes, FB 8.2, [tilmann.sander-thoemmes@ptb.de](mailto:tilmann.sander-thoemmes@ptb.de))

### **Entwicklung eines optischen Mess- und Bildgebungsverfahrens für die intraoperative Wächterlymphknotendetektion**

In der Arbeitsgruppe *Gewebeoptik und Molekulare Bildgebung* der PTB wird im Rahmen eines BMBF-Projektes zur Validierung des Innovationspotenzials wissenschaftlicher Forschung ein neues Verfahren zum Auffinden von Wächterlymphknoten entwickelt. Für die Erkennung der Lymphknoten wird der sehr gut verträgliche Farbstoff Indocyaningrün in der Nähe des Karzinoms in das Gewebe injiziert. Die Ausbreitung des Farbstoffs über die Lymphgefäße hin zu den gesuchten Lymphknoten wird mittels Fluoreszenzmessungen verfolgt. Die Anregung der Farbstoffmoleküle erfolgt durch LEDs. Im Unterschied zu bereits existierenden kommerziellen Geräten wird neben der Fluoreszenzstrahlung des Kontrastmittels auch deren lokale Absorption im Gewebe ermittelt und für die Bildgebung berücksichtigt. (D. Grosenick, AG 8.3, [dirk.grosenick@ptb.de](mailto:dirk.grosenick@ptb.de))

### **Erfolgreicher Abschluss des EU-Projektes „Non-invasive imaging of brain function and disease by pulsed near infrared light“ (nEUROpt)**

Nach vierjähriger Laufzeit wurde dieses Projekt des 7. Rahmenprogramms im Jahr 2012 erfolgreich abgeschlossen. Die Projektaufgaben, an denen die PTB beteiligt war, reichten von der Entwicklung neuer instrumenteller und Analysemethoden bis zu klinischen Pilotstudien. Zudem war die PTB für die Entwicklung und den Einsatz von Protokollen zur Charakterisierung und zum Vergleich verschiedener Geräte zur zeitaufgelösten optischen Bildgebung verantwortlich. Räumliche Auflösung, Empfindlichkeit und Genauigkeit bei der Quantifizierung von Absorptionsänderungen im Gehirn wurden unter Verwendung von flüssigen Phantomen mit kleinen Absorptionskörpern sowie Schichtphantomen unter definierten Bedingungen gemessen und verglichen. (H. Wabnitz, FB 8.3, [heidrun.wabnitz@ptb.de](mailto:heidrun.wabnitz@ptb.de))

### **Separation von Indocyaningrün-Boli im Gehirn und in der Haut bei der Analyse zeitaufgelöster In-vivo-Fluoreszenzmessungen**

Fluoreszenz-gestützte Bolusmessungen im Gehirn versprechen ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis als solche auf der Basis von Änderungen der zeitaufgelösten diffusen Reflexion und sind von Interesse für ein Perfusionsmonitoring des Gehirns. Mit einer neuartigen Analysemethode für zeitaufgelöste Fluoreszenzmessungen, die in Kooperation mit Partnern der Neurologischen Klinik der Charité entwickelt wurde, gelingt die Rekonstruktion des Zeitverlaufs von Bolus-Signalen im Gehirn bei weitgehender

Eliminierung des Einflusses des Bolus' in der Haut. (A. Jelzow, FB 8.3, H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

### **Berührunglose Hirnbildgebung in vivo mittels Scanning-Verfahren**

Die Machbarkeit eines solchen Messverfahrens auf der Basis einer schnell geschalteten Einzelphotonen-Avalanchediode wurde zuvor bereits anhand von Phantom-Messungen gezeigt und publiziert (Optics Express 2012). Jetzt wurden in Zusammenarbeit mit dem Politecnico di Milano (Partner im EU-Projekt „nEUROPt“) erste erfolgreiche In-vivo-Tests durchgeführt, bei denen mittels eines Galvoscaners ein Gebiet von z. B. 4 cm × 4 cm auf dem Kopf abgerastert wurde. Die Hirnaktivierung konnte für verschiedene Stimuli nachgewiesen werden. (M. Mazurenka, FB 8.3, mikhail.mazurenka@ptb.de, H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

### **Optimierte Bestimmung von Absorptionsänderungen im Gehirn aus Momenten von Photonen-Laufzeitverteilungen**

Für Integral, mittlere Laufzeit und Varianz der Laufzeit wurde ermittelt, welche Kombination dieser Größen und welche Quell-Detektor-Abstände optimal für die lineare Rekonstruktion von Absorptionsänderungen in einem zweischichtigen Gewebemodell sind. Dazu wurde die Standardabweichung der Absorptionsänderung infolge von Photonenrauschen berechnet. Für die tiefere Schicht, die das Gehirn simuliert, nimmt diese Standardabweichung ab, wenn die höheren Momente in die Rekonstruktion eingeschlossen werden. Diese methodische Arbeit wurde in Kooperation zwischen der PTB und dem Nalecz-Institut für Biokybernetik and Biomedizinische Technik, Warschau (Dr. Liebert) durchgeführt und im Journal of Biomedical Optics publiziert. (H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de, C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Wissenschaftler der PTB kooperieren mit der Charité und der Freien Universität Berlin bei der Entwicklung eines neuen optischen Verfahrens für die Krebsdiagnostik**

In einem von der Wilhelm Sander Stiftung geförderten Forschungsprojekt ist es jetzt gelungen, Krebszellen durch die Anreicherung des körpereigenen Fluoreszenzfarbstoffes Protoporphyrin IX zum Leuchten zu bringen. Ein in der PTB entwickeltes Bildgebungsverfahren kann auf diese Weise Tumoren in Nacktmäusen sichtbar machen. Bisher war dieser Mechanismus, der mit Hilfe kurzer RNA-Doppelstränge (siRNA, short interfering RNA) ausgelöst wird, nur an Zellkulturen nachgewiesen

worden. Durch die Verwendung von Nano-Transportern konnte diese Reaktion auch in vivo gezeigt werden. (B. Ebert, FB 8.3, bernd.ebert@ptb.de)

### **Untersuchungen der Vitalität von Zellen bei verschiedenen Anreicherungsverfahren**

Die Entwicklung von künstlichen Geweben erfordert den Umgang mit lebenden Zellen, die beispielsweise aus dem peripheren Blut angereichert werden können. Zur Anreicherung werden Dichtegradienten verwendet und die Targetzellen anschließend mit spezifischen monoklonalen Antikörpern markiert. Dabei wurden entweder Antikörper mit superparamagnetischen Partikeln zur säulenbasierten Sortierung im Magnetfeld (MACS®-Verfahren) oder fluoreszierende Antikörper zur Sortierung im durchflusszytometrischen Zellsortierer (FACS®-Verfahren) eingesetzt. Zum Vergleich der beiden Verfahren wurde die Vitalität CD14-positiver Monozyten und CD34-positiver Stammzellen mikroskopisch und durchflusszytometrisch untersucht. (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)

### **Modellierung mechano-chemischer Wellen**

Das Zytoplasma biologischer Zellen besteht aus zwei einander durchdringenden Phasen: einem aktiven Netzwerk aus Biopolymeren (Zytoskelett) und einer passiven Flüssigkeit (Zytosol). Zur Modellierung dynamischer Prozesse in der Zelle wurde daher ein Zweiphasenmodell entwickelt, das die Strömung des Zytosols und die daraus resultierenden Kräfte und Deformationen des Zytoskelettes beschreibt. Im Modell wurden mechano-chemische Wellen gefunden, die Bewegung von Zellen steuern können. (S. Alonso, FB 8.4, sergio.alonso@ptb.de; M. Radszuweit, FB 8.4, markus.radszuweit@ptb.de)

### **Ein diskretes Modell für elektrische Aktivität im Herzen**

Die Kontraktion des Herzens wird durch elektrische Signale koordiniert. Herzgewebe ist ein stark heterogenes Netzwerk von Muskelzellen. Ein neues diskretes Modell für Herzgewebe erlaubt die Charakterisierung des Einflusses von Gewebehomogenitäten auf die Ausbreitung elektrischer Signale und die Entstehung von arrhythmischen Mustern. Insbesondere wurde der enge Zusammenhang zwischen der Perkolation von nichtfunktionalen Zellen und dem Auftreten von Reentry und Kammerflimmern nachgewiesen. (S. Alonso, FB 8.4, sergio.alonso@ptb.de, M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

## **Imaging magnetischer Nanopartikel in Arterien**

Auf der Basis der Multipolentwicklung wurde ein mathematisches Verfahren zum quantitativen Imaging magnetischer Nanopartikel in Arterien entwickelt. Anhand von berührungslosen Messungen des Magnetfeldes gestattet das Verfahren die für den erfolgreichen Einsatz von Nanopartikeln wichtige Unterscheidung ausgedehnter Verteilungen von punktförmigen Akkumulationen. Dadurch können medizinische Anwendungen magnetischer Nanopartikel, wie etwa beim magnetischen Drug-Targeting, optimiert und destruktive Methoden der Quantifizierung von Nanopartikeln in Arterien vermieden werden. (W. Haberkorn, FB 8.4, wolfgang.haberkorn@ptb.de; F. Wiekhorst, FB 8.2, frank.wiekhorst@ptb.de)

## **Minimales Modell aktiver Flüssigkeiten**

Biologische und künstlich aktive Flüssigkeiten haben wegen ihrer speziellen nichtnewtonschen Eigenschaften eine zunehmende Bedeutung für künftige Anwendungen. Für sogenannte aktive Fluide wurde ein einfaches minimales Modell entwickelt und deren Strömungseigenschaften, wie zum Beispiel Turbulenz, simuliert. Ergebnisse der Simulationen wurden jüngst in einer Publikation in den „Proceedings of the National Academy of Sciences USA“ Experimenten mit schwimmenden Bakterien der Spezies *Bacillus Subtilis* gegenübergestellt und ergaben eine auch quantitativ gute Übereinstimmung. (S. Heidenreich, FB 8.4, sebastian.heidenreich@ptb.de)

## **Varianten einer Spielkarte**

Die PTB hat im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie eine Studie über Vor- und Nachteile verschiedener Varianten einer Spielkarte angefertigt. Für die Studie ist die Machbarkeit der unterschiedlichen Varianten, ihr Wirkungs-, aber auch ihr Missbrauchspotenzial untersucht worden. In der Studie wird insbesondere das Verhältnis von erzielbaren Wirkungen zum technischen bzw. zum Regelungsaufwand dargelegt. Für die Politik hat die Studie entscheidungsunterstützenden Charakter. (D. Richter, FB 8.5, dieter.richter@ptb.de)

## **Arbeitsgruppe „Spielverordnung“ erzielt Ergebnis**

Eine aus Vertretern des Bundesministerium für Finanzen, des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, der PTB sowie oberster Finanzbehörden der Länder zusammengesetzte Arbeitsgruppe „Spielverordnung“ hat unter aktiver Beteiligung der PTB eine technisch umsetzbare Lösung für die

Verzahnung von spielrechtlichen und steuerrechtlichen gesetzlichen Vorschriften erarbeitet. Damit ist eine Grundlage geschaffen worden, um zukünftig die Korrektheit steuerlicher Deklarationen für den Bereich der Geldspielgeräte besser überprüfen zu können. (D. Richter, FB 8.5, dieter.richter@ptb.de; R. Kuschfeldt, FB 8.5, reiner.kuschfeldt@ptb.de)

## **Internationale Angelegenheiten**

### **EMRP Projekt NEW 04: Neue Methoden für die Messunsicherheit**

Am 1. August 2012 startete das EMRP-Projekt „Novel mathematical and statistical approaches to uncertainty evaluation“, das von der PTB (Fachbereich 8.4) koordiniert wird. An diesem Projekt sind 11 europäische Partner sowie 6 internationale „collaborators“ beteiligt, u. a. aus Nordamerika, Südamerika und Asien. Ziel des Projektes ist es, neue Verfahren zur Ermittlung von Messunsicherheiten für herausfordernde metrologische Aufgabenstellungen z. B. in den Gebieten Biochemie und Biotechnologie, Nanometrologie oder bei Transportprozessen zu entwickeln. Gleichzeitig sollen mit den neuen Methoden auch viele Anwendungen in Industrie und Regelung adäquater behandelt werden können als mit dem zurzeit verfügbaren Leitfaden „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“, so etwa im Zusammenhang mit der Behandlung von inversen Problemen oder bei Regressionsaufgaben. (M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Gemeinsame WELMEC-Arbeitsgruppe zur Behandlung von Software bei der Marktüberwachung**

In der WELMEC ist im Jahr 2011 eine „Joint Working Group“ von Vertretern verschiedener Arbeitsgruppen unter Beteiligung der PTB gebildet worden, die die besonderen Anforderungen an metrologische Software aus Sicht der Marktüberwachungsbehörden herausarbeiten sollte. Im Ergebnis ist ein Bericht entstanden, der Ergänzungen und Änderungen in den einschlägigen WELMEC-Leitfäden, insbesondere im WELMEC-Leitfaden 7.2, empfiehlt. Im Mittelpunkt der Empfehlungen stehen die Verbesserung der Identifikation und der Authentisierung der Software sowie die für die Marktüberwachung erforderlichen Dokumentationen. (U. Grottker, FB 8.5, ulrich.grottker@ptb.de)





---

# Kuratorium

Präsident des Kuratoriums

**Dr. Sven Halldorn**

Abteilungsleiter Technologiepolitik,  
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie,  
Berlin

Stellvertretender Präsident des Kuratoriums

**Prof. Dr. h. c. mult. Dr. Klaus von Klitzing**

Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

**Prof. Dr. Gisela Anton**

Physikalisches Institut IV der Universität Erlangen

**Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Auweter-Kurtz**

German Aerospace Academy, Böblingen

**Prof. Dr.-Ing. Winfried Büttner**

Leiter Corporate Intellectual Property and Functions  
in der Zentralabteilung / Corporate Technology  
Siemens AG, München

**Dr. Norbert Burger**

Bundesvereinigung der Firmen im  
Gas- und Wasserfach e. V., Köln

**Dr. Markus Dilger**

CTO der duagon GmbH,  
Dietikon (Schweiz)

**Prof. Dr. Olaf Dössel**

Institut für Biomedizinische Technik,  
Universität Karlsruhe

**Prof. Dr. Wolfgang Ertmer**

Institut für Quantenoptik,  
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

**Dr. Petra Gowik**

Leiterin der Referatsgruppe „Untersuchungen“,  
Bundesamt für Verbraucherschutz und  
Lebensmittelsicherheit, Berlin

**Prof. Dr. Axel Haase**

Direktor des Zentralinstituts für Medizintechnik,  
Technische Universität München, Garching

**Prof. Dr. h. c. mult. Dr. Theodor W. Hänsch**

Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching,  
und Ludwig-Maximilians-Universität, München

**Prof. Dr. Klaus-Peter Jäckel**

Oberkirch

**Prof. Dr.-Ing. Anke Kaysser-Pyzalla**

Wissenschaftliche Geschäftsführerin,  
Helmholtz-Zentrum Berlin

**Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Kowalsky**

Leiter des Instituts für Hochfrequenztechnik,  
Technische Universität Braunschweig

**Dr. Gerald Linke**

Leiter Kompetenz-Center Gastechnik,  
E.ON Ruhrgas AG, Essen

**Dipl.-Phys. Veronika Martens**

Leiterin des Metrologiezentrum Sartorius  
Weighing Technology GmbH, Göttingen

**Prof. Dr. Jürgen Mlynek**

Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft, Berlin

**Dr.-Ing. Eberhard Petrit**

Direktor des Landesbetriebs Mess- und Eichwesen  
Nordrhein-Westfalen

**Prof. Dr.-Ing. Joachim Scheuren**

Geschäftsführer der Müller-BBM GmbH, Planegg

**Dr. Thomas Sesselmann**

Geschäftsführer Dr. Johannes Heidenhain GmbH,  
Traunreut

**Dr. Augustin Siegel**

Oberkochen

**Prof. Dr. Dipl.-Chem. Lothar Siekmann**

Institut für Klinische Biochemie, Universität Bonn

**Ind.-Kfm. Peter von Siemens**

München

**Prof. Dr. h. c. mult. Dr. Joachim Treusch**

Präsident der Jacobs University Bremen GmbH

**Prof. Dr. Eberhard Umbach**

Präsident des Karlsruher Institut für Technologie

Ehrenkurator

**Prof. Dr. h. c. mult. Dr. Heinz-Georg Wagner**

Institut für Physikalische Chemie,  
Universität Göttingen

**Prof. Dr. Martin Winterkorn**

Vorstandsvorsitzender der Volkswagen AG,  
Wolfsburg

**Dr.-Ing. Klaus Rudolf Wurster**

Geschäftsführer National Rejectors Inc. GmbH,  
Buxtehude

Präsidium		
Präsident	Vizepräsident	Mitglied des Präsidiums
Prof. Dr. J. Ullrich ☎ 1000	Prof. Dr. M. Peters ☎ 2000	Dr. J. Stenger ☎ 3000

Fachbereich PST  
Präsidialer Stab

Dr. R. Wynands  
☎ 1009

Presse- und  
Öffentlichkeitsarbeit

Dr. Dr. J. Simon  
☎ 3005

Abteilung 1  
**Mechanik und Akustik**

Dr. R. Schwartz  
☎ 1010

Abteilung 2  
**Elektrizität**

Dr. U. Siegner  
☎ 2010

Abteilung 3  
**Chemische Physik und  
Explosionsschutz**

Prof. Dr. K.-D. Sommer  
☎ 3010

Abteilung 4  
**Optik**

Prof. Dr. F. Riehle  
☎ 4010

Abteilung 5  
**Fertigungsmesstechnik**

Dr. H. Bosse  
☎ 5010

Fachbereich 1.1  
Masse

Dr. D. Knopf  
☎ 1100

Fachbereich 2.1  
Gleichstrom und  
Niederfrequenz

Dr. J. Melcher  
☎ 2100

Fachbereich 3.1  
Metrologie in der  
Chemie

Dr. B. Güttler  
☎ 3100

Fachbereich 4.1  
Photometrie und  
angewandte Radiometrie

Dr. K. Stock  
☎ 4100

Fachbereich 5.1  
Oberflächenmesstechnik

Dr. L. Koenders  
☎ 5100

Fachbereich 1.2  
Festkörpermechanik

Dr. R. Kumme  
☎ 1200

Fachbereich 2.2  
Hochfrequenz und  
Felder

Dr. T. Schrader  
☎ 2200

Fachbereich 3.2  
Gasanalytik und  
Zustandsverhalten

Prof. Dr. V. Ebert  
☎ 3200

Fachbereich 4.2  
Bild- und Wellenoptik

Dr. E. Buhr  
☎ 4200

Fachbereich 5.2  
Dimensionelle  
Nanometrologie

Dr. J. Flügge  
☎ 5200

Fachbereich 1.3  
Geschwindigkeit

Prof. Dr. F. M. Jäger  
☎ 1300

Fachbereich 2.3  
Elektrische  
Energietechnik

Dr. M. Kahmann  
☎ 2300

Fachbereich 3.3  
Stoffeigenschaften  
und Druck

\*Prof. Dr. K.-D. Sommer  
☎ 3010

Fachbereich 4.3  
Quantenoptik und  
Längeneinheit

Dr. H. Schnatz  
☎ 4300

Fachbereich 5.3  
Koordinatenmesstechnik

Dr. F. Härtig  
☎ 5300

Fachbereich 1.4  
Gase

Dr. H. Többen  
☎ 1400

Fachbereich 2.4  
Quantenelektronik

Dr. A. Zorin  
☎ 2400

Fachbereich 3.4  
Grundlagen des  
Explosionsschutzes

Dr. H. Bothe  
☎ 3400

Fachbereich 4.4  
Zeit und Frequenz

Dr. E. Peik  
☎ 4400

Fachbereich 5.4  
Interferometrie an  
Maßverkörperungen

Dr. R. Schödel  
☎ 5400

Fachbereich 1.5  
Flüssigkeiten

Dr. G. Wendt  
☎ 1500

Fachbereich 2.5  
Halbleiterphysik und  
Magnetismus

Dr. H. W. Schumacher  
☎ 2500

Fachbereich 3.5  
Zünddurchschlags-  
prozesse

Dr. U. Klausmeyer  
☎ 3500

Fachbereich 4.5  
Optische Technologien

Prof. Dr. S. Kück  
☎ 4500

Fachbereich 5.5  
Wissenschaftlicher  
Gerätebau

Prof. Dr. F. Löffler  
☎ 5500

Fachbereich 1.6  
Schall

Dr. C. Koch  
☎ 1600

Fachbereich 2.6  
Elektrische  
Quantenmetrologie

Dr. F. J. Ahlers  
☎ 2600

Fachbereich 3.6  
System- und  
Eigensicherheit

Dr. U. Johannsmeyer  
☎ 3600

Fachbereich 1.7  
Akustik und Dynamik

Prof. Dr. W. Scholl  
☎ 1700

Fachbereich 3.7  
Zündquellensicherheit

Dr. M. Beyer  
☎ 3700

Benannte Stelle (Nummer 0102) nach  
EG-Richtlinien 94/9/EG, 2009/23/EG,  
2004/22/EG, 2006/42/EG

Zertifizierungsstelle

Dr. H. Stolz  
im Fachbereich Q.3  
☎ 8320

QUEST  
Institut an der PTB

Prof. Dr. P. O. Schmidt  
☎ 4700

# Organigramm

Stand: 1. Dezember 2012

## Vertreter d. Präsidenten in Berlin

Prof. Dr. H. Koch  
☎ (Ch) 7343

## Qualitätsmanager

Dr. A. Odin  
☎ 8330

## Interne Revision

B. Tafel  
☎ 9131

**Abteilung 6  
Ionisierende Strahlung**  
  
Dr. H. Janßen  
☎ 6010

**Abteilung 7  
Temperatur und  
Synchrotronstrahlung**  
  
Dr. G. Ulm  
☎ (Ch) 7312

**Abteilung 8  
Medizinphysik und  
metrologische  
Informationstechnik**  
Prof. Dr. H. Koch  
☎ (Ch) 7343

**Abteilung Q  
Wissenschaftlich-  
technische  
Querschnittsaufgaben**  
Dr. P. Ulbig  
☎ 8010

**Abteilung Z  
Verwaltungsdienste**  
  
C. Tampier  
☎ 9010

**Fachbereich 6.1  
Radioaktivität**  
  
Dr. D. Arnold  
☎ 6100

**Fachbereich 7.1  
Radiometrie mit  
Synchrotronstrahlung**  
  
Prof. Dr. M. Richter  
☎ (Ad) 7100

**Fachbereich 8.1  
Medizinische  
Messtechnik**  
  
Dr. B. Ittermann  
☎ (Ch) 7318

**Referat Q.11  
Wissenschaftliche  
Bibliotheken**  
  
Dr. J. Meier  
☎ 8131

**Referat Z.11  
Haushalt und  
Beschaffung**  
  
M. Wasmuß  
☎ 9110

**Fachbereich 6.2  
Dosimetrie für  
Strahlentherapie und  
Röntgendiagnostik**  
Dr. U. Ankerhold  
☎ 6200

**Fachbereich 7.2  
Kryophysik und  
Spektrometrie**  
  
Dr. T. Schurig  
☎ (Ch) 7290

**Fachbereich 8.2  
Biosignale**  
  
Dr. L. Trahms  
☎ (Ch) 7213

**Fachbereich Q.2  
Theoretische  
Grundlagen**  
  
\*Dr. P. Ulbig  
☎ 8010

**Referat Z.12  
Personal**  
  
S. Wiemann  
☎ 9120

**Fachbereich 6.3  
Strahlenschutzdosimetrie**  
  
Dr. P. Ambrosi  
☎ 6300

**Fachbereich 7.3  
Detektorradiometrie und  
Strahlungsthermometrie**  
  
Dr. J. Hollandt  
☎ (Ch) 7369

**Fachbereich 8.3  
Biomedizinische Optik**  
  
Prof. Dr. R. Macdonald  
☎ (Ch) 7542

**Fachbereich Q.3  
Gesetzliches Messwesen  
und Technologietransfer**  
  
Dr. D. Ratschko  
☎ 8300

**Referat Z.13  
Justizariat**  
  
M. Gahrens  
☎ 9130

**Fachbereich 6.4  
Ionenbeschleuniger und  
Referenzstrahlungsfelder**  
  
Dr. F. Wissmann  
☎ 6400

**Fachbereich 7.4  
Temperatur**  
  
Dr. J. Fischer  
☎ (Ch) 7473

**Fachbereich 8.4  
Mathematische  
Modellierung und  
Datenanalyse**  
Dr. M. Bär  
☎ (Ch) 7687

**Fachbereich Q.4  
Informationstechnologie**  
  
Dr. S. Hackel  
☎ 8400

**Referat Z.14  
Organisation und  
Controlling**  
  
Dr. J. Jaspers  
☎ 9140

**Fachbereich 6.5  
Neutronenstrahlung**  
  
Dr. H. Schuhmacher  
☎ 6500

**Fachbereich 7.5  
Wärme und Vakuum**  
  
Dr. T. Lederer  
☎ (Ch) 7230

**Fachbereich 8.5  
Metrologische  
Informationstechnik**  
  
Prof. Dr. D. Richter  
☎ (Ch) 7479

**Fachbereich Q.5  
Technische  
Zusammenarbeit**  
Dr. M. Stoldt  
D. Schwohnke  
☎ 8200

**Referat Z.15  
Verwaltung Berlin**  
  
A. Lubinus  
☎ (Ch) 7449

**Fachbereich 6.6  
Grundlagen der  
Dosimetrie**  
  
Dr. H. Rabus  
☎ 6600

**Fachbereich IB.T  
Technisch-wissensch.  
Infrastruktur Berlin**  
  
Dr. F. Melchert  
☎ (Ch) 7446

**Referat Q.61  
Arbeitsschutz- und  
Sicherheitsmanagement**  
  
M. Frühauf  
☎ 9170

**Referat Z.16  
Innerer Dienst**  
  
A. Grote  
☎ 9160

**Referat 6.71  
Betrieblicher  
Strahlenschutz**  
  
Dr. R. Simmer  
☎ 6710

**Referat Q.62  
Technischer Dienst  
Braunschweig**  
  
U. Deventer  
☎ 9210

**Referat Z.17  
Ausbildung**  
  
P. J. Dickens  
☎ 9240

## Gesamtpersonalrat

S. Brandes ☎ 1098

## Örtlicher Personalrat Braunschweig

W. Krien ☎ 1092

## Örtlicher Personalrat Berlin

R. Thomas ☎ (Ch) 7337

## Gleichstellungsbeauftragte

B. Behrens ☎ 9133

## Gesamtvertretung der Schwerbehinderten

R. Lütge ☎ 1097

## Vertretung der Schwerbehinderten Braunschweig

R. Lütge ☎ 1097

## Vertretung der Schwerbehinderten Berlin

C. Aßmann ☎ (Ch) 7964

## Zeichenerklärung

☎ (0531) 592-0 Braunschweig/Durchwahl 592 ...

☎ (030) 3481-0 Berlin Charlottenburg (Ch)/Durchwahl 3481 ...

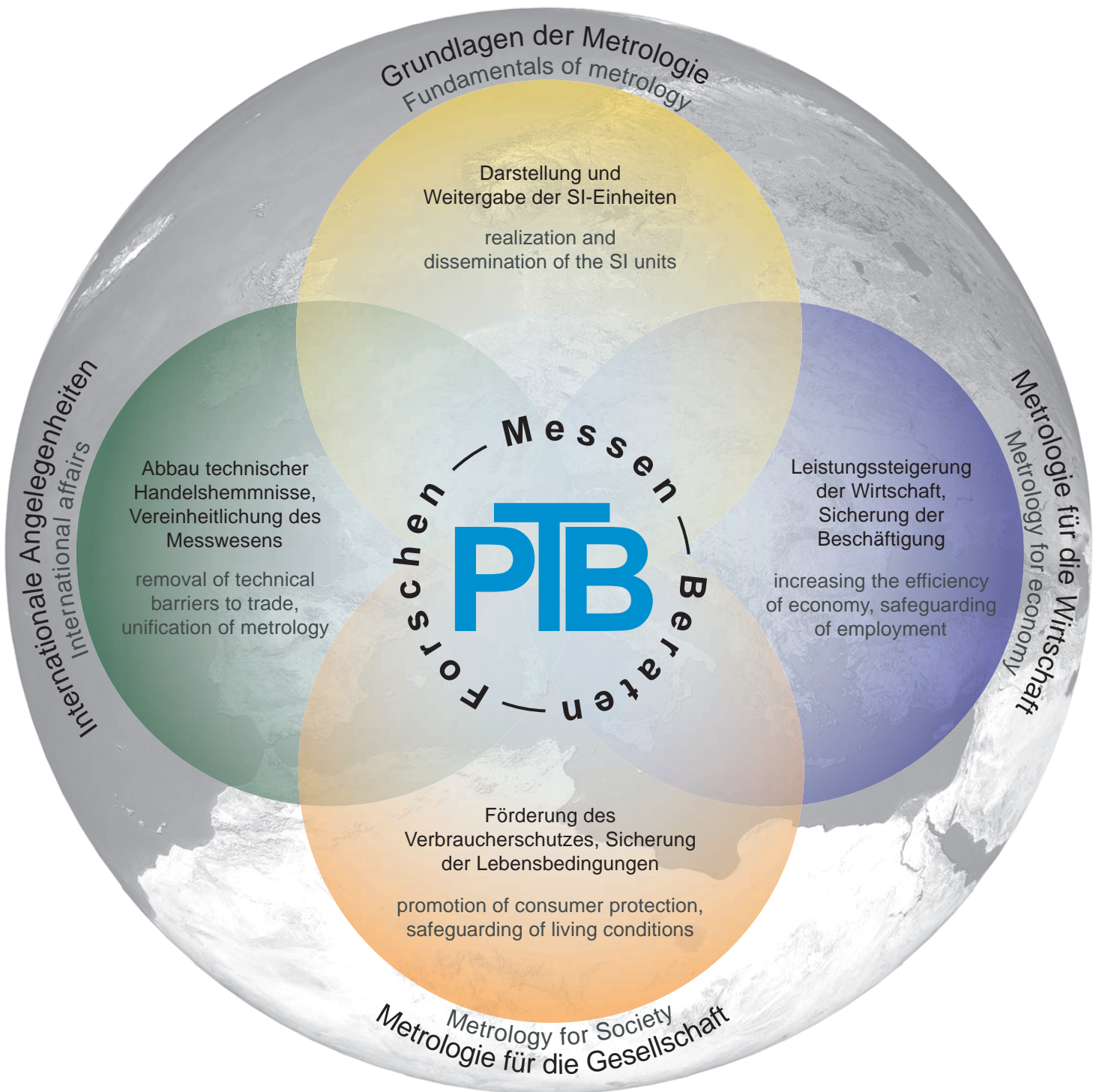
☎ (030) 3481-0 Berlin Adlershof (Ad)/Durchwahl 3481 ...

\*wahrgenommen durch

## Ausschüsse

Personal	A-PE	Prof. Dr. Löffler	☎ 5500
Investitionen	A-IV	Prof. Dr. Peters	☎ 2000
IT-Infrastruktur	A-IT	Dr. Hackel	☎ 8400
Metrologische Dienstleistungen	A-MD	Prof. Dr. Peters	☎ 2000
Internationale Zusammenarbeit	A-IZ	Dr. Stenger	☎ 3000
Qualitätsmanagement	A-QM	Dr. Odin	☎ 8330
Forschungsprogramme	A-FP	Dr. Stenger	☎ 3000

# 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 Transferrnormale. 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; seit 1. 1. 2010 Teil der DAkkS) größtenteils auf die Ebene der industriellen Messtechnik verlagert. Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden durch die Akkreditierungsstelle kompetent überwacht und in nationalen und internationalen Gremien vertreten.

Wissenschaft und Wirtschaft enger zu verzahnen ist eine politische Forderung, die von der PTB ernst genommen wird. Bei allen Forschungs- und Entwicklungsergebnissen prüft die PTB daher, ob diese auch als Schutzrechte, Patente bzw. Gebrauchsmuster oder durch Know-how-Verträge für eine Vermarktung durch Innovationen in Anspruch genommen werden können. Eine wichtige Rolle im Know-how-Transfer von der PTB in die deutsche Wirtschaft übernehmen Seminare und Fachtagungen, die wissenschaftlich-technische Entwicklungen wichtiger Arbeitsgebiete der PTB zum Thema haben. Speziell auf die Bedürfnisse von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) ist das Mittelstandsforum der PTB ausgerichtet. Es stellt eine Internet-Plattform dar, welche die Dienstleistungsangebote der PTB

einschließlich der Patentdatenbank in übersichtlicher Form aufzeigt und insbesondere auch Kunden, die mit der Struktur der PTB nicht vertraut sind, Navigationshilfen anbietet, die zu den richtigen Informationen und Ansprechpartnern führen.

### **Metrologie für die Gesellschaft**

In weiten Bereichen des täglichen Lebens besteht ein besonderes öffentliches Interesse an richtigen Messergebnissen und zuverlässigen Messeinrichtungen. Die Metrologie für die Gesellschaft umfasst daher überwiegend Aufgaben, die gesetzlich geregelt sind. In einer Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen sind der PTB verschiedene Tätigkeiten zugewiesen; in vielen dieser Rechtsvorschriften wird sie als einzige Stelle genannt. Hierin liegt eine besondere Verantwortung. Es ist Aufgabe der PTB, „Messtechnik und -verfahren zum angemessenen Schutz der Verbraucher im geschäftlichen und amtlichen Verkehr, der arbeitenden Bevölkerung im beruflichen Umfeld, zum Erhalt und der Wiederherstellung der Gesundheit, für die persönliche und industrielle Sicherheit sowie zum Schutz der Natur und Umwelt“ zur Verfügung zu stellen und einzusetzen.

Ein Schwerpunkt in diesem Bereich ist die Bauartzulassung bzw. Baumusterprüfung von Messgeräten im Rahmen nationaler oder europäischer Rechtsvorschriften, zum Beispiel auf den Gebieten Energiemesstechnik für elektrische Energie, Gas und Wasser (Wärme, Kälte), Sicherheit im Straßenverkehr (Geschwindigkeitsüberwachung, Atemalkohol), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und Umweltmesstechnik (Absolutmessungen in der Schadstoff- und Spurenanalyse, Lärmschutz etc.). Die meisten Bauartzulassungen erfüllt die PTB auf der Grundlage des Eichgesetzes. Bedingt durch die Umsetzung der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) werden das Eichgesetz und die Eichordnung novelliert. Die PTB ist inzwischen als Benannte Stelle nach europäischem Recht anerkannt, sodass den Kunden aus der Industrie die von der MID geforderten Konformitätsbewertungsverfahren angeboten werden können.

Die PTB ist gemäß Medizinproduktegesetz zuständig für die Sicherstellung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Medizin. So entwickelt die PTB neue oder verbessert bereits existierende Messverfahren für Diagnostik und Therapiekontrolle. Zum anderen leistet die PTB entscheidende Beiträge durch Entwicklung von Normalen und Normalmeseinrichtungen, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung oder für medizinische

Geräte mit Messfunktion, sowie durch Arbeiten zur Rückführung von analytischen Messungen in der klinischen Chemie auf die SI-Einheiten bzw. Normalmessverfahren.

In Absprache und Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ist die PTB auf den wirtschaftlich und vor allem gesellschaftlich wichtigen Gebieten der physikalischen Sicherheitstechnik und des Explosionsschutzes elektrischer Betriebsmittel tätig. Aufgrund ihrer Kompetenz fällt ihr dabei eine internationale Referenzfunktion zu. Gleiches gilt für die Arbeiten auf dem Gebiet des Strahlenschutzes.

### **Internationale Angelegenheiten**

Mit der Gründung der Meterkonvention im Jahre 1875 wurde auf höchster staatlicher Ebene manifestiert, dass Metrologie eine internationale Angelegenheit ist. Durch die zunehmende Globalisierung von Wirtschaft und Handel hat diese Aufgabe in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Im Geschäftsbereich „Internationale Angelegenheiten“ ist es Aufgabe der PTB, „zur internationalen Einheitlichkeit des Messwesens und damit zum Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse beizutragen“. Hierzu dienen Kooperationen mit anderen nationalen Metrologieinstituten, maßgebliche Mitarbeit in den internationalen Gremien und technisch-ökonomische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern.

Wesentliches Element der Kooperation mit Partnerinstituten sind internationale „Key Comparisons“ von Normalen und Normalmeseinrichtungen und sich daraus ableitende F&E-Arbeiten. Im Rahmen der internationalen Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Messergebnissen und Zertifikaten der nationalen Metrologieinstitute und der akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien kommt diesen Vergleichen besondere Bedeutung zu.

Die Anforderungen an die Metrologie werden in Zukunft sowohl vom Umfang als auch von der Komplexität her stetig wachsen, sodass ein einzelnes Institut nicht sämtlichen Ansprüchen auf Dauer genügen kann. Koordination und Kooperation bei F&E und Dienstleistungen sind daher unumgänglich. Die rechtsfähige europäische Metrologieorganisation EURAMET stellt hier die erforderlichen Strukturen zur Durchführung eines europäischen Metrologieforschungsprogramms zur Verfügung.

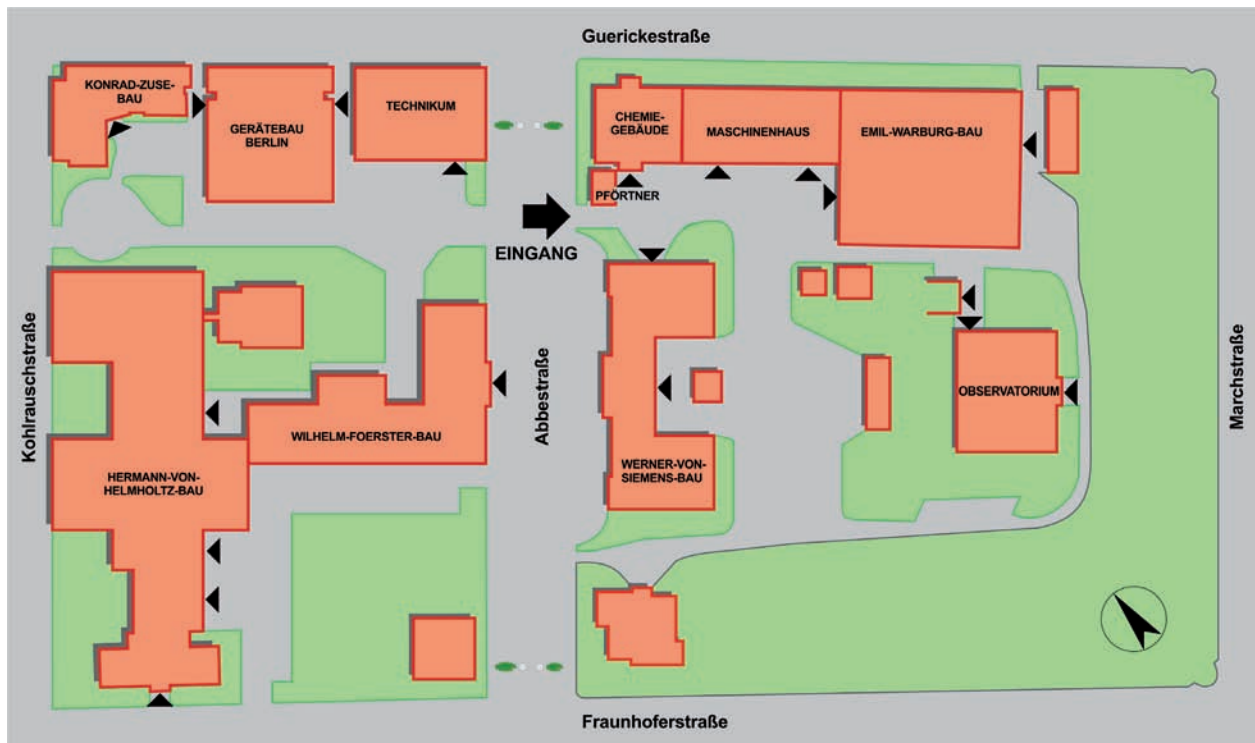
Neben ihrem europäischen Engagement arbeitet die PTB ebenfalls maßgeblich in allen internationalen Metrologieorganisationen mit, zu einem erheblichen Teil in leitender Funktion. Außerdem leistet die PTB einen wesentlichen Beitrag zur internationalen Normung durch Mitarbeit in Gremien von ISO, IEC, CEN, CENELEC. Die weltweite Angleichung von Anforderungen und Prüfvorschriften im gesetzlichen Messwesen dient dem Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse und damit der exportorientierten deutschen Messgeräteindustrie. Mit diesen Zielen arbeitet die PTB aktiv in OIML und WELMEC mit.

Einen erheblichen Umfang nimmt die Technische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern ein. Die PTB gibt ihre Erfahrungen weiter und leistet aktive Hilfe beim Aufbau der technischen Infrastruktur für die Metrologie sowie für das Normen-, Prüf- und Qualitätswesen einschließlich der Akkreditierung und der Zertifizierung. Die finanziellen Mittel werden überwiegend vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) sowie weiteren nationalen und internationalen Gebern, wie der EU und der Weltbank, zur Verfügung gestellt.





# Geländeplan Berlin-Charlottenburg



## Gebäude in Braunschweig

### Gebäude (Building):

Abbe-Bau (V)  
 Annahme und Versand  
 (Delivery and Shipment) (S)  
 Bessel-Bau (M)  
 Bibliothek (Library) (K)  
 Bothe-Bau (S)  
 Bereitstellungslager (P)  
 Bunsen-Bau (Q)  
 Betriebswerkstätten  
 (Workshops) (T)  
 Chadwick-Bau (G)  
 Elster-Geitel-Bau (S)  
 Einstein-Bau (C)  
 Explosionsprüfstand  
 (Explosion test rig) (Q)  
 Fahrbereitschaft  
 (Driver pool) (R)  
 Gauss-Bau (V)  
 Gästehaus  
 (Guest House) (V)  
 Geiger-Bau (S)  
 Glocker-Bau (T)  
 Giebe-Bau (L)  
 Gumlich-Haus (P)  
 Hahn-Bau (L)  
 Hauptwerkstatt  
 (Main Workshop) (S)  
 Heisenberg-Bau (C)

Helmholtz-Bau I (K)  
 Helmholtz-Bau II (K)  
 Hertz-Bau (K)  
 Hörsaal (Auditorium) (C)  
 Kasino (K)  
 Kids & Co-Bau  
 (Kita und Wissensforscher) (L)  
 Kohlrusch-Bau (C)  
 Kopfermann-Bau (U)  
 v.-Laue-Bau (V)  
 Leibniz-Bau (U)  
 Meissner-Bau (K)  
 Meitner-Bau Gerätebau (Q)  
 Meitner-Bau Laborgebäude (Q)  
 Meitner-Bau Galvanik (Q)  
 Meitner-Bau Materiallager (Q)  
 Schlichting-Bau (R)  
 Nernst-Bau (R)  
 Ohm-Bau (C)  
 Paschen-Bau (L)  
 Personalrat (Staff Council) (E)  
 Planck-Bau (H)  
 Prandtl-Bau (R)  
 Röntgen-Bau (S)  
 Reinraumzentrum  
 (Clean Room Centre) (C)  
 Raumzellen-Bau 4 (RZB 4) (Q)  
 Raumzellen-Bau 6 (RZB 6) (S)  
 Schering-Bau (R)  
 Seminarzentrum  
 (Conference Centre) (C)

Sicherheitstechnik  
 (Safety Technology) (F)  
 Vieweg-Bau (B)  
 Weber-Bau (R)  
 Werkfeuerwehr (Fire Brigade) (R)  
 Wohnhaus Ost  
 (Residential Building East) (E)  
 Wohnhaus West  
 (Residential Building West) (A)  
 Wirtschaftsgebäude (K)  
 Willy-Wien-Turm (R)  
 Zentralgebäude  
 (Central Building) (K)

### Einrichtungen / Institute auf dem Gelände (External Facilities and Institutions):

Deutsche Akkreditierungsstelle  
 (DAkS), Vieweg-Bau (B)  
 Etalon AG, Hauptwerkstatt (Main  
 Workshop) (S)  
 EURAMET e.V., Zentralgebäude  
 (Central Building) (K)  
 QUEST@PTB, v.-Laue-Bau (V)  
 Underwriters Laboratories (UL),  
 Raumzellen-Bau 4 (Q)

### **Anschriften der PTB**

Standort Braunschweig:  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

Standort Berlin-Charlottenburg:  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Abbestraße 2–12  
10587 Berlin

E-Mail: [info@ptb.de](mailto:info@ptb.de)  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)

### **Impressum**

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin  
Braunschweig, März 2013  
Satz, Gestaltung: PTB, Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Übersetzung: PTB-Sprachendienst  
Druck: westermann druck GmbH, Braunschweig  
Nachdruck mit Quellenangabe gestattet.

**ISSN 0340-4366**

