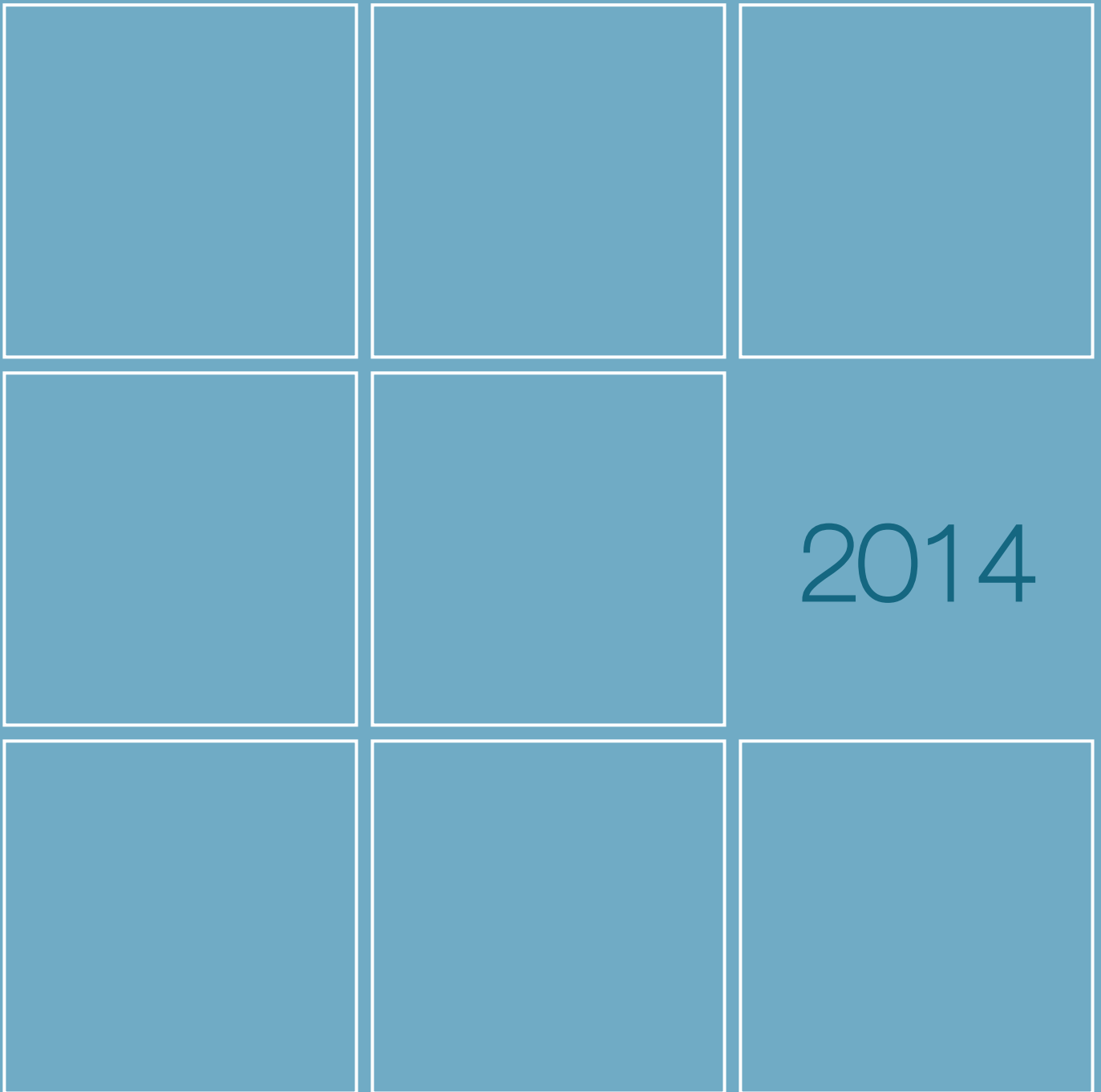




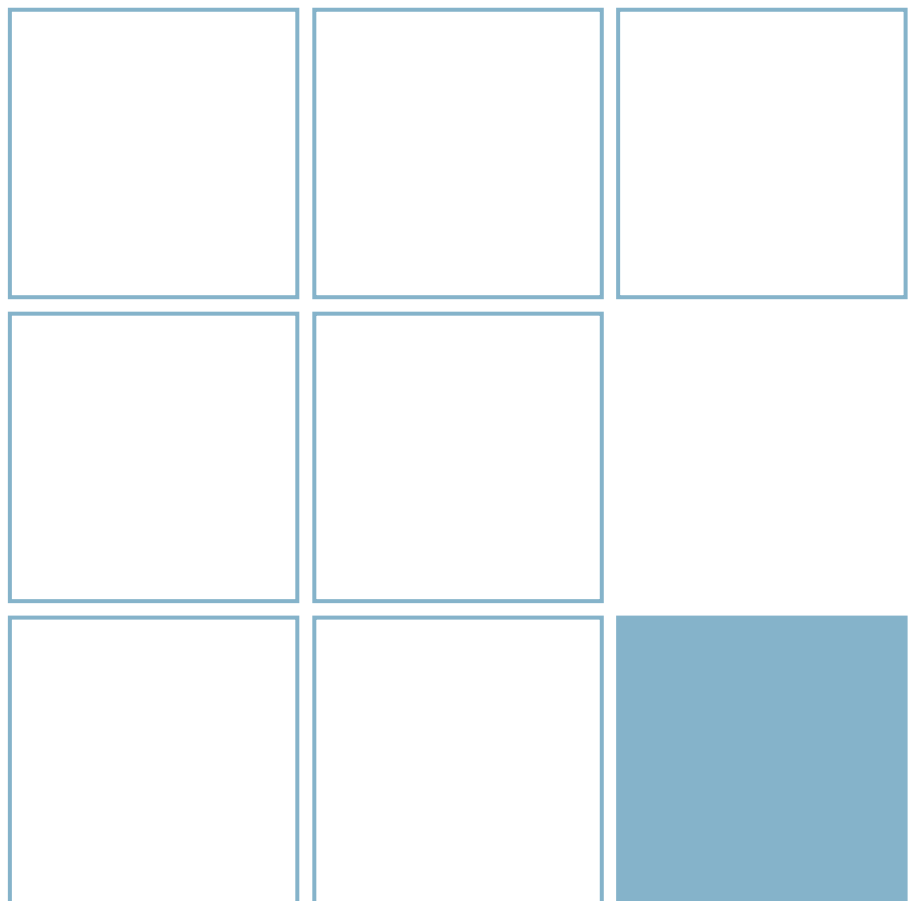
PTB jahresbericht

Annual Report



2014

Physikalisch-Technische
Bundesanstalt
Jahresbericht 2014



Vorwort

„Die PTB ist und bleibt das Maß aller Dinge“. Mit diesem so kurzen wie prägnanten Eintrag ins Gästebuch fasst Bundesminister Gabriel die Eindrücke seines Besuches an der PTB am 27. Februar 2014 zusammen. Nach Gesprächen mit dem Präsidium, einem Laborbesuch beim Avogadro-Projekt und einer Aussprache mit den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der PTB im Hörsaal bedankt er sich bei allen PTBisten für ihr großes Engagement und hebt die internationale Spitzenstellung der PTB hervor. Ganz ähnlich äußert sich Gabriele Heinen-Kljajić, Niedersächsische Ministerin für Wissenschaft und Kultur, die die PTB am 23. September 2014 besuchte. Sie attestiert der PTB, einer der wichtigsten Player in der Forschungslandschaft Niedersachsens zu sein, und wünscht sich auch in der Zukunft viele Kooperationen mit den Hochschulen des Landes.

Die vielleicht beste Nachricht des Jahres ist, dass es zumindest teilweise gelang, zur Umwandlung sachgrundlos befristeter Arbeitsverhältnisse unbefristete Stellen zugewiesen zu bekommen. Dies geschah nicht zuletzt infolge des Besuches des Bundesministers, der sich, von PTB-Mitarbeitern darauf aufmerksam gemacht, dafür eingesetzt hat. Nach dem Ende des Stellenabbaus können wir nun wieder nachhaltige Personalpolitik betreiben. Insgesamt konnten etwa sechzig Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in unbefristete Arbeitsverhältnisse übernommen werden, darunter sieben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler über den neugeschaffenen Stellenpool. Letztere lernen nun in einem umfangreichen zweijährigen Trainee-Programm verschiedene Bereiche aus Dienstleistung und Forschung der PTB kennen, bevor sie dann an ihre Zielstelle gelangen. Im Auswahlverfahren wurde neben der fachlichen Eignung auch die Führungs- und Sozialkompetenz der Bewerber/innen in einem sogenannten „Assessment Center“ unter die Lupe genommen, mit sehr positiven Erfahrungen.

Die Mitarbeiterzufriedenheitsumfrage 2014 wurde von der Belegschaft mit vielen individuellen Kommentaren sehr gut angenommen. Neben durchaus erfreulichen Ergebnissen – so sind außergewöhnlich viele PTBisten stolz darauf, an der PTB zu arbeiten, sie fühlen sich wohl im Kreise ihrer Kolleginnen und Kollegen, loben die gute apparative Ausstattung und die familienfreundlichen Arbeitsbedingungen – gab es durchaus Felder, in denen Verbesserungen erzielt werden können. Zukünftige Anstrengungen richten sich insbesondere darauf, sowohl die Kommunikation mit dem Präsidium als auch insgesamt zu verbessern,

Führungskompetenzen weiter zu entwickeln, bürokratische Hemmnisse möglichst abzubauen und die Infrastruktur und die Arbeitssicherheit an der PTB gezielt weiter zu verbessern. Entsprechende Maßnahmen sind eingeleitet.

Ein großer Meilenstein im Bereich der Dienstleistungen und der Politikberatung ist sicherlich die endgültige Verabschiedung des Mess- und Eichgesetzes, das nunmehr ab 1. Januar 2015 in Kraft tritt, verbunden mit der Einrichtung des Regelermittlungsausschusses unter der Leitung der PTB sowie der Konformitätsbewertungsstelle an der PTB. Unter Leitung des Vizepräsidenten umfasst deren Leistungsangebot ca. 160 Arten von Messgeräten, Teilgeräten und Zusatzeinrichtungen, deren Verwendung in Deutschland unter den Schutz des neuen Mess- und Eichgesetzes gestellt wurde. Insgesamt unterstreicht damit die PTB ihre Schlüsselrolle im gesetzlichen Messwesen und beim Inverkehrbringen von nicht europäisch geregelten Messgeräten. Dies wurde nicht zuletzt durch das große Interesse an einer von der PTB ausgerichteten Informationsveranstaltung mit mehr als 300 Teilnehmern aus Industrie und Verbänden eindrucksvoll bestätigt.

Neue Herausforderungen bei den Dienstleistungen ergeben sich u. a. aufgrund strengerer Grenzwerte für den Ausstoß von Dieselruß aus Kraftfahrzeugen in der Euro-Norm 5, durch die Neufassung der Spielverordnung sowie aufgrund der ungebrochenen Klagebereitschaft bei Bußgeldverfahren im Zusammenhang mit der Übertretung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Mit dem Aufbau eines neuartigen, hochstabilen Rußgenerators, durch die Einstellung neuer Mitarbeiter für die Zulassung von Spielgeräten sowie durch gezielte Informationsveranstaltungen für Staatsanwaltschaften, unterstützt durch einen Beschluss des Oberlandesgerichts (OLG) Frankfurt am Main, konnten in allen Bereichen wichtige Erfolge erzielt werden. So bestätigt das OLG, dass Gerichte grundsätzlich von der Richtigkeit der Messung mit von der PTB zugelassenen und von den Länderbehörden geeichten Geräten ausgehen können.

Dienstleistungen auf höchstem Niveau, in der Photovoltaik, bei der Charakterisierung neuer Lichtquellen oder von Wärmemengenzählern, im Bereich der Klimaforschung, bei der rückführbaren Messung der Bestandteile von Blutserum in der medizinischen Diagnostik, bei der Bauartzulassung modernster und höchstgenauer Waagen, bei der Messung von Neutro-

nenflüssen am neuen Fusionsreaktor in Greifswald, um nur einige zu nennen, können nur dann zuverlässig und zeitnah erbracht werden, wenn die PTB in all diesen Bereichen intensive eigene Forschung und Entwicklung an vorderster Front betreibt.

Ein Meilenstein für die koordinierte metrologische Forschung in Europa ist die Ratifizierung des „European Metrology Programme for Innovation and Research“, EMPIR, durch das Europäische Parlament und den Ministerrat in diesem Jahr. In Förderaufrufen zwischen 2014 und 2020 stehen hier über eine Gesamtlaufzeit von zehn Jahren insgesamt ca. 600 Mio. € unter Beteiligung von 28 europäischen Staaten zur Verfügung. Mit einem Anteil von etwa 30 % wird die PTB entscheidend dazu beitragen, dass die europäische Metrologie auch in Zukunft eine weltweite Spitzenstellung einnimmt.

Forschung in Gebieten, wo zwar ein hohes metrologisches Potenzial erkennbar ist, aber noch viele grundsätzliche Fragen geklärt werden müssen, wie z. B. in Teilbereichen der Nano- und Quanten-Metrologie oder der Metrologie für die Gesundheit, kann von der PTB nicht umfassend betrieben werden. Hier ist die Zusammenarbeit mit Universitäten von großer Bedeutung und erweitert unseren Aktionsradius erheblich. So wurde die kürzlich ins Leben gerufene „Metrologie-Initiative Braunschweig“ weiter ausgebaut. Ein gemeinsam mit der TU Braunschweig beantragtes Graduiertenkolleg zur Nanometrologie, NanoMet, wurde von der DFG bewilligt, die Bautätigkeiten des gemeinsam betriebenen Forschungsbaus LENA wurden aufgenommen, der Studiengang „Messtechnik und Analytik“ wurde neu eingerichtet, eine gemeinsame Berufung in der theoretischen Physik sowie die Installation einer Nachwuchsgruppe in der Nanometrologie sind weit fortgeschritten. Ähnliches gilt für die Kooperation mit der Leibniz Universität Hannover. Hier ist der gemeinsame Forschungsbaubau HITec, in dem auch das QUEST-Institut der PTB Labors vor Ort betreibt, praktisch fertiggestellt. Ein zusammen mit anderen Partnern initiiertes Sonderforschungsbereich zur relativistischen Geodäsie, in dem optische Uhren der nächsten Generation und höchstpräzise Zeitübertragung eine Schlüsselrolle spielen, geo-Q, erzielte eine hervorragende Begutachtung und ist genehmigt. Die Anbindung des neuberufenen Leiters der Abteilung „Medizinphysik und metrologische Informationstechnik“ an die Charité in Berlin ist in Vorbereitung.

Bei den Anstrengungen zur Neudefinition des Internationalen Einheitensystems, SI, nimmt die PTB zunehmend eine Schlüsselrolle ein. Die Unsicherheit in der Bestimmung der Planck-Konstanten konnte im Rahmen des Avogadro-Projektes weiter verbessert werden, sodass nun, zusammen mit einem neuen Wert von der kanadischen Wattwaage, zwei der formalen Voraussetzungen zur Neudefinition des Kilogramms weitgehend erfüllt sind. Eine Roadmap, gemeinsam erstellt von den Konsultativkomitees für Masse und für Einheiten, sieht einen genauen Zeitplan bis 2018 vor, der nach jetziger Einschätzung zwar sehr ehrgeizig ist, jedoch durchaus eingehalten werden kann. Messungen höchster Präzision mit integrierter Fehlerkorrektur zur Realisierung des „neuen Ampere“ mittels Einzelelektronenpumpen wurden mit dem Hermann-von-Helmholtz-Preis 2014 ausgezeichnet. Er gilt als eine der international bedeutendsten Auszeichnungen in der Welt der Metrologie. Da das SI in Zukunft auf festgelegten Zahlenwerten von Naturkonstanten beruhen soll, ist es wichtig zu wissen, ob diese denn auch tatsächlich konstant sind. Die optische Ytterbium-Uhr der PTB, die die zurzeit weltweit geringste Unsicherheit aufweist, lieferte auch mit die stringentesten Grenzwerte für mögliche Änderungen der Feinstrukturkonstanten sowie des Verhältnisses von Elektronen- zu Protonenmasse.

Ein Höhepunkt in der internationalen Zusammenarbeit bildete nicht zuletzt die feierliche Unterzeichnung einer Vereinbarung zur Fortsetzung der nunmehr 35-jährigen Kooperation zwischen dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und dem chinesischen Zentralamt für Qualitätsüberwachung, Inspektion und Quarantäne (AQSIQ).

Ich bedanke mich herzlich bei allen, die durch ihr Engagement und ihren Einsatz dazu beigetragen haben, dass die PTB bei metrologischer Dienstleistung und Forschung national und international als eine der führenden Institutionen gilt und so dem höchsten Anspruch, welcher mit dem Eintrag des Bundesministers ins Gästebuch verbunden ist, gerecht wird.



Foreword

„PTB is and remains the measure of all things“. With this visitors book entry which is as short as it is concise, Federal Minister Gabriel summarized the impressions he gained during his visit to PTB on 27 February 2014. After talks with the Presidential Board, a visit to the Avogadro Project's laboratory and a discussion with PTB staff in the lecture hall, he thanked all the PTB's employees for their strong commitment and emphasized PTB's international top position. Gabriele Heinen-Kljajić, Lower Saxony's Minister of Science and Culture, said something very similar when she visited PTB on 23 September 2014. She confirmed that PTB is one of the most important players on Lower Saxony's research scene and expressed her wish for the cooperation with the state's universities to continue at its high level in the future.

Perhaps the best news of the year is that it was possible at least in part to change fixed-term employment conditions based on special projects to permanent contracts. This happened not least as a result of the Federal Minister's visit, as he advocated this issue after PTB staff members drew his attention to it. With job cuts being behind us, we can now once again take up long-term personnel policies. In total, about sixty members of staff were given permanent employment contracts – among them seven scientists through the newly created pool of jobs. The new scientists are now getting to know various service and research sectors of PTB in a comprehensive two-year trainee programme, before they then take on the work that is intended for them. In the selection process, apart from putting their professional aptitude under the microscope, the applicants' leadership skills and social competence were also looked at in a so-called "Assessment Center"; a very positive experience.

The Employee Satisfaction Survey 2014 was well received by staff and drew many individual comments. Apart from the all-round pleasing results – extraordinarily many PTB staff members are proud of working at PTB, feel fine in their group of colleagues, praise the well-equipped facilities and the family-friendly working conditions – there were definitely fields with room for improvement. Future effort is particularly aimed at improving communication with the Presidential Board as well as in general, developing leadership skills further, removing bureaucratic barriers as much as possible and further improving infrastructure and safety at work at

PTB in a targeted way. Appropriate measures have been initiated.

A large milestone in the service sector and in the rendering of consultancy to policy makers is certainly the final adoption of the Measures and Verification Act, which came into force on 1 January 2015, combined with the establishment of the *Regelermittlungsausschuss* (Rule Determination Committee) headed by PTB as well as the *Konformitätsbewertungsstelle* (Conformity Assessment Body) at PTB. Under the leadership of the Vice President, their services encompass approximately 160 types of measuring instruments, ancillary equipment and peripheral devices, whose use in Germany has been placed under the protection of the new Measures and Verification Act. Doing this all in all underlines PTB's key role in legal metrology and in placing measuring instruments which are not regulated in Europe on the market. This was not least impressively confirmed by the great interest in an information event organized by PTB which had more than 300 participants from industry as well as trade and professional associations.

New challenges relating to services have arisen, among other things, from stricter limiting values for the emission of diesel exhaust particles from motor vehicles in the Euro 5 standard, from the revision of the Gaming Ordinance, as well as from an incessant readiness to legally complain about speeding fines related to exceeding the admissible maximum speed limit. It has been possible to gain significant success in all these fields – by setting up a novel highly stable soot generator, by recruiting new members of staff for the approval of gaming machines as well as by targeted information events for public prosecutor's offices supported by a decision of the *Oberlandesgericht* (Higher Regional Court) Frankfurt am Main. This court confirmed that, as a matter of principle, courts can assume the correctness of measurement from devices approved by PTB and verified by the federal state authorities.

Services at the highest level, in photovoltaics, when characterizing new light sources or heat meters, in the field of climate research, when traceably measuring the components of blood serum in medical diagnostics, in the type approval of the most advanced instruments, or when measuring neutron fluxes in the new fusion reactor in Greifswald – to name just a few instances – can only be performed reliably and

promptly, if PTB undertakes its own intensive research and development at the forefront of all these fields.

The ratification of the European Metrology Programme for Innovation and Research, EMPiR, by the European Parliament and the Council of Ministers this year is a milestone for coordinated metrological research in Europe. In calls for proposals between 2014 and 2020 a total of some €600 million will be available over a running time of ten years in all. Twenty-eight European states will be involved in this. With a share of about 30 %, PTB will significantly contribute to European metrology holding a top position worldwide in the future.

Research in fields where a high metrological potential can be seen, but there are still many fundamental issues to be resolved, such as in sub-fields of nano- and quantum metrology or in metrology for health, cannot be comprehensively pursued by PTB. Here, cooperation with universities is of great importance and expands our sphere of activities considerably. The recently established “*Metrologie-Initiative Braunschweig*” was thus further extended. A Research Training Group on nanometrology, NanoMet, which was jointly put forward with the TU Braunschweig was approved by the German Research Foundation (DFG), the construction work on the jointly operated research building LENA was started, the degree course “*Messtechnik und Analytik*” (Metrology and Analysis) was newly established, a joint appointment in theoretical physics as well as the creation of a Young Investigator Group on nanometrology are well underway. Similar activities have been supported in our cooperation with Leibniz University Hannover. Here, the joint research building HITec, where the QUEST Institute of PTB also operates labs, is practically ready. A Collaborative Research Centre, geo-Q, achieved an excellent assessment and has been approved. This research centre for relativistic geodesy was initiated with some other partners. Optical clocks of the next generation and highly precise time transmission play a key role in geo-Q. A connection of the newly appointed head of PTB’s “Medical Physics and Metrological Information Technology Department” to the Charité in Berlin is being prepared.

PTB is increasingly taking on a crucial role in the efforts being made to redefine the International System of Units (SI). The uncertainty in determining

Planck’s constant was further improved in the scope of the Avogadro Project, so that now, together with a new value from the Canadian watt balance, two of the formal requirements for the redefinition of the kilogram have largely been met. A roadmap, drawn up with the Consultative Committees for Mass and for Units, stipulates an exact schedule until 2018. This is very ambitious according to current estimates, yet it can definitely be met. Measurements of the highest precision and with integrated error correction for the realization of the “new ampere” by means of single-electron pumps were honoured with the Hermann von Helmholtz Prize in 2014. This is deemed one of the most significant international awards in the metrology world. As the SI is to be based on fixed numerical values of fundamental constants in future, it is important to know whether these are, in fact, actually constant. PTB’s optical ytterbium clock, which currently has the lowest uncertainty worldwide, also supplied among the most stringent limit values for possible changes of the fine-structure constant as well as of the ratio of the mass of the electron to that of the proton.

One highlight in international cooperation was not least the formal signature of an agreement on continuing the 35-year-long cooperation between the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) and the General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China (AQSIQ).

I would like to thank all those whose commitment and dedication have contributed to PTB being one of the leading institutions providing metrological services and research nationally and internationally and doing, as such, justice to the highest demands – a fact which is also reflected by Federal Minister Gabriel’s entry in our visitors book.



Dieser gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2014. Den kompletten Jahresbericht mit Nachrichten und speziellen Listen finden Sie auf den Internetseiten der PTB (unter www.ptb.de im Bereich „Publikationen“).

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

Jahresbericht im Internet

- Vorwort
- Nachrichten des Jahres
- Aus den Abteilungen
 - Abteilungsleiterberichte
 - Nachrichten
 - Tätigkeitsbereiche
 - Forschungsvorhaben
 - Kooperationen
- Zahlen und Fakten
 - Aktuelle Statistiken
- Externe Lehrtätigkeit
 - Vorlesungen an Universitäten, Fachhochschulen und Akademien
- Promotionen
- Kuratorium
 - Mitglieder des Kuratoriums
- Organigramm (Stand: 1. Dezember 2014)
- Datenbanken
 - PTB-Publica (Wissenschaftliche Veröffentlichungen)
 - MICert (Zulassungen des Eichwesens)
 - Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien

Inhaltsverzeichnis

Vorwort • Foreword	
Nachrichten des Jahres • News of the Year	8
Fachabteilungen • Scientific Divisions	8
Kuratorium • Advisory Board	18
Präsidium • Presidential Board	21
Qualitätsmanagement • Quality Management	25
Technologietransfer • Technology Transfer	27
Gesetzliches Messwesen • Legal Metrology	28
Technische Zusammenarbeit • Technical Cooperation	30
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit • Press and Information Office	32
Akademische Abschlüsse • Academic Degrees	33
Promotionen • Doctorates	33
Diplom- und Masterarbeiten • (Master) Theses	35
Bachelorarbeiten • Bachelor Theses	36
Zahlen und Fakten • Figures and Facts	38
Berichte der Abteilungen	
Mechanik und Akustik	47
Elektrizität	65
Chemische Physik und Explosionsschutz	79
Optik	91
Fertigungsmesstechnik	103
Ionisierende Strahlung	113
Temperatur und Synchrotronstrahlung	125
Medizinphysik und metrologische Informationstechnik	143
Anhang	
Kuratorium	163
Organigramm	164
Arbeitsgebiete	166
Geländepläne	170

Nachrichten des Jahres • News of the Year

Selbstreferenzierte Quantenstromquelle für die SI-Basiseinheit Ampere

Halbleiter-Einzelelektronenpumpen gelten als vielversprechende Kandidaten für ein zukünftiges Quantennormal der elektrischen Basiseinheit Ampere. An der PTB wurde jetzt erstmals ein Quantennormal aus solchen Einzelelektronenpumpen entwickelt, das einen Strom erzeugt und gleichzeitig die Präzision des erzeugten Stromes unabhängig verifiziert.

Im neuen internationalen Einheitensystem (SI) soll die Definition der Stromstärkeeinheit Ampere durch Festlegung des Wertes der Elektronenladung e erfolgen. Um ein Primärnormal der neudefinierten Basiseinheit zu realisieren, kann man den Fluss einzelner Elektronen durch einen Halbleiterquantenpunkt zeitlich takten. Man spricht dann von einer Halbleiter-Einzelelektronenpumpe, die Elektronen im regelmäßigen Takt einer präzisen Uhr Elektron für Elektron transportiert. Allerdings sind auch solche Pumpen nicht vor Fehlern gefeit: Ab und an kann mal ein Elektron verloren gehen und der Elektronenstrom gerät aus dem Takt. An der PTB ist es nun erstmals gelungen, solche auftretenden Pumpfehler während des Pumpbetriebs in situ nachzuweisen und zu protokollieren. So konnte die genaue Anzahl der tatsächlich transferierten Elektronen pro Taktzyklus – und damit der elektrische

Self-referenced quantum current source for the SI base unit *ampere*

Semiconductor single-electron pumps are regarded as promising candidates for a future quantum standard of the electrical base unit *ampere*. A quantum standard based on such single-electron pumps has now been realized at PTB. It not only generates a current related to the elementary charge e , but it also verifies, for the first time, the precision of this current simultaneously.

In the new International System of Units (SI), the definition of the unit of current, the ampere, is to be defined by fixing the value of the electron charge e . In order to realize a primary standard of the re-defined base unit, the flux of single electrons can be clocked by means of a dynamic semiconductor quantum dot which is, in this case, called a “single-electron pump”. The electrons are transferred one by one, at regular intervals set by an accurate clock. Such pumps are, however, not absolutely flawless: a transfer cycle might fail; the electron current then “loses the beat”. At PTB, the occurrences of such pump errors have now been successfully detected and recorded for the first time during the generation of the nominally quantized current. In this way, the exact number of electrons having been transferred at each cycle – and thus the electric current in units of the elementary charge e – could be stated pre-

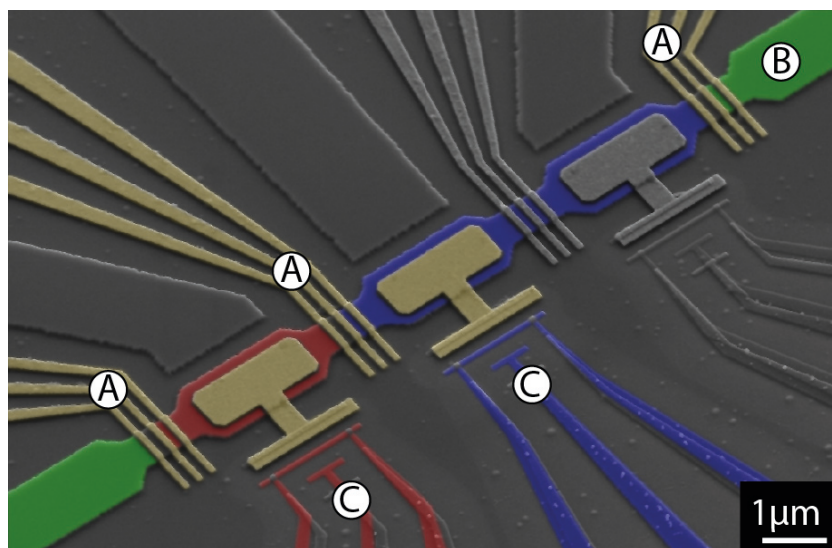


Bild 1: Elektronenmikroskopie-Aufnahme einer selbstreferenzierten Quantenstromquelle. Drei Einzelelektronenpumpen (A) sind in Serie mit einem Halbleiterdraht (B) verbunden. Mit den beiden Einzelelektronendetektoren (C) kann während des Pumpbetriebs überprüft werden, wie viele Elektronen tatsächlich gepumpt worden sind.

Figure 1: Electron micrograph of a self-referenced quantum current source. Three single-electron pumps (A) are connected in series along a semiconductor wire (B). During the operation of the pumps, the two single-electron detectors (C) can check how many electrons have really been transferred.



Bild 2: Die an diesem Projekt beteiligten Wissenschaftler wurden mit dem Helmholtz-Preis 2014 ausgezeichnet (von links): Dr. Nathalie v. Siemens (Schatzmeisterin des Helmholtz-Fonds), Dr. Hans Werner Schumacher, Dr. Frank Hohls, Dr. Bernd Kästner, Dipl.-Phys. Lukas Fricke, Dr. Ralf Dolata, Prof. Dr. Joachim Ullrich (Präsident der PTB und Vorsitzender des Helmholtz-Fonds)

Figure 2: The scientists involved in this project received the Helmholtz Prize 2014: (from left to right) Dr. Nathalie v. Siemens (treasurer of the Helmholtz Fund), Dr. Hans Werner Schumacher, Dr. Frank Hohls, Dr. Bernd Kästner, Dipl.-Phys. Lukas Fricke, Dr. Ralf Dolata, Prof. Dr. Joachim Ullrich (President of PTB and Chairman of the Helmholtz Fund).

Strom in Einheiten der Elementarladung e – präzise angegeben werden. Die in der PTB entwickelte selbstreferenzierte Quantenstromquelle basiert auf drei Einzelelektronenpumpen, die über zwei dazwischenliegende leitende Inseln in Reihe geschaltet sind. Werden die drei Pumpen gleichzeitig im Takt betrieben, bleibt die elektrische Ladung auf den dazwischenliegenden Inseln gleich. Tritt aber zum Beispiel bei der ersten Pumpe ein Fehler auf und während eines Pumptaktes wird kein Elektron transferiert, so reduziert sich die Ladung auf der ersten Insel um genau eine Elementarladung e . Bereits diese winzige Ladungsänderung kann mit an die Inseln angekoppelten Einzelladungsdetektoren zuverlässig nachgewiesen werden. Eine systematische Analyse der Ladungsänderung auf allen Inseln während des Pumpbetriebs erlaubt Rückschlüsse auf die aufgetretenen Fehler und damit eine präzise Korrektur des erzeugten Einzelelektronenstroms. Aktuell arbeitet die Quantenstromquelle noch bei niedrigen Pumpfrequenzen und erzeugt kleine Ströme von nur einigen Attoampere. Zukünftig sollen durch Erhöhung der Pumpfrequenz und der Detektorbandbreite auch deutlich höhere quantisierte Ströme zuverlässig erzeugt werden.

cisely. The self-referenced quantum current source developed at PTB is based on three single-electron pumps that are serially connected via two intermediary conducting islands. If the three pumps are operated synchronously, then the charge on each island remains constant. If, however, an error occurs, for example, at the first pump so that no electron is transferred by this pump, then the charge on the succeeding island is reduced by exactly one elementary charge e . Even such a tiny charge difference can be reliably detected by the single-charge detectors that are coupled to the islands. A systematic analysis of the change in charge on all islands during the operation of the pumps allows conclusions to be drawn on the errors that have occurred, and thus allows a precise correction of the single-electron current generated. The quantum current source is currently still operated at low pump frequencies and generates small currents of only a few attoamperes. In future, however, it is planned to generate considerably stronger quantized currents reliably by increasing the pump frequency as well as the detector bandwidth.

Untersuchungen zu Zellschädigungen bei Operationen des grauen Stars

Pro Jahr wird bei ca. 800 000 Menschen in Deutschland die altersbedingt getrübbte Augenlinse operativ – mithilfe von Ultraschall – entfernt und durch eine Kunstlinse ersetzt. Nach der Operation des grauen Stars werden bei der überwiegenden Mehrzahl der Patienten Schädigungen der auf der Innenseite der Hornhaut liegenden Endothelzellen beobachtet. In einem interdisziplinären Forschungsprojekt mit Beteiligung von Augenärzten konnten an der PTB nun neue Erkenntnisse über die mögliche Ursache für diese Zellschädigungen erzielt werden.

Verschiedene Prozesse führen während der Operation zu einer Temperaturerhöhung im Auge. Wie sich diese auswirkt, wurde nun in Experimenten an Schweineaugen überprüft. Hierzu wurde die Temperaturentwicklung bei unterschiedlichen Operationsszenarien und Geräteeinstellungen gemessen. An denselben Augen konnte mit verschiedenen Methoden die Zellschädigung quantifiziert und auf eine Korrelation mit den zuvor gemessenen Temperaturwerten überprüft werden. Nur unter extremen, das heißt in der Praxis nur im Ausnahmefall auftretenden Bedingungen konnten Temperaturen im für Zellen kritischen Bereich zwischen 40 °C und 50 °C nachgewiesen werden. Die mathematische Beschreibung dieser Prozesse ermöglichte eine Lokalisierung und Quantifizierung der Wärmequellen sowie eine numerische Simulation der Wärmeverteilung innerhalb des Auges. Hieraus ergaben sich konkrete Sicherheitsempfehlungen, die für eine Reduktion der thermischen Belastung auf ein als unkritisch anzusehendes Maß sorgen können. Bei den üblichen Geräteeinstellungen zeigten die Experimente dagegen nur moderate Temperaturerhöhungen am Endothel von maximal 2,5 °C, wobei auch keine Korrelation der Zellschädigung mit den gemessenen Temperaturwerten festgestellt werden konnte. Die vollständige Klärung für das Auftreten dieser Zellschäden steht noch aus.

Beispiel eines Schadens am Hornhautendothel nach einer Ultraschalloperation eines Schweineauges

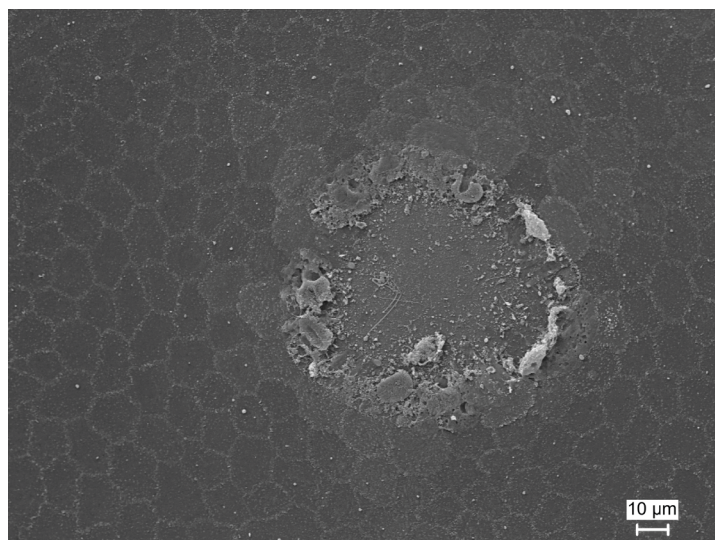
Example of damage to the corneal endothelium of a porcine eye after ultrasonic surgery

Investigations of cell damage during cataract surgery

Every year in Germany, approx. 800,000 persons are treated for cataracts, a disease which is related to age and in which the lens has become clouded and must be removed – by means of ultrasound – and be replaced with an artificial lens. After cataract surgery, damage to endothelial cells located on the inner side of the cornea is observed in the majority of patients. Within the scope of an interdisciplinary research project in which ophthalmologists were involved, new findings with regard to the possible cause of this cell damage could be achieved at PTB.

Different processes lead to a temperature rise inside the eye during surgery. The effects of this temperature rise have now been investigated by means of experiments using porcine eyes. For this purpose, the temperature development was measured under various surgery scenarios and at different settings of the instruments used. The cell damage to these same eyes could then be quantified by means of different methods, and a possible correlation with the previously measured temperature values was assessed. Under extreme – i.e. in practice only exceptionally occurring – conditions, however, high temperatures in the range between 40 °C and 50 °C, which is critical for cells, could be detected. The mathematical description of these processes allowed the heat sources to be localized and quantified and the thermal distribution inside the eye to be numerically simulated. From these data, concrete safety recommendations were elaborated to ensure a reduction of the thermal load to an acceptable level. In contrast, the experiments have shown that the instrument settings used in general practice only lead to moderate temperature rises of the endothelium of max. 2.5 °C, and correlations between the cell damage and the tem-

peratures measured could also not be established. The occurrence of such cell damage has still not been fully clarified.



DFG fördert Braunschweiger Graduiertenkolleg „NanoMet“

Die *Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)* fördert das Graduiertenkolleg „Metrologie für komplexe Nanosysteme“ der Technischen Universität Braunschweig und der PTB. Mit rund 3,7 Millionen Euro werden zunächst für die kommenden viereinhalb Jahre die Forschungsprojekte von 26 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftlern im Bereich der genauen Messung von ultrakleinen und ultrapräzisen Objekten unterstützt. Unter der Leitfrage „Wie genau misst man Nanostrukturen?“ gilt das Hauptaugenmerk komplexen Nanoobjekten, wie hochintegrierten Chips, biologischen Nanostrukturen und Nanopartikeln für den medizinischen Einsatz.

In biologischen Systemen kann es sich bei Messgrößen um die Konzentration von großen Biomolekülen oder die virale Belastung in Körperflüssigkeiten handeln. Entstehende Gesundheitsmarker, wie z. B. Proteine, können spezielle Fehlfunktionen des Körpers anzeigen. Sie treten in den unterschiedlichsten Milieus auf, mit einer großen Anzahl dazu in Beziehung stehender interferierender oder wechselwirkender Verbindungen. Somit können sogar kleine Abweichungen von der erwarteten Konzentration von speziellen Biomarkern oder ihr bloßes Auftreten bei extrem niedrigen Konzentrationsniveaus wesentlich oder fatal sein und sind daher von kritischer diagnostischer Bedeutung. Typischerweise basiert das Wissen über diese Marker auf immuno-chemischen Methoden in Routinemessungen. Ziel der messtechnischen Forschung ist es, für solche Marker höhere Messgenauigkeiten zu erreichen (wenn möglich durch Primärmessmethoden), um durch die eindeutige Identifizierung und genaue Quantifizierung Referenzpunkte für Messungen solcher Marker bereitstellen zu können.

Im Graduiertenkolleg NanoMet sollen neue nanotechnologische Strategien angewendet werden, um metrologisch fundierte Messergebnisse zu erhalten, d. h. solche, die auf die SI-Einheiten rückführbar sind und deren Messunsicherheit bekannt ist. Im ersten Fall sollen nanobiotechnologische Werkzeuge eingesetzt werden, um die betreffenden Objekte (Analyte) so zu manipulieren und zu spalten, dass sie für etablierte Primärmessverfahren zugänglich werden (zum Beispiel durch Anwendung von Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie). Im zweiten Fall sollen die spezifischen Eigenschaften von maßgeschneiderten Nanostrukturen genutzt werden, um neue Referenzmesstechnologien zu ermöglichen. Eine gänzlich neue Technologie dieser Art ist die oberflächenverstärkte Isotopenverdünnungs-Raman-Spektrometrie.

DFG promotes Braunschweig Research Training Group “NanoMet”

On 9 May 2014, the *Deutsche Forschungsgemeinschaft (German Research Foundation – DFG)* decided to promote the Research Training Group “Metrology for Complex Nanosystems” of the Technical University of Braunschweig and the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). With a total funding amount of approx. 3.7 million euros, the research projects of 26 young scientists in the field of accurate measurement of ultrasmall and ultraprecise objects will be supported initially for the next four and a half years. The main focus of the central question “How accurately does one measure nanostructures?” will be put on complex nano-objects, such as highly integrated chips, biological nanostructures and nanoparticles for medical use.

In biological systems, measurands may be the concentration of large biomolecules or the viral load in bodily fluids. Emerging health markers such as proteins can be indicative of specific bodily malfunctions. They occur in an extremely diverse environment with a large number of related interfering or interacting compounds. Hence, even small deviations from the expected concentration of specific biomarkers or their mere appearance at extremely low concentration levels can be essential or, in contrast, fatal and are therefore of critical diagnostic importance. Typically, the knowledge about these markers is based on immunochemical methods in routine measurements. Those tools often lack specificity, especially when they are applied in the complex environment of a bodily fluid or cell. Cross-reactions can lead to massive deviations of measurement results between routine tools for the same analyte. The metrological research of NanoMet aims to provide higher accuracy, if possible through primary measurement methods, for the unambiguous detection and precise quantification of such markers as reference tools.

New nanotechnological strategies will be employed here in the NanoMet Research Training Group to achieve metrologically sound measurements, i.e. to gain results that are traceable to SI units and have a known measurement uncertainty. In the first case, nanobiotechnological tools will be used to manipulate and cleave the objects (analytes) of interest in such a way that they become accessible to established primary measurement procedures using, for example, Isotope Dilution Mass Spectrometry. In the second case, the specific properties of tailor-made nanostructures will be exploited to enable new reference measurement technologies. An entirely novel technology of this kind is Isotope Dilution Surface Enhanced Raman Spectrometry.

Neue Grenze für zeitliche Änderungen von Naturkonstanten

Schon bald nach der Beobachtung der Expansion des Universums in den 1930er Jahren begannen Physiker zu spekulieren, ob in solch einer dynamischen Welt überhaupt konstante Größen bestehen können. Seitdem hat man über Beobachtungen der Astro- und Geophysik nach Hinweisen auf Veränderungen von Naturkonstanten über kosmologische Zeiträume von Milliarden von Jahren gesucht. Das Ergebnis waren teilweise widersprüchliche Schlussfolgerungen. In den letzten Jahren haben Laborexperimente mit Atomuhren eine Genauigkeit erreicht, die bereits mit Messungen über einen Zeitraum von wenigen Jahren einen Beitrag zu dieser Frage leisten können. Zwei Atomuhren, die auf unterschiedlichen Elementen beruhen, würden bei einer Änderung bestimmter Naturkonstanten im Laufe der Zeit auf eine vorhersagbare Weise voneinander abweichen. Mit dieser Methode wurde an der PTB durch Vergleiche zwischen einer optischen Uhr mit einem gespeicherten Ytterbium-Ion und Caesium-Atomuhren die Konstanz einer wichtigen Größe überprüft: des Massenverhältnisses von Proton und Elektron. Ein Proton ist etwa 1836-mal schwerer als ein Elektron und unterliegt zusätzlich zur elektromagnetischen Kraft auch der sogenannten starken Kraft, die für die Struktur und den Zusammenhalt der Atomkerne verantwortlich ist. Bei veränderlichen Naturkonstanten denkt man insbesondere an Änderungen in der relativen Stärke dieser Kräfte, und dies hätte wiederum einen Einfluss auf die Massen der beteiligten Teilchen.

Die Masse des Elektrons bestimmt die Frequenz der optischen Atomuhren, die Protonenmasse erscheint in der Frequenz der Caesium-Uhr (über die Eigenschaften des Atomkerns). Bei der Entwicklung der Atomuhren wurden die Caesium-Uhr und die Ytterbium-Uhr an der PTB in den letzten Jahren immer wieder – und mit zunehmender Genauigkeit – verglichen. Zurzeit gehören sie zu den genauesten Atomuhren im Mikrowellen- bzw. im optischen Frequenzbereich. Aus diesen Daten konnte jetzt abgeleitet werden, dass das Massenverhältnis von Proton und Elektron keine nachweisbare Veränderung zeigt, bis auf eine relative Unsicherheit von nur wenigen 10^{-16} pro Jahr. Damit wäre selbst über das Alter unseres Sonnensystems von etwa 5 Milliarden Jahren extrapoliert nur eine Änderung dieser Naturkonstante um einen millionstel Teil möglich, und sie kann weiterhin als universelle und stabile Größe betrachtet werden.

New limits for temporal changes in fundamental constants

Soon after observing the expansion of the Universe in the 1930s, physicists started to speculate whether in such a dynamic universe, constant quantities could exist at all or whether also the so-called “fundamental constants” are subject to temporal changes which could give us information on the structure and the development of the Universe. Since then, one has sought to find evidence of changes undergone by fundamental constants over cosmologic periods of billions of years by means of astrophysical and geophysical observations. The results allowed somewhat contradictory conclusions. In the past few years, laboratory experiments with atomic clocks have attained such an accuracy that it is already possible to contribute to the answer to this question by studying a period of just a few years. If certain fundamental constants changed, then two atomic clocks which are based on different elements would deviate from each other in a predictable manner over time. This method was used at PTB to check the constancy of an essential physical quantity – the mass ratio of protons to electrons – by comparing an optical clock with a trapped ytterbium ion and caesium atomic clocks. A proton is approx. 1836 times heavier than an electron and, in addition to being subject to the electromagnetic force, it is also subject to the so-called “strong interaction”, which is responsible for the structure and the cohesion of atomic nuclei. Variable fundamental constants would lead to changes in the relative strength of these forces, which, in turn, would have an influence on the masses of the particles involved.

The mass of the electron determines the frequency of the optical atomic clocks; the mass of the protons shows in the frequency of the caesium clock (via the properties of the atomic nucleus). When developing the atomic clocks, the caesium clock has repeatedly been compared with the ytterbium clock at PTB over the past few years – with increasing accuracy. These are currently among the most accurate atomic clocks in the microwave and the optical frequency range, respectively. From these data, it was now possible to conclude that the mass ratio of protons to electrons shows no detectable change up to a relative uncertainty of only a few parts per 10^{-16} per year. Thus, even when extrapolating across the age of our solar system (i.e. approx. 5 billion years), this means a change in this fundamental constant of less than one part in a million, so that it can still be considered a universal and stable quantity.

Fertigung von Siliziumkugeln für das Avogadroprojekt

Im Rahmen des Avogadroprojektes zeigten Messungen an den beiden im Australian Centre for Precision Optics gefertigten ^{28}Si -Kugeln Kontaminationen der Oberflächen mit Kupfer und Nickel. In der Folge musste die Messunsicherheit für das Kugelvolumen erhöht werden. Die resultierende Gesamtunsicherheit für die Avogadro-Konstante betrug $3 \cdot 10^{-8}$. Da dieser Unsicherheitswert für die geplante Neudefinition des Kilogramms noch nicht hinreichend ist, wurde beschlossen, eine Verbesserung der Form und der Oberflächeneigenschaften der Kugeln durch eine Nachbearbeitung in der PTB zu realisieren. Auch die Fertigung weiterer Siliziumkugeln für das Projekt soll in Zukunft hier durchgeführt werden. In der Arbeitsgruppe „Fertigungstechnologie“ wurden daher neuartige mehrstufige Verfahren entwickelt, mit denen deterministisch und reproduzierbar vom Rohling bis zum Finishing die gewünschten Eigenschaften erreicht werden können.

Zur Fertigstellung der Silizium-Kugel Avo28-S5 wurde eine besonders stabil laufende Verfahrensvariante gewählt, mit der Formabweichungen von weniger als 35 nm reproduzierbar erreicht werden. Nur die Kristalleigenschaften limitieren hier noch die Formabweichung. Die deutlich erkennbare Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften steht in hervorragender Übereinstimmung mit der Literatur. Eine weitere Verfahrensvariante führte bereits zu Formabweichungen von nur 25 nm. Dieses ebenfalls maschinell durchgeführte Verfahren wird derzeit weiterentwickelt.

Mit der bereits erreichten und den zu erwartenden Verbesserungen bei Form- und Oberflächenqualität der in der PTB gefertigten Siliziumkugeln rückt eine relative Gesamtmessunsicherheit für die Bestimmung der Avogadro-Konstante von kleiner $2 \cdot 10^{-8}$ in greifbare Nähe.

Die verschiedenen Entwicklungsstufen bei der Fertigung einer Siliziumkugel

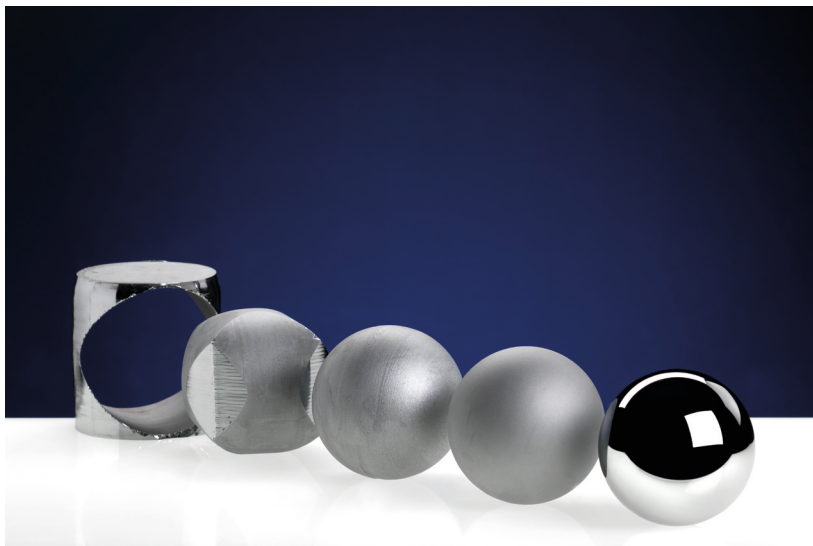
The different development phases in the manufacturing of a silicon sphere

Manufacturing silicon spheres for the Avogadro Project

Measurements carried out within the scope of the Avogadro Project have shown copper and nickel contaminations of the surfaces of the two ^{28}Si spheres which had been manufactured at the Australian Centre for Precision Optics. Consequently, the measurement uncertainty for the sphere volume had to be increased. The resulting total uncertainty for the Avogadro constant amounted to $3 \cdot 10^{-8}$. Since this uncertainty value does not suffice for the planned redefinition of the kilogram, it was determined that the shape and the surface properties of the spheres should be improved at PTB. Also, further silicon spheres for this project are to be manufactured at PTB in the future. The “Manufacturing Technology” Working Group therefore developed novel, multi-phase procedures in order to attain the desired properties deterministically and reproducibly, from the ingot to the finishing stage.

To manufacture the silicon sphere Avo28-S5, a particularly stable procedure variant was chosen which allows form errors of less than 35 nm to be attained reproducibly. Solely the crystal properties still limit the form error. The clearly visible directional dependence of the material properties is in excellent agreement with the literature. Another procedure variant has already led to form errors of only 25 nm. This machine processing procedure is currently being further developed.

With the improvements already obtained in terms of form and surface quality and those to be expected for the silicon spheres manufactured at PTB, a total relative uncertainty of smaller than $2 \cdot 10^{-8}$ is within reach for the determination of the Avogadro constant.



Kooperation mit dem Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum (HIT)

Die Verwendung von Ionenstrahlung zur therapeutischen Bestrahlung von Krebspatienten kann deutliche biologische und physikalische Vorteile gegenüber einer konventionellen Strahlentherapie mit Photonen oder Elektronen aufweisen. So erlaubt das invertierte Tiefendosisprofil der Ionen eine hohe lokale Dosisdeposition bei gleichzeitiger Schonung des gesunden Gewebes. Am Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum (HIT) werden seit November 2009 mithilfe des „intensitätsmodulierten Rasterscan-Verfahrens“, bei dem der Teilchenstrahl mittels magnetischer Ablenkung hochpräzise über das Tumorgewebe bewegt wird, Protonen und Kohlenstoffionen in der Tumorthherapie eingesetzt.

Jede Strahlentherapie verlangt jedoch auch nach einer sehr genauen Dosimetrie, mit der die Qualität der Bestrahlung verifiziert und gesichert werden kann. Die Dosimetrie von Ionenstrahlung hat bis heute allerdings noch nicht die gleiche Präzision erreicht wie für konventionelle, hochenergetische Photonenstrahlung: Die relative Standardmessunsicherheit von ca. 3 % bei Ionen ist rund dreimal so hoch wie bei hoch-energetischen Photonen.

Das HIT und die PTB haben sich zum Ziel gesetzt, die erzielbaren Messunsicherheiten in der Dosimetrie von Ionenstrahlen deutlich zu verbessern. Dafür wird ein transportables Wasserkalorimeter der PTB benutzt, mit dem die grundlegende Messgröße in der Dosimetrie, die Wasser-Energiedosis, im Kohlenstoffstrahl direkt und absolut gemessen werden soll. Dazu müssen die Bestrahlungsbedingungen am HIT so optimiert werden, dass mithilfe des „Rasterscan-Verfahrens“ eine möglichst homogene Dosisverteilung mit hoher Reproduzierbarkeit am Messort des Kalorimeters erzielt wird. Mithilfe eines speziell konstruierten wasseräquivalenten Phantoms können die dafür notwendigen Messungen der Strahleigenschaften auch bei Abwesenheit des Wasserkalorimeters durchgeführt werden.

Wasserkalorimeter der PTB für absolute Dosismessungen im Kohlenstoff-Strahl des HIT. Das zusätzlich gezeigte Phantom wurde zur Messung und Optimierung der Strahleigenschaften benutzt.

Water calorimeter of PTB for absolute dose measurements in HIT's carbon ion beam. The additional phantom shown was used to measure and optimize the beam parameters.

Cooperation with the Ion-Beam Therapy Center (HIT) in Heidelberg

The use of ions for the therapeutic irradiation of cancer patients can show clear biological and physical advantages compared to conventional radiation therapy with photons or electrons. The ions' inverted depth dose profile allows, for example, a high local dose deposition while simultaneously sparing the surrounding healthy tissue. At the Heidelberg Ion-Beam Therapy Center (HIT), protons and carbon ions have been used in the treatment of tumours since November 2009, using the so-called "intensity-controlled raster scan technique" where the particle beam is moved with high precision over the tumour tissue by magnetic deflection.

Each radiotherapy, however, also requires high-precision dosimetry to verify and ensure the quality of the irradiation. The precision with which conventional, high-energy photon radiation can be measured has not yet been reached with ion radiation: with approx. 3 %, the relative standard measurement uncertainty for ions is about three times as high as for high-energy photons.

Within the scope of a cooperation between HIT and PTB, the aim is to significantly improve the achievable measurement uncertainties in the dosimetry of ion radiation. For this purpose, a transportable water calorimeter of PTB is used to measure directly and absolutely the fundamental quantity of dosimetry – the absorbed dose to water – in the carbon ion beam. To this end, the irradiation conditions at HIT have to be optimized in such a way that with the aid of the "raster scan technique", a dose distribution as homogeneous as possible is reached with great reproducibility at the measurement point of the calorimeter. The required measurements for the optimization of the beam parameters can be carried out using a specially designed water-equivalent phantom even

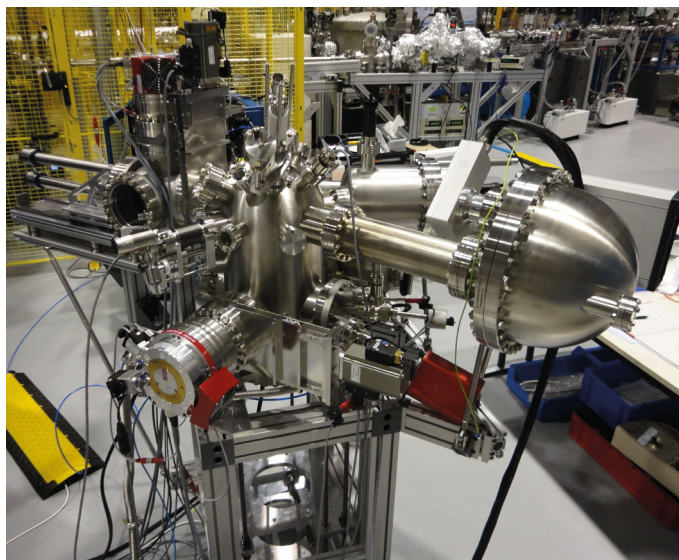
when the water calorimeter is not there.



Neue Instrumentierung für die quantitative Oberflächenanalytik von Siliziumkugeln

Nach anderthalbjähriger Konstruktions- und Aufbauphase wurde in Berlin-Adlershof eine Apparatur zur metrologischen Charakterisierung der Oberfläche von 1 kg schweren Siliziumkugeln, die zur Neubestimmung der Avogadro-Konstante genutzt werden, in Betrieb genommen. Ziel dieser Instrumentierung ist die genaue Bestimmung der Dicke der Oxidschicht an der gesamten Kugeloberfläche sowie die Bestimmung der Stöchiometrie dieser Schicht. Desweiteren sollen potenzielle Oberflächenkontaminationen, die sich bei der Herstellung, dem Transport oder der Lagerung dieser hochreinen Siliziumkugeln angelagert haben könnten, quantitativ bestimmt werden. Dazu verfügt die neue Instrumentierung für die Oberflächenanalytik über eine monochromatische Röntgenquelle, einen Fluoreszenzdetektor sowie ein Elektronenspektrometer. Die Bestrahlung der Oberfläche mit Al K_α -Photonen der Energie von 1486,7 eV erlaubt u. a. die Anregung von Übergangsmetallen sowie von leichteren Elementen wie Sauerstoff und Kohlenstoff. Die Analyse der von diesen Elementen an der Oberfläche ausgehenden Röntgenfluoreszenzstrahlung mittels eines hinsichtlich seiner Detektionseffizienz sowie Ansprechverhaltens radiometrisch charakterisierten Detektors ermöglicht die quantitative Bestimmung der Massendeposition dieser Elemente. Desweiteren verfügt die Instrumentierung über einen hochauflösenden Photoelektronendetektor, mit dem die Stöchiometrie der Siliziumoxidschicht bestimmt wird. Kernstück der neuen Instrumentierung ist ein ultrahochvakuumtauglicher Kugelmanipulator, mit dessen Hilfe jeder Punkt auf der Oberfläche im Strahlengang positioniert werden kann. In der nächsten Zeit steht eine umfassende Charakterisierung der Instrumentierung an, ehe sie im Routinebetrieb für die quantitative Analyse der Oberfläche von Siliziumkugeln genutzt werden wird.

Apparatur zur metrologischen Charakterisierung der Oberfläche von 1 kg schweren Siliziumkugeln



Apparatus for the metrological characterization of the surface of silicon spheres (1 kg)

New instrumentation for the quantitative surface analysis of silicon spheres

After a design and development phase of one and a half years, an apparatus for the metrological characterization of the surface of 1 kg silicon spheres, which are used for the redefinition of the Avogadro constant, has been put into operation in Berlin-Adlershof. The objective of this instrumentation is the exact determination of the thickness of the oxide layer on the whole sphere surface as well as the determination of the stoichiometry of this layer. In addition, potential surface contaminations which might have accumulated during the manufacture, the transport or the storage of these high-purity silicon spheres are to be determined quantitatively. For this purpose, the new instrumentation for surface analysis is equipped with a monochromatic X-ray source, a fluorescence detector and an electron spectrometer. The irradiation of the surface with Al K_α photons of an energy of 1486.7 eV allows, among other things, transition metals and lighter elements such as oxygen and carbon to be excited. The analysis of X-ray fluorescence radiation, which emanates from the surface of these elements, by means of a detector which has been radiometrically characterized with respect to its detection efficiency and response behaviour, makes the quantitative determination of the mass deposition of these elements possible. In addition, the instrumentation is equipped with a high-resolution photoelectron detector which allows the stoichiometry of the silicon oxide layer to be determined. The core piece of the new instrumentation is a sphere manipulator suited for the ultra-high vacuum which allows each point on the surface to be positioned in the beam path. In the near future, the instrumentation will be comprehensively characterized before it is used in routine operation for the quantitative analysis of the surface of silicon spheres.

routine operation for the quantitative analysis of the surface of silicon spheres.

Markierungsfreie durchflusszytometrische Zelldifferenzierung mittels kombinierter optischer und Impedanzmessungen in mikrofluidischen Strukturen

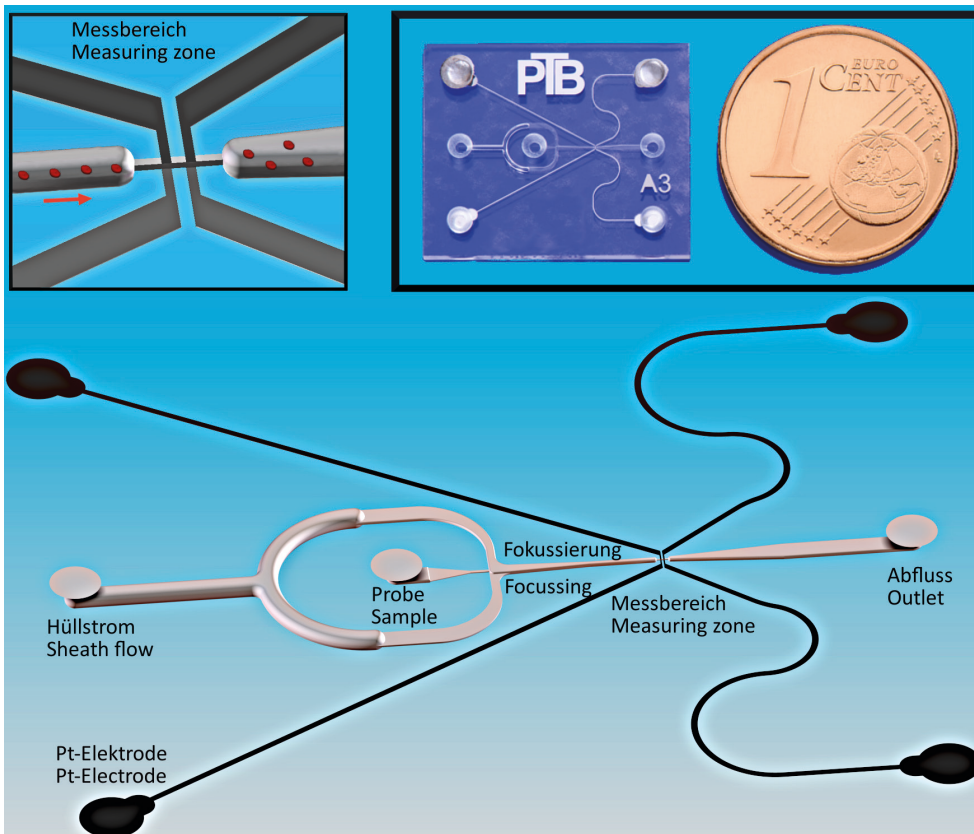
Die durchflusszytometrische Zählung von Zellen ist ein etabliertes Verfahren in der Laboratoriumsmedizin und dient der Unterstützung der Diagnostik in der Hämatologie, Immunologie, Onkologie und Transfusionsmedizin. Neben der Hochdurchsatz-Analyse der Proben in Zentrallaboratorien gibt es eine steigende Nachfrage nach einfacher und schneller Vor-Ort-Analytik für verschiedene Anwendungen. Dazu zählen unter anderem die Notfallmedizin, Entscheidungen zur Transfusion bei Operationen und die Diagnose und Therapiekontrolle bei HIV-Patienten in Entwicklungsländern. Von besonderem Interesse sind dabei Schnelltests, bei denen keine – in der Regel zeitaufwendige – Markierung der Zellen bzw. keine Zerstörung der roten Blutzellen durch Hämolyse erforderlich sind. Um die für solche Vor-Ort-Tests notwendigen einfach handhabbaren Einwegkartuschen zu entwickeln, werden vermehrt Untersuchungen an mikrofluidischen Baugruppen durchgeführt.

In der PTB wurden in Zusammenarbeit mit der TU Berlin und der RWTH Aachen mikrofluidische Strukturen entwickelt und systematische Untersuchungen der Impedanz-Eigenschaften einzelner

Label-free flow cytometric cell differentiation by combined optical and impedance measurements in micro-fluid structures

Flow cytometric counting of cells is an established procedure in laboratory medicine and serves to support the diagnosis in haematology, immunology, oncology and transfusion medicine. Besides high-throughput analysis of the samples in central laboratories, there is an increasing demand for simpler and faster point-of-care tests for different applications. These include – among other things – emergency medicine, decisions on transfusions during surgery, and the diagnosis as well as the monitoring of therapy in HIV patients in developing countries. Of particular interest are rapid tests where – usually time-consuming – cell labelling or destruction of red blood cells by haemolysis is not necessary. To develop easy-to-handle disposable cartridges as are required for such point-of-care-tests, research as well as engineering activities in the field of microfluidic-based devices are being conducted increasingly.

At PTB, micro-fluid structures have been developed in cooperation with the TU Berlin and the RWTH Aachen. Impedance properties of single blood cells have been analysed systematically in the frequency range between 400 kHz and 100 MHz. Using the micro-fluid sensor shown in the figure, which allows simultaneous detection of side scatter of light and electric impedance, blood platelets (Plt), red blood cells (RBC) and the subpopulations of the white blood cells, the lymphocytes



and electric impedance, blood platelets (Plt), red blood cells (RBC) and the subpopulations of the white blood cells, the lymphocytes

Bild 1: Design der mikrofluidischen Struktur zur Messung von Wechselspannungs-Impedanzsignalen einzelner Blutzellen

Figure 1: Layout of the micro-fluid structure for the measurement of alternating current impedance signals of single blood cells

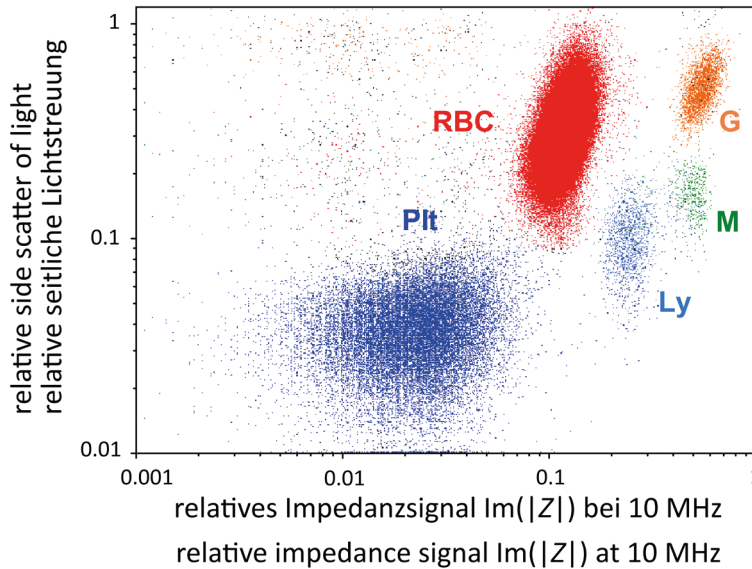


Bild 2: Differenzierung von weißen und roten Blutzellen und Blutplättchen durch simultane Messung des Streulichtes und der Impedanz

Figure 2: Differentiation of white and red blood cells and of blood platelets by simultaneous measurement of the scattered light and the impedance

Blutzellen im Frequenzbereich von 400 kHz bis 100 MHz durchgeführt. Mit dem in der Abbildung gezeigten mikrofluidischen Sensor ist es erstmals gelungen, durch die Kombination von seitlicher Lichtstreuung und elektrischen Impedanzmessungen Blutplättchen (Plt), rote Blutzellen (RBC) und die Subpopulationen der weißen Blutzellen, die Lymphozyten (Ly), Granulozyten (G) und Monozyten (M), mit einer einzigen Messung zu differenzieren. Abgesehen von der Verdünnung der Probe sind keine weiteren Präparationen erforderlich, um mit dieser Methode das sogenannte erweiterte Kleine Blutbild zu messen.

Die Ergebnisse belegen, dass auf eine Hämolysse beim Nachweis weißer Blutzellen verzichtet werden kann und für bestimmte Anwendungen immunologische Färbungen nicht erforderlich sind. Sogar die kleinsten korpuskularen Blutbestandteile, die Blutplättchen, können in mikrofluidischen Strukturen zuverlässig detektiert werden. Damit sind die Grundlagen geschaffen für die Entwicklung spezifischer Einwegkartuschen mit integriertem Sensor für kombinierte optische und Impedanzuntersuchungen, beispielsweise zur schnellen Konzentrationsbestimmung von Blutplättchen im Operationssaal oder zur Differenzierung weißer Blutzellen im Vollblut bei Neugeborenen oder Patienten mit Lyse-resistenten roten Blutzellen.

(Ly), granulocytes (G) and monocytes (M), were differentiated. These results demonstrate, for the first time, that combined light scatter and impedance detection allow differentiation of red and white blood cells and of platelets in a single measurement. Apart from the dilution of the sample, no additional preparations are required to measure the so-called “extended” Complete Blood Count when applying this method.

The results show that for the detection of white blood cells, haemolysis can be avoided, and that for selected applications, immunostaining is not required. Even the smallest corpuscular blood components, the thrombocytes or blood platelets, can be reliably detected in micro-fluid structures. Thus, the basis has been created for the development of specific disposable cartridges with an integrated sensor for combined optical and impedance measurements. Potential applications include, e.g., the rapid determination of concentrations of blood platelets during surgery and the differentiation of white blood cells in the whole blood of newborns or in blood samples of patients with lysis-resistant red blood cells.

65. Tagung des Kuratoriums

Am 22. und 23. Mai 2014 traf sich das Kuratorium der PTB zu seiner traditionellen Tagung, diesmal im Institut Berlin der PTB. Am ersten Tag trugen drei wissenschaftliche Nachwuchskräfte über ihre Arbeiten vor. Den Anfang machte PTB-Doktorand Steffen Buschschlüter zu der Frage „Operation des grauen Stars: Kann Wärmeentwicklung bei der Phakoemulsifikation gefährlich werden?“ Hierzu hat er ein Messverfahren entwickelt und mit seinen numerischen Simulationen abgeglichen, um die Temperaturentwicklung im Auge während der Behandlung mit intensivem Ultraschall zu bestimmen. Danach stellte Dr. Nils Huntemann das zentrale Ergebnis seiner Dissertation an der PTB vor: „Eine optische Uhr höchster Genauigkeit, basierend auf dem Oktupol-Übergang von $^{171}\text{Yb}^+$ “. Und schließlich berichtete Dr. Cornelia Streeck über das Thema ihrer Promotionsarbeit, die „Röntgenspektrometrie an photovoltaischen CIGS-Dünnschichten“. Schwerpunkt des ersten Tages allerdings waren die Informationsbesuche der Kuratoriumsmitglieder in den Forschungs- und Dienstleistungslabors sowie die intensiven Fachgespräche im kleinen Kreis in den Abteilungen. Hier konnten sich die Kuratoren über die neuesten Entwicklungen der fachlichen Arbeit informieren und dazu ihren Rat aus der Praxis geben.

In der Sitzung des Kuratoriums am zweiten Tag berichtete zunächst der Vorsitzende des Kuratoriums, MinDir Detlef Dauke (Abteilungsleiter Innovations-, IT- und Kommunikationspolitik des BMWi), über die politischen Entwicklungen, soweit sie die PTB betreffen. Neben der Energiewende wird sich das BMWi verstärkt dem Innovationsgedanken zuwenden – Themen, zu denen die PTB durch ihre Forschungsarbeit und den nachfolgenden Technologietransfer in die Wirtschaft beiträgt. Von besonderer Wichtigkeit ist die Verabschiedung des Mess- und Eichgesetzes, welches der PTB neue wichtige Aufgaben überträgt. Dazu gehört die Einrichtung einer Konformitätsbewertungsstelle ebenso wie die Koordinierung des gesetzlichen Messwesens auf nationaler Ebene, z. B. durch Leitung des Ausschusses der Konformitätsbewertungsstellen und des Regelermittlungsausschusses. Weniger Fortschritte als erhofft gibt es bei der Schaffung wissenschaftsfreundlicher Rahmenbedingungen für die PTB, wie sie im Zuge der Verabschiedung des Wissenschaftsfreiheitsgesetzes beabsichtigt waren. Hier wird das BMWi weiterhin auf die Beseitigung bestehender Widerstände hinarbeiten.

The 65th meeting of the “Kuratorium” (Advisory Board)

The “Kuratorium” of PTB met on 22 and 23 May 2014 for its traditional annual meeting which this time took place at the Berlin Institute. On the first day, three junior scientists presented their work. PTB doctoral candidate Steffen Buschschlüter began by talking about “Cataract operations: Could heat development during phacoemulsification possibly be dangerous?” To find out, he developed a measurement procedure which he then compared with the results of his numerical simulations to determine the temperature development inside the eye throughout the operation with intense ultrasound. Following this, Dr. Nils Huntemann presented the central result of his doctoral thesis which he worked on at PTB: “An optical clock of the highest accuracy, based on the octupole transition of $^{171}\text{Yb}^+$ ”. And finally, Dr. Cornelia Streeck reported on her doctoral thesis, namely “X-ray spectrometry on photovoltaic CIGS thin films”. On the first day, however, the meeting mostly focused on gaining information through visits of the members of the “Kuratorium” to the research and service laboratories as well as on intensive talks in small groups in the divisions. This enabled the members of the Kuratorium to receive information about the latest developments in PTB’s fields of activities and to provide practical advice.

On the second day, the Chairman of the Kuratorium, Detlef Dauke (Head of the Directorate General “Innovation, IT and Communications Policy” at the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi)) gave an account of the political developments that are relevant to PTB. Besides the energy transition, the Ministry will increasingly focus its efforts on innovation – areas which PTB contributes to through its research activities and the resulting process of technology transfer to industry. One of the central points is the adoption of the Measures and Verification Act which confers important new tasks upon PTB. One of these tasks is the setting up of a conformity assessment body as well as the coordination of legal metrology at the national level (e.g. by heading the Committee for Conformity Assessment Bodies and the Rule Determination Committee). Less progress than had been hoped for and intended when the Scientific Freedom Act had been adopted has been achieved in providing science-friendly framework conditions for PTB. Here, the Ministry will carry on working to overcome the current objections.



Bild 1: Gruppenbild der Teilnehmer an der 65. Tagung des Kuratoriums der PTB 2014

Figure 1: Group photo of the participants of the 65th meeting of the PTB Kuratorium in 2014

Schwerpunkt der Sitzung war der Bericht des PTB-Präsidenten. Professor Ullrich stellte zunächst die aktuellen Ergebnisse der PTB im Zuge der angestrebten Neudefinition der internationalen Einheiten auf der Basis von festgelegten Naturkonstanten vor. Beim Avogadro-Projekt, der Bestimmung der Avogadro-Konstante durch Abzählen der Atome in einer nahezu isotopenreinen Kugel aus einkristallinem ^{28}Si , gibt es deutliche Fortschritte auf dem Weg zu immer kleineren Unsicherheiten, insbesondere durch die stete Verbesserung der Poliermethoden, die die extreme Rundheit der Kugel sicherstellen. Auch das Experiment zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante und die Arbeiten zu optischen Atomuhren und zu Einzelelektronenschaltungen gehen sehr gut voran. Im Dienstleistungsbereich konnten einige neue Verfahren in die Anwendung gebracht werden, z. B. die Kalibrierung elektrischer Größen mit Quantenstandards, die auch in privaten Kalibrierlaboratorien praktikabel handhabbar sind. Die internationale Wertschätzung für die PTB in ihrer Rolle als führendes Metrologieinstitut auf dem Gebiet der Darstellung der grundlegenden Einheiten drückt sich auch darin aus, dass Professor Ullrich von den Mitgliedern der Meterkonvention zum Präsidenten des Beratenden Komitees für die Einheiten (CCU) der Meterkonvention berufen wurde.

The meeting then continued with the report delivered by the President of PTB. Professor Ullrich first presented the current results of PTB within the scope of the envisaged redefinition of the international units based on defined fundamental constants. In the case of the Avogadro Project (the determination of the Avogadro constant by counting the atoms in a practically isotopically pure sphere made of single-crystal ^{28}Si), clear progress has been made towards ever lower uncertainties, especially due to constantly improving polishing methods that ensure the extreme roundness of the sphere. Also the experiment for the determination of the Boltzmann constant and the activities related to optical atomic clocks and single-electron circuits are making good progress. In PTB's services sector, some new procedures have been made ready for use, for instance the calibration of electrical quantities by means of quantum standards that can also be operated in private calibration laboratories. The international reputation of PTB as the leading metrology institute when it comes to realizing the fundamental units is additionally reflected by the fact that Professor Ullrich was appointed President of the Consultative Committee for Units (CCU) of the Metre Convention.

An important development reported by Professor Ullrich was the further development of the Europe-



Bild 2: Von nun an Ehrenkuratoren: Prof. Dr. Klaus v. Klitzing (2. v. l.) und Prof. Dr. Theodor Hänsch (3. v. l.) erhalten die Würdigung für ihre langjährige, engagierte Mitarbeit im Kuratorium der PTB. Die Ernennungsurkunde überreichten der BMWi-Abteilungsleiter und Kuratoriumspräsident MinDir Detlef Dauke und PTB-Präsident Prof. Dr. Joachim Ullrich. (Foto: PTB)

Figure 2: The new honorary Kuratorium members: Prof. Dr. Klaus v. Klitzing (2nd from left) and Prof. Dr. Theodor Hänsch (3rd from left) have been handed the awards marking their many years of committed work in the Kuratorium of PTB. The certificates of appointment were presented by BMWi Director General and Kuratorium President Detlef Dauke as well as by PTB President Prof. Dr. Joachim Ullrich. (Photo: PTB)

Eine wichtige Entwicklung, über die Professor Ullrich berichtete, war die Fortentwicklung des europäischen Metrologieforschungsprogramms EMRP, welches nun unter dem Namen EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research) in den nächsten zehn Jahren gemeinsame Projekte im Bereich der Metrologie fördern wird, die besonders von einer europäischen Koordination profitieren. Die EU wird etwa die Hälfte des Budgets von insgesamt 600 Millionen Euro beisteuern. Für deutsche Projektbeteiligte kann mit einer Förderung im Umfang von 88 Millionen Euro gerechnet werden. Außerdem gab Professor Ullrich einen Überblick über die Maßnahmen der PTB, um deren traditionell starke Vernetzung mit Universitäten noch weiter zu intensivieren, zum Beispiel durch Einrichtung eines PTB-Instituts für Theoretische Physik zum Thema „Fundamentale Physik für Metrologie“, dessen Leitung gemeinsam mit der TU Braunschweig berufen wird.

Ein besonderes Highlight zum Abschluss der Kuratoriumstagung war die Ernennung von Prof. Dr. T. W. Hänsch und Prof. Dr. K. von Klitzing zu Ehrenkuratoren der PTB.

an Metrology Research Programme (EMRP) which will be continued under the name “EMPIR” (European Metrology Programme for Innovation and Research) for the next ten years and which will foster European coordination. The EU will supply approximately half of the budget of 600 million euros in total. German participants can expect financial support of up to 88 million euros in total. Furthermore, Professor Ullrich gave an overview of the measures taken by PTB to maintain and further intensify its relations with universities (for example, by setting up a PTB institute for theoretical physics dealing with “Fundamental physics for metrology”, whose head will be jointly appointed by PTB and Braunschweig Technical University).

A particular highlight at the end of the Kuratorium meeting was the appointment of Prof. Dr. T. W. Hänsch and Prof. Dr. K. von Klitzing as honorary members of the Kuratorium of PTB.

Besuch von Bundesminister Gabriel in der PTB Braunschweig

Der oberste Dienstherr der PTB, Bundesminister für Wirtschaft und Energie Sigmar Gabriel, besuchte am 27. Februar die PTB in Braunschweig. Mit dem Präsidium besprach Minister Gabriel insbesondere strategische Perspektiven. Als das weltweit zweitgrößte Metrologieinstitut spielt die PTB, neben ihrer Bedeutung für das Messwesen in Deutschland, insbesondere eine große Rolle bei der Entwicklung europäischer und weltweiter Strukturen der Metrologie. Nach dem Gespräch mit dem PTB-Präsidium informierte sich der Bundesminister im Rahmen einer Laborführung über die aktuellen Forschungsarbeiten zur Bestimmung der Avogadro-Konstante und den PTB-Ansatz, die Neudefinition des Kilogramms auf der Basis dieser Naturkonstanten vorzunehmen. Gabriel war es ein Anliegen, bei seinem Besuch die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der PTB persönlich anzusprechen. „Die PTB ist auf dem Gebiet der Metrologie – der Lehre über Maße und das Messwesen – eine weltweit führende Einrichtung. Ich möchte Ihnen meine Anerkennung und meinen Dank dafür aussprechen, dass Sie mit Ihrer Arbeit zu diesem exzellenten Ruf der PTB beitragen. Seien Sie weiter das Maß aller Dinge!“, so Minister Gabriel. Er stellte fest, dass die deutsche Wirtschaft vor allem mit neuen Produkten und neuen Verfahren von hoher Qualität weltweit erfolgreich ist. Der PTB kommt dabei als wesentlicher Teil der Qualitätssicherung des Industriestandortes Deutschlands eine besondere Bedeutung zu. Sowohl die Rolle und die Aktivitäten der PTB zur Förderung des Nachwuchses für naturwissenschaftlich-technische Berufe als auch die hiesigen Maßnahmen zur Vereinbarkeit von Beruf und Familie bewertete

Bild 1: Bundesminister Sigmar Gabriel informierte sich bei seinem Besuch in der PTB auch über die aktuellen Forschungen rund um das Kilogramm.



Visit of Federal Minister Sigmar Gabriel to PTB in Braunschweig

On 27 February 2014, the Federal Minister for Economic Affairs and Energy, Mr. Sigmar Gabriel, visited PTB, which is supervised by his ministry. During his stay at PTB's site in Braunschweig, Mr. Gabriel discussed in particular strategic perspectives with the Presidential Board. Being the second largest national metrology institute in the world, PTB especially – in addition to its importance for metrology in Germany – plays a major role in the development of European and worldwide structures of metrology. After his meeting with PTB's Presidential Board, the Federal Minister was informed – during a laboratory tour – about the current research work on the determination of the Avogadro constant and on PTB's approach to a redefinition of the kilogram on the basis of this fundamental constant. The Federal Minister was specially interested in personally addressing the employees of PTB. “In the field of metrology – the science of measurement – PTB is a worldwide leading institution. Please allow me to express my appreciation and my gratitude to you for contributing to PTB's excellent reputation with your work. Please continue to be ‘the measure of all things’”, the Federal Minister said. He observed that the German economy has worldwide success,

especially in the field of new products and new procedures of high quality. Particular importance is attributed to PTB playing a major role for quality assurance in Germany as a highly industrialized country. Both PTB's role and the activities to promote young scientists in natural-scientific and technical professions and the local measures taken by PTB for the compatibility of family and profession were positively appraised by Minister Gabriel. Directly after

Photo 1: On the occasion of his visit, Federal Minister Sigmar Gabriel was informed about the current research on the kilogram.

Gabriel gleichfalls als sehr positiv. Im Anschluss an die Ansprache gab es Gelegenheit, Fragen an den Bundesminister zu stellen. Befragt nach den beruflichen Perspektiven insbesondere für PTB-Beschäftigte mit befristeter Anstellung, stellte Minister Gabriel fest, dass der Abbau von Planstellen in Einrichtungen des Bundes mittlerweile gestoppt ist. Neue Planstellen konnte Minister Gabriel der PTB kurzfristig nicht in Aussicht stellen. Er sagte der PTB jedoch die Unterstützung seines Hauses bei ihrer Weiterentwicklung zu, so zum Beispiel bei der zukünftigen finanziellen Grundausstattung und der Durchführung von Infrastrukturmaßnahmen.

35 Jahre intensive Kooperation zwischen der PTB und dem NIM

Mit dem chinesischen National Metrology Institute (NIM) verbindet die PTB eine nunmehr 35 Jahre bestehende enge Zusammenarbeit. In dieser Zeit hat sich die Volksrepublik China zu einer global führenden Wirtschaftsmacht entwickelt. Die Fortschritte in der chinesischen Metrologie seit der „Vereinbarung über wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Metrologie zwischen China und Deutschland“ aus dem Jahre 1979 sind maßgeblich von der PTB unterstützt worden. Das NIM hat inzwischen eine international führende Stellung in der metrologischen Forschung und Dienstleistung erlangt und ist für die PTB heute ein Partner für intensiven wissenschaftlichen Austausch „auf Augenhöhe“. Diese Zusammenarbeit wird in den kommenden Jahren weiter intensiviert. Anlässlich eines Besuches von Prof. Ullrich, dem Präsidenten

Bild 2: Prof. Ullrich in Peking bei der Vertragsunterzeichnung mit dem NIM.

Photo 2: Prof. Ullrich in Peking on the occasion of signing the agreement with NIM.

the discussion, the employees had the opportunity to put questions to the Federal Minister. When enquired about the professional prospects, especially for PTB employees with a time-limited contract, Federal Minister Gabriel mentioned that the cutback on permanent posts has meanwhile been stopped in federal institutions. For the short term, Minister Gabriel was unable, however, to promise new permanent posts for PTB. Nevertheless, he promised to support PTB in its further development, e.g. in PTB's future basic funding and in realizing infrastructural measures.

35 years of intensive cooperation between PTB and NIM

PTB has been associated with the Chinese National Metrology Institute (NIM) through 35 years of close cooperation. During this time, the People's Republic of China has developed into a globally leading economic power. Progress in Chinese metrology which has been made since the “Agreement on scientific and technical cooperation between China and Germany in the field of metrology” of 1979, has essentially been supported by PTB. In the meantime, NIM has achieved an internationally leading role in metrological research and services and today is PTB's partner for intensive scientific exchange “at eye level”. This cooperation will be further intensified during the coming years. On the occasion of a visit of PTB's president, Professor Ullrich, to NIM in Peking last April, the cooperation agreement between the two institutes was extended for another five years. Prior to this, cooperation interests of NIM and PTB were analysed and essential research priorities were laid down. By the exchange of specialist information and experts, particularly the cooperation involving the dissemination of the units “time”



der PTB, am NIM in Peking im April wurde der Kooperationsvertrag zwischen beiden Instituten um weitere fünf Jahre verlängert. Im Vorfeld wurden Kooperationsinteressen des NIM und der PTB analysiert und wesentliche Forschungsschwerpunkte festgelegt. Durch den Austausch von Fachinformationen und Experten soll in den nächsten Jahren insbesondere die Zusammenarbeit bei der Weitergabe der Einheiten der Zeit und der Temperatur sowie im Bereich Durchfluss strömender Gase verstärkt werden. Auch Forschungsaktivitäten zur Bestimmung der Avogadro-Konstante, auf deren Grundlage die Neudefinition der Einheit Kilogramm erfolgen soll, werden in die Kooperation einbezogen. Während des Besuches am NIM traf Prof. Ullrich auch mit Vizeminister Wu Qinghai des Staatlichen Zentralamts für Qualitätsüberwachung, Inspektion und Quarantäne AQSIQ zusammen, dem das NIM unterstellt ist. Der Austausch über Themen und Formen der Zusammenarbeit in internationalen und regionalen Metrologieorganisationen und auf dem Gebiet des gesetzlichen Messwesens diente der Vorbereitung der weiteren Zusammenarbeit zwischen dem AQSIQ und den Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Anlässlich eines Besuches von Vizeminister Wu in Berlin im November wurde in der PTB eine Vereinbarung zur Kooperation zwischen dem BMWi und dem AQSIQ unterzeichnet.

Mitarbeiterumfrage 2014

Jeder PTB-Beschäftigte hat eine Meinung zu Stellung, Ansehen und Perspektiven der PTB insgesamt sowie auch zu seinem persönlichen Arbeitsumfeld und den Arbeitsbedingungen. In der Mitarbeiterumfrage 2014 war diese Meinung gefragt. Ziel war es, die aktuelle Stimmungslage der Mitarbeiterschaft zu ermitteln sowie Möglichkeiten für Verbesserungen der Arbeitsbedingungen zu identifizieren. Der Fragenkatalog wurde in Zusammenarbeit der Leitungsgremien, des Personalreferats und der Personalvertretung mit einer externen Firma erarbeitet und adressierte die Zufriedenheit mit den eigenen Aufgaben, Tätigkeiten und der Entlohnung, die Qualität der Zusammenarbeit in den Arbeitsgruppen sowie die Möglichkeiten beruflicher Entwicklung an der PTB. Weitere Fragen zielten auf die Einschätzung der Führungskultur, von Kommunikations- und Arbeitsabläufen und der Zukunft der PTB ab. Insgesamt beteiligten sich 64,1 % der PTB-Beschäftigten an der Umfrage, sodass die Ergebnisse als repräsentativ für die Meinung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von PTB gelten können. Die hohe Anzahl an ergänzenden Antworten in der vorgegebenen Freitextfeldern war gleichfalls

and “temperature” as well as the field of the flowrate of flowing gases is intended to be intensified in the next few years. Furthermore, the research activities for the determination of the Avogadro constant, which are to provide the basis for the redefinition of the unit “kilogram”, are to be included in the cooperation. During the visit to NIM, Prof. Ullrich also met with Vice-Minister Wu Qinghai of the General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine AQSIQ, which manages NIM. The exchange concerning topics and forms of cooperation in international and regional metrology organizations and concerning the field of legal metrology served to promote the preparation for the further cooperation between AQSIQ and the *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Federal Ministry for Economy and Energy – BMWi)*. On the occasion of a visit to Berlin in November by Vice-Minister Wu, a cooperation agreement between BMWi and AQSIQ was signed.

Staff Survey 2014

Each PTB staff member has an opinion on the position, standing and prospects of PTB as a whole, as well as his own personal work environment and the working conditions. In the Staff Survey 2014, this opinion was requested. The aim was to identify the staff’s current mood as well as possibilities for improving the working conditions. The questionnaire was worked out with an external company, in cooperation with the executive committee, the Personnel Section, and the Staff Council, and addressed personal satisfaction with one’s own tasks, activities and the remuneration, the quality of the cooperation within the working groups as well as a professional career at PTB. Further questions were directed at the assessment of the leadership culture, of communication sequences and workflow, and the future of PTB. Altogether, 64.1 % of the PTB staff members participated in the survey; thus the results can be accepted as representative of the opinion of the staff members of PTB. The large number of supplementary answers in the free text fields provided documented the need for differentiated modes of expression, both for positively and for negatively perceived circumstances of work. The results of the survey indicated a pronounced identification of the colleagues with their tasks at PTB. One’s own activity, the climate of cooperation as well as the framework conditions of the work, as, e.g. flexible working time regulations, are assessed positively. Perceived as in need of improvement, on the other hand, are, e.g., the transparency of assessments of performance and ratings, the professional career options and the knowledge transfer

sehr erfreulich und dokumentierte das Bedürfnis nach differenziertem Ausdruck, sowohl zu als positiv wie auch zu als negativ wahrgenommenen Arbeitsumständen. Die Ergebnisse der Umfrage zeigen eine ausgeprägte Identifikation der Kolleginnen und Kollegen mit ihrer Aufgabe in der PTB. Die eigene Tätigkeit, das Klima der Zusammenarbeit sowie Rahmenbedingungen der Arbeit, wie z. B. flexible Arbeitszeitregelungen, werden als positiv bewertet. Als verbesserungswürdig werden demgegenüber z. B. die Transparenz von Leistungsbeurteilungen und Einstufungen, die beruflichen Entwicklungsmöglichkeiten und die Wissensweitergabe bei Personalwechsel wahrgenommen. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Umfrage im Jahr 2005 zeigt, dass positive Arbeitsumstände weiterhin Bestand haben, eine deutliche positive Veränderung bei kritischen Themen jedoch nicht festzustellen ist. Die aktuellen Ergebnisse geben dem Präsidium und den Abteilungsleitungen daher Ansatzpunkte für Verbesserungen. In Abstimmung mit dem Präsidium sind Informations- und Diskussionsprozesse auf Abteilungsebene und zwischen Abteilungen initiiert worden, um Schwächen, z. B. in den Bereichen Kommunikation und Kooperation, zu konkretisieren. Daraus werden in näherer Zukunft Verbesserungsmaßnahmen mit dem Ziel abgeleitet, eine verstärkte Zufriedenheit der Beschäftigten im Sinne der gesamten PTB zu erzeugen.

to younger employees in the case of staff change. A comparison with the results of the survey in 2005 shows that positive work circumstances continue to persist, but that in the case of critical topics, no clear change to the positive could be perceived. The current results thus provide the Presidential Board and the heads of the divisions with reference points for improvement. In coordination with the Presidential Board, information and discussion processes were initiated at the divisional and the interdivisional level, in order to identify weaknesses, e.g. in the fields of communication and cooperation. Hence, measures for improvements will be derived in the near future with the goal of creating increased satisfaction among staff members in terms of the entire PTB.

Qualitätsmanagementssystem (QMS)

Das QMS umfasst das gesamte metrologische Leistungsangebot der PTB in den Bereichen Kalibrieren, Messen, Prüfen, Forschen und Entwickeln. Die Wirksamkeit des QMS konnte erneut sowohl international im Rahmen von multilateralen Abkommen als auch national gegenüber dem Gesetzgeber nachgewiesen werden. Basis der Kompetenznachweise sind die einschlägigen gesetzlichen Anforderungen, die DIN EN ISO/IEC 17 025, die Empfehlungen der DFG zur guten wissenschaftlichen Praxis, im Bereich der Chemie zusätzlich der ISO Guide 34 sowie für die Tätigkeit als Konformitätsbewertungsstelle die DIN EN ISO/IEC 17 065. Die auf Grundlage der anerkannten Kompetenznachweise vom Präsidenten der PTB abgegebene Selbsterklärung zum Qualitätsmanagement wurde uneingeschränkt durch die Auftraggeber und Nutzer der Leistungen der PTB akzeptiert.

Die messtechnische Rückführung der Bezugsnormale der akkreditierten Konformitätsbewertungsstellen sowie der Eichbehörden auf die nationalen Normale und damit auch die klassische Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten spielt unverändert eine zentrale Rolle in der Qualitätspolitik der PTB. Dies basiert insbesondere auf dem Auftrag der PTB im Gesetz über Einheiten im Messwesen und die Zeitbestimmung vom 3. Juli 2008 (BGBl. I S. 1185). Das neue Mess- und Eichgesetz (MessEG) vom 31. Juli 2013 (BGBl Teil 1 Nr. 43, S. 2722) unterstützt diesen Auftrag im Sinne der Weitergabe der SI-Einheiten.

Zur Sicherung der Einheitlichkeit des Messwesens wurden in der PTB mehr als 200 nationale Normale in das QMS integriert. Zu über 90 % handelte es sich dabei um Normale auf dem höchsten Niveau (Primärnormale).

In Umsetzung des 1999 abgeschlossenen multilateralen Abkommens des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht zur gegenseitigen Anerkennung der nationalen Normale und der entsprechenden Ergebnisberichte (CIPM-MRA) verfügt die PTB in allen eingeschlossenen Metrologiegebieten über mehr als 1000 anerkannte Mess- und Kalibriermöglichkeiten. Zur Absicherung der messtechnischen Vergleichbarkeit dieser Leistungen ist sie aktuell an rund 150 laufenden internationalen Vergleichsmessungen und Pilotstudien beteiligt. Dabei stellt sie zu rund 30 % das Pilotlabor.

Quality Management System (QMS)

PTB's quality management system (QMS) covers the entire palette of metrological services offered by PTB in the fields of calibration, measurement, testing, research and development. Again it has been possible to furnish proof of the efficiency of the QMS both internationally within the scope of multilateral agreements and also nationally vis-à-vis the legislator. The basis for a demonstration of competence encompasses the relevant legal requirements, the DIN EN ISO/IEC 17 025, the recommendations of the DFG for good scientific practice and, in the field of chemistry, in addition ISO Guide 34 and – for the activity as conformity assessment body – DIN EN ISO/IEC 17 065. The self-declaration on quality management, provided by the President of PTB on the basis of the recognized demonstration of competence, has been accepted without any restriction by the customers and the users of the services of PTB.

The metrological traceability of the reference standards of the accredited conformity assessment bodies and of the verification authorities to the national standards and, thus, also the classical realization and dissemination of the SI units play an unaltered central role in PTB's quality policy. This role is based, in particular, on the mandate of PTB laid down in the Units and Time Act of 3 July 2008 (Federal Law Gazette I, p. 1185). The new Measures and Verification Act (MessEG) of 31 July 2013 (Federal Law Gazette part 1 No. 43, p. 2722) supports this mandate within the scope of the dissemination of the SI units.

To safeguard the uniformity of metrology, more than 200 national standards have been integrated in the QMS of PTB. More than 90 % of them were standards at the highest level (primary standards).

To implement the multilateral agreement of the International Committee for Weights and Measures on the mutual recognition of the national standards and the corresponding result reports (CIPM-MRA), which was concluded in 1999, PTB has more than 1000 recognized measurement and calibration capabilities at its disposal in all involved fields of metrology. To ensure the metrological comparability of these services, PTB is currently participating in approximately 150 on-going comparison measurements and pilot studies. In about 30 % of the comparisons, PTB is the pilot laboratory.

In the period under report, the test possibilities available at PTB were analyzed and integrated into

Im Berichtszeitraum wurden die verfügbaren Prüfmöglichkeiten der PTB analysiert und insbesondere im Hinblick auf die Einrichtung der Konformitätsbewertungsstelle im Bereich des neuen MessEG in das QMS integriert. In diesem Zusammenhang wurden rund 80 Prüfleistungen neben weiteren Prüfungen z. B. im Bereich des Explosionsschutzes, des Medizinproduktegesetzes, des Waffengesetzes, des Beschussgesetzes oder auch der Röntgenverordnung definiert.

Begutachtungsrunde der messtechnischen Rückführung im Mess- und Eichwesen abgeschlossen

Die im Jahr 2011 begonnenen Begutachtungen der messtechnischen Rückführung bei den Eichbehörden durch die PTB konnten in allen Bundesländern erfolgreich abgeschlossen werden. Basis war der § 6 des Einheiten- und Zeitgesetzes (EinhZeitG), wonach die PTB u. a. die gesetzlichen Einheiten darzustellen und weiterzugeben hat. Sofern die Weitergabe der Einheiten über Dritte erfolgt, soll die PTB auch die Einheitlichkeit des Messwesens sichern.

In der Bundesrepublik Deutschland erfolgt die Weitergabe der Einheiten zum einen über akkreditierte Kalibrierlaboratorien und zum anderen über die von den Bundesländern eingesetzten Landeseichbehörden.

Aufgrund der Begutachtungen durch die PTB kann ein von den Eichbehörden der Länder ausgestellter Ergebnisbericht als metrologischer Rückführungsnachweis auf die SI-Einheiten anerkannt werden.

Der Bundestag hatte das neue Mess- und Eichgesetz (MessEG) am 18. April 2013 beschlossen. Das Gesetz tritt zum 1. Januar 2015 in Kraft. Nach § 45 des MessEG hat die PTB auch die für die Durchführung dieses Gesetzes zuständigen Landesbehörden zu beraten. Die konstruktive Zusammenarbeit zwischen der PTB und den Eichbehörden der Länder wird somit in bewährter Weise fortgesetzt.

the QMS, in particular in view of the establishment of the conformity assessment body within the scope of the new Measures and Verification Act (MessEG). In this context, approx. 80 test services have – in addition to other tests (for example in the field of explosion protection and within the scope of the Medical Devices Act, the Weapons Act, the Act on the Proof Testing of Arms and Ammunition, and the X-ray Decree) – been defined.

Assessment of the metrological traceability provided by verification authorities concluded

The assessments of the metrological traceability which have been carried out by PTB at the verification authorities since 2011 have successfully been concluded in all federal states. The assessments were based on section 6 of the Units and Time Act (EinhZeitG) according to which PTB is, among other things, responsible for the realization and dissemination of the legal units. If the units are disseminated via third parties, then PTB also has to ensure the uniformity of metrology.

In the Federal Republic of Germany, the units are disseminated, on the one hand, through accredited calibration laboratories and, on the other hand, through the verification authorities of the federal states.

On the basis of the PTB assessments, a result report that has been issued by the verification authorities of the federal states can be recognized as metrological proof of traceability to the SI units.

On 18 April 2013, the *Bundestag* adopted the new Measures and Verification Act (MessEG). The Act will enter into force on 1 January 2015. According to section 45 of the MessEG, PTB also has to advise the federal state authorities which are responsible for the implementation of this Act. The constructive cooperation between PTB and the verification authorities of the federal states will, thus, be continued in the proven way.

Patentverwertung im europäischen Vergleich gut aufgestellt

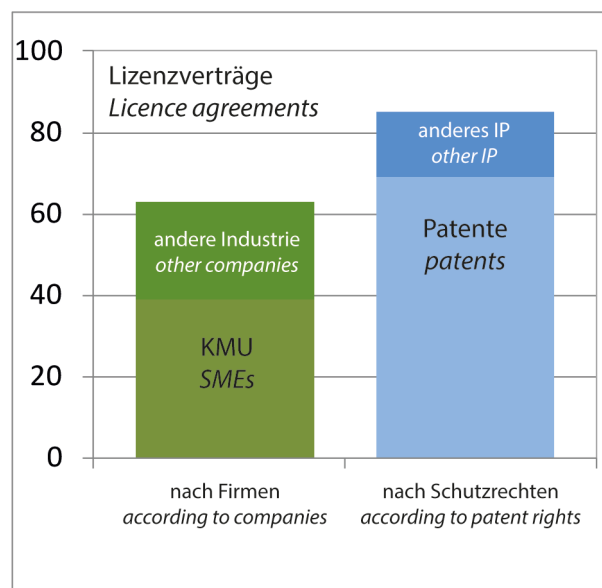
Wissens- und Technologietransfer ist eine gesetzliche Aufgabe der PTB. Erfindungsmeldungen, Patentanmeldungen, erteilte Patente und Lizenzen sind Kennzahlen entlang der Wertschöpfungskette einer Technologieverwertung. PTB-Patentanmeldungen führen mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % zu einem erteilten Patent. 29 % beträgt der Lizenzierungsgrad bezogen auf alle bisherigen Patentanmeldungen, bezogen auf die derzeit aktiven Anmeldungen liegt er sogar bei 48 %. Oft sind diese Aktivitäten Bestandteil industrienaher Projekte. Diese führen typischerweise zu einem vorwettbewerblichen Funktionsmuster, das dann in einer nachfolgenden Phase durch einen Lizenznehmer der PTB zu einem innovativen Produkt weiterentwickelt wird. Wie aus der Grafik ersichtlich, sind 62 % der Lizenznehmer dem KMU-Bereich zuzurechnen.

Mit 13 Erfindungen, 11 Patentanmeldungen und 5 Lizenzverträgen, jeweils pro Jahr und 1000 Beschäftigten, liegt die PTB im Durchschnitt europäischer Forschungsinstitutionen. Dies gilt umso mehr, als der Ressourceneinsatz der PTB lediglich 60 % für Forschung und Entwicklung beträgt; 40 % entfallen auf andere gesetzliche Aufgaben der PTB. Sehr wenige Patente erzielen sehr hohe Einnahmen. In der PTB finanzieren die Verwertungserlöse die Patentkosten sowie die Erfindervergütung und tragen auch zum Personaletat bei.

Patent exploitation: PTB well positioned in Europe

One of PTB's legal tasks is the transfer of knowledge and technology. Some of the key data along the value chain of a technology's exploitation are invention reports, patent applications and the patents and licences granted. Patent applications filed by PTB result, with a probability of 90 %, in a patent being granted. The licencing grade is 29 % (when we consider all the patents that have been filed so far). When we consider the applications which are currently active, the number even lies around 48 %. These activities are often part of industry-oriented projects. These typically lead to a pre-competitive prototype which is then, at a later stage, further developed by one of PTB's licence holders who turn it into an innovative product. As shown in the graphic, 62 % of the licence holders are SMEs.

With 13 inventions, 11 patent applications and 5 licence agreements (per year and per 1000 employees), PTB's performance lies in the average range for European research institutions – and this despite the fact that only 60 % of PTB's resources are spent on research and development (whereas the other 40 % go to PTB's other legal tasks). Only very few patents attain high revenues. At PTB, the licencing income from patent exploitation serves to fund the patent costs and the inventor's bonus and it contributes, in addition, to the staff budget.



Lizenzverträge, aufgeschlüsselt nach Lizenznehmern und Patenten der PTB. „Anderes IP“ bezieht sich auf das Design elektronischer Schaltungen und die Weitergabe von Software.

Licence agreements, split into licence holders and patents of PTB. "Other IP" refers to the design of electronic circuits and the dissemination of software.

Neugestaltung des gesetzlichen Messwesens

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

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

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

Regeln und technische Spezifikationen für national geregelte Messgeräte sowie Regeln und Erkenntnisse über Verfahren der Konformitätsbewertung ermittelt der mit dem Mess- und Eichgesetz eingeführte Regelermittlungsausschuss. Darüber hinaus ermittelt dieser Ausschuss auch Regeln und Erkenntnisse für die Verwendung von Messgeräten oder Messwerten.

Dem Regelermittlungsausschuss gehören sachverständige Institutionen und Verbände an. Dazu gehören die PTB, die zuständigen Behörden der Länder, Konformitätsbewertungsstellen, anerkannte Prüfstellen, Wirtschaftsverbände und Verbraucherverbände. Den Vorsitz und die Geschäftsstelle des Regelermittlungsausschusses führt die PTB.

Einen wichtigen Beitrag zur einheitlichen Arbeitsweise von Konformitätsbewertungsstellen leistet künftig der ebenfalls mit dem Mess- und Eichgesetz eingeführte Ausschuss für die Konformitätsbewertungsstellen. Konformitätsbewertungsstellen sind nach dem Gesetz zur Mitwirkung in diesem Ausschuss, dessen Leitung von der PTB gestellt wird, verpflichtet.

Reorganization of legal metrology

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

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

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

Rules and technical specifications for measuring instruments which are regulated at the national level as well as rules and findings on conformity assessment procedures are determined by the so-called “Regelermittlungsausschuss” (“Rule Determination Committee”) which was introduced within the scope of the Measures and Verification Act. In addition, this committee also determines rules and findings for the use of measuring instruments or measurement values.

The “Rule Determination Committee” is composed of expert institutions and associations. These include PTB, the respective authorities of the federal states, conformity assessment bodies, state-accredited inspecting authorities, trade associations and consumer associations. PTB presides over the “Rule Determination Committee” and houses its executive office.

In future, the Committee for Conformity Assessment Bodies, which was also introduced within the scope of the Measures and Verification Act, will make an important contribution to uniform working procedures of conformity assessment bodies.

Für die Verwendung von neuen oder erneuerten Messgeräten wird künftig gefordert, dass diese Messgeräte der nach dem Landesrecht zuständigen Behörde spätestens sechs Wochen nach der Inbetriebnahme angezeigt werden.

Zu den gesetzlichen Aufgaben der PTB gemäß Mess- und Eichgesetz gehört neben der Beratung der für die Durchführung zuständigen Landesbehörden auch, wissenschaftliche Forschung auf diesem Gebiet zu betreiben und die Normung und Standardisierung auf diesem Gebiet zu unterstützen.

Darüber hinaus stellt die PTB auch die metrologische Rückführung der Normalgeräte und Prüfungshilfsmittel der Konformitätsbewertungsstellen, der zuständigen Behörden sowie der staatlich anerkannten Prüfstellen sicher.

Die Überwachung der in Verkehr gebrachten Messgeräte (Marktüberwachung) obliegt den nach Landesrecht zuständigen Behörden. Dabei kontrollieren die Marktüberwachungsbehörden anhand angemessener Stichproben, ob Messgeräte die gesetzlichen Anforderungen erfüllen, und treffen die erforderlichen Maßnahmen, wenn sie den begründeten Verdacht haben, dass das nicht der Fall ist.

Im Rahmen der Verwendungsüberwachung überprüfen die zuständigen Behörden, ob Messgeräte und Messwerte die Anforderungen des Mess- und Eichgesetzes an deren Verwendung erfüllen.

Conformity assessment bodies, according to the law, must participate in this committee, which is presided over by PTB.

For the use of new or renewed measuring instruments, it will be required in future that these are reported to the authority which is in charge of this task under federal state law six weeks after putting them into operation, at the latest.

According to the Measures and Verification Act, PTB's legal tasks also include (besides advising the federal state authorities which are in charge of implementing the act) the undertaking of scientific research and the support of standardization in this field.

In addition, PTB also ensures the metrological traceability of the standard devices and of the test facilities of the conformity assessment bodies, of the respective authorities and of the state-accredited inspecting authorities.

Monitoring of the measuring instruments that have been placed on the market (market surveillance) is the task of those authorities which are in charge of it under federal state law. By means of suitable random samples, the market surveillance authorities carry out checks in order to find out whether measuring instruments comply with the legal requirements, and they take the necessary measures if they have reasonable suspicion that this is not the case.

Within the scope of application monitoring, the authorities in charge verify whether the measuring instruments and the measurement values comply with the requirements which are specified in the Measures and Verification Act for their use.

Metrologienetzwerke in Asien

Regionale Metrologieorganisationen beziehungsweise regionale Metrologienetzwerke sind ein zentraler Bestandteil des weltweiten Systems zur gegenseitigen Anerkennung von Kalibrier- und Messmöglichkeiten. Ihr entwicklungspolitisches Potenzial geht jedoch darüber hinaus: Als Plattform zum Austausch von Wissen und Informationen sowie als Anbieter von Beratungs- und Schulungsmaßnahmen eröffnen sie gerade Nationalen Metrologieinstituten aus Entwicklungsländern, die nur über begrenzte bilaterale Fachkontakte verfügen, die Möglichkeit, Anschluss an internationale Entwicklungen zu erlangen. Die Kooperation mit regionalen Metrologienetzwerken im wissenschaftlichen, aber auch im gesetzlichen Bereich stellt daher ein wichtiges Element in der Technischen Zusammenarbeit der PTB dar.

Ein für die Zusammenarbeit entscheidendes Charakteristikum vieler Metrologienetzwerke ist die Heterogenität ihrer Mitgliedsstaaten. Dies gilt insbesondere für Asien, wo sich neben führenden Industrienationen wie Japan und Korea auch die Schwellenländer China und Indien längst zu wirtschaftlichen Schwergewichten entwickelt haben. Gleichzeitig umfasst die Region einige der am wenigsten entwickelten Länder der Welt, wie Kambodscha, Nepal und Myanmar. Die sozio-ökonomischen Disparitäten, die sich auch im Entwicklungsstand der Nationalen Metrologieinstitute widerspiegeln, stellen einerseits die Technische Zusammenarbeit der PTB immer wieder vor Herausforderungen. Andererseits bieten sie aber gerade im regionalen Kontext auch viele Chancen, wie am Beispiel eines neuen Regionalvorhabens der PTB mit dem APMP (Asia Pacific Metrology Programme) und APLMF (Asia Pacific Legal Metrology Forum) beschrieben werden soll.

Sowohl APMP als auch APLMF behandeln den Aufbau der nationalen Metrologiesysteme in Entwicklungsländern als strategische Priorität, verfügen hierfür jedoch nur über eingeschränkte Ressourcen und Kapazitäten. Die Unterstützung, die diese Organisationen für ihre Mitglieder aus Entwicklungsländern leisten können, ist daher begrenzt. Der Fokus des vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) finanzierten PTB-Vorhabens liegt deshalb auf dem Ausbau der Kapazitäten beider Regionalorganisationen, um ihre Mitglieder aus Entwicklungsländern effektiver unterstützen und integrieren zu können. Im Falle von APMP wird dabei auf die Erfahrungen aus

Metrology networks in Asia

Regional metrology organizations and regional metrology networks are central components of the worldwide system for the mutual recognition of calibration and measurement capabilities. However, their potential to support development goes beyond this. As a platform for the exchange of knowledge and information and as providers of consultation and training measures they offer the possibility – in particular for national metrology institutes from developing countries which only have limited bilateral professional contacts – of keeping pace with international developments. The cooperation with regional metrology networks in the scientific but also in the legal field is therefore an important element for PTB's Technical Cooperation Department.

A characteristic trait of many metrology networks is the heterogeneity of their member states. This is particularly obvious in Asia where – besides leading industrial nations like Japan and Korea – also countries in transition such as China and India have long since developed into recognized economic powers. At the same time, the region comprises some of the least developed countries like Cambodia, Nepal and Myanmar. On the one hand, the socio-economic disparities, which are also reflected by the development status of the national metrology institutes, pose challenges to PTB's Technical Cooperation Department. On the other hand, they offer many opportunities especially in the regional context, as will be described by the example of a new regional project of PTB with the APMP (Asia Pacific Metrology Programme) and the APLMF (Asia Pacific Legal Metrology Forum).

Both the APMP and the APLMF consider the setting up of national metrology systems in developing countries to be of strategic priority; however, they only have limited resources and capacities for this purpose. The support which can be provided by these organizations for their members from developing countries is thus limited. Therefore, the focus of the PTB project financed by the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ) lies on a capacity development of both regional organizations in order to be able to support and integrate their members from developing countries more effectively. As for APMP, the experience gained from a cooperation existing since 2006 was used. This cooperation was formalized by the conclusion of a Memorandum of Understanding in 2012 between PTB's Technical Cooperation Depart-

einer seit 2006 bestehenden Zusammenarbeit zurückgegriffen, die 2012 durch den Abschluss eines Memorandum of Understanding zwischen dem Fachbereich Technische Zusammenarbeit der PTB und dem APMP Developing Economies' Committee formalisiert wurde.

Insbesondere versucht das Regionalprojekt Mechanismen und Prozesse zu etablieren, um die in der Region selbst vorhandenen Ressourcen und Expertisen besser zu nutzen. So wurde eine ausführliche Erhebung des Entwicklungsstandes und der Bedürfnisse der Entwicklungsländer im Bereich Metrologie sowie ein mehrstufiger Planungsprozess durchgeführt. Das Konzept sieht vor, dass sowohl Industrieländer als auch weiter fortgeschrittene Schwellen- und Entwicklungsländer, wie China und Thailand, Experten für Ausbildungsmaßnahmen zur Verfügung stellen, um damit auch den Pool von Trainern zu erweitern. Neben technischer Ausbildung sind Sensibilisierungsmaßnahmen, Trainings im Bereich Soft Skills und Publikationen geplant, wobei eine Reihe von Maßnahmen von APMP und APLMF gemeinsam durchgeführt werden. Gesteuert wird das Projekt von einer siebenköpfigen Koordinierungsgruppe, die aus jeweils drei APMP- und APLMF-Vertretern und der PTB-Projekt Koordinatorin besteht.

Das Vorhaben befindet sich inzwischen auf einem guten Weg: Nach einer mehrmonatigen Planungsphase konnte in beiden Organisationen eine breite Unterstützung des Projektes aufgebaut und bereits erste Maßnahmen durchgeführt werden. Ziel ist es, dass in Zukunft alle Mitglieder entsprechend ihres Entwicklungsstandes in die Umsetzung von Trainings- und Sensibilisierungsmaßnahmen effektiv eingebunden werden können und so die schrittweise Integration der Entwicklungsländer bis hin zu den Least Developed Countries in internationale Fachgremien gelingt.

ment and the APMP Developing Economies' Committee.

In particular, the regional project is trying to establish mechanisms and processes to be able to better exploit resources and expertise which are available in the region itself. Thus, a detailed survey of the development status and of the needs of developing countries in the field of metrology as well as a multi-level planning process were carried out. The concept envisages that not only industrial countries, but also the more advanced countries in transition and/or the more advanced developing countries – such as China and Thailand – provide experts for training measures and thus also enlarge the pool of trainers. Besides technical training, sensitization and training measures in the area of soft skills and publications are planned, whereby a series of APMP and APLMF measures will be carried out jointly. The project is steered by a coordination group which consists of three APMP and three APLMF representatives as well as PTB's project coordinator.

The project is now well on its way: Following a planning phase of several months, both organizations were able to broadly support the project and to carry out initial measures. The future objective is to effectively involve all members in the implementation of training and sensitization measures – in accordance with their development status – and thus, to render the integration of developing countries – and even of the least developed countries – in international expert committees successfully.

Teilnehmer des MEDEA-Planungsworkshops im Mai 2014 in Djakarta

Participants in the MEDEA Planning Workshop in Jakarta in May 2014



Tag der offenen Tür im Ministerium mit PTB-Beteiligung: Energie sparen durch genaues Messen

Im August beteiligte sich die PTB am Tag der offenen Tür des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) in Berlin und erläuterte die Bedeutung von genauen Messungen zum effektiven Einsparen von Energie. Im Rahmen dieser Veranstaltung stellten Wissenschaftler aus dem Gebiet „Neue Verfahren der Wärmemengenmessung“ aus der Abteilung „Temperatur und Synchrotronstrahlung“ ihre speziellen Messmethoden vor.

Zur Stromerzeugung bzw. Energiegewinnung spielen Kraftwerke eine wichtige Rolle. Doch ein Kraftwerk soll nicht einfach nur Strom erzeugen, es soll dies vielmehr möglichst effizient tun. Eine wichtige Messgröße dabei: die Fließgeschwindigkeit des erhitzten Mediums im Rohrleitungssystem des Kraftwerks. Das Wissen um die genaue Fließgeschwindigkeit kann zur Optimierung des Kreislaufs und schließlich zur Energieeinsparung beitragen.

In dem als Exponat aufgebauten Miniatur-Prüfstand steuerte ein Solarmodul über eine Kreiselpumpe einen Wasserkreislauf. Mit einer Lasersonde wurde die Fließgeschwindigkeit des Wassers hochgenau gemessen. Die hier verwendete Laser-Doppler-Messtechnik (eine Weiterentwicklung der PTB) wird derzeit schon als Vergleichsverfahren zur Volumenstrombestimmung in der Fernwärme, bei der Gasmengenmessung sowie als Geschwindigkeitsreferenz für Windkanäle eingesetzt. Darüber hinaus lassen sich damit Strömungsphänomene visualisieren und Durchflusszähler optimieren.

Im Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) informieren einmal im Jahr zum Tag der offenen Tür die verschiedenen Abteilungen und die nachgeordneten Behörden über aktuelle Projekte, Forschungsthemen, Initiativen und Kampagnen. Thematisch orientierte sich der Tag der offenen Tür 2014 an den Themen „25 Jahre Friedliche Revolution“ und „Energie-wende“. Weitere Informationen : www.bmwi.de



Open Day in the ministry – with PTB involvement: Energy saving through exact measurements

In August, PTB took part in the Open Day at the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) in Berlin and illustrated the importance of exact measurements in the effective saving of energy. In the scope of this event, scientists working in the field of “New Methods for Thermal Energy Measurement” from the “Temperature and Synchrotron Radiation” Division presented their special measurement methods.

Power plants play an important role in generating electricity and producing energy. But a power plant should not simply produce electricity, it should moreover do this as efficiently as possible. An important measurand here is the flow velocity of the heated medium in the pipeline system of the power plant. Knowledge about the exact flow velocity may contribute to optimizing the system and ultimately to saving energy.

In the miniature test facility which was set up as an exhibit, a solar module regulated a water cycle via a centrifugal pump. With a laser probe, the flow velocity of the water was measured with great accuracy. The laser Doppler measuring technique used here (one of PTB's further developments) is currently being applied as a comparison method for determining volume flows in district heating, in gas quantity measurement, along with being a velocity standard for wind tunnels. Furthermore, this technique allows flow phenomena to be visualized and flow rate meters to be optimized.

In the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, the various departments and the subordinate authorities provide information about on-going projects, areas of research, initiatives and campaigns once a year at the Open Day. Thematically, the Open Day in 2014 focused on the “25th anniversary of the Peaceful Revolution” and the “Energy Transition”. Further information can be found at: www.bmwi.de

Akademische Abschlüsse • Academic Degrees

Promotionen 2014 • Doctorates in 2014

Name	Organisationseinheit	Thema
Steffen Buschschlüter	1.6	Untersuchung über die Temperatursteigerung bei der Phakoemulsifikation und deren Einfluss auf das Hornhautendothel
Tobias Möhring	2.1	Rückgeführte Energiemessung arbiträrer, nichtstationärer Signale
Enrico Mohns	2.3	Kalibrierensemble für Messgeräte zur Bestimmung des Wirkungsgrades von HGÜ-Umrichtern
Johann Meisner	2.3	Metrologische Infrastruktur für die HGÜ-Energiemesstechnik
Thomas Scheller	2.4	Electrical properties of Josephson junctions with NbXSi1-X barriers customised for AC voltage standard applications
Christoph Leicht	2.5	Nicht-adiabatische Halbleitereinzelelektronenpumpe unter Magnetfeldeinfluss
Heiko Fuser	2.5	Interaction of Light with Semiconductors: Terahertz Frequency Combs and Terahertz Steering
Nadine Noordmann	3.1	Natural Fractionation of Uranium Isotopes
Oliver Witzel	3.2	In-situ Laserabsorptionsspektroskopie zur μ s-schnellen Bestimmung von Spezieskonzentrationen und Temperaturen in Verbrennungsmotoren
Bernhard Buchholz	3.2	Entwicklung, Primärvalidierung und Feldeinsatz neuartiger, kalibrierungsfreier Laser-Hygrometer für Forschungsflugzeuge
Anne Seidel	3.2	Tunable diode laser absorption tomography for spatially resolved concentration measurements
Lars Hendrik Simon	3.7	Zündwirksamkeit von Ultraschall in explosionsfähigen Atmosphären
Felix Welzel	3.7	Entstehung von Zündquellen durch mechanische Reibvorgänge und deren Zündwirksamkeit in explosionsfähigen Atmosphären
Tobias Klein	4.2	Rückgeführte, hochgenaue Größenmessung von Nanopartikeln im Transmissionsmodus eines Rasterelektronenmikroskops
Tatsiana Wiegner	4.2	High Accuracy Measurements of Standard Reflection Materials and Goniochromatic Effect Pigments
Oliver Appel	4.3	Bose-Einstein Condensation and Narrow-Line Photoassociation Spectroscopy of Calcium
Max Kahmann	4.3	Link between Photoassociation and Optical Feshbach Resonances through the Example of Calcium
Nils Huntemann	4.4	High-Accuracy optical clock based on the octupole transition in $^{171}\text{Yb}^+$

Promotionen 2014 • Doctorates in 2014

Name	Organisationseinheit	Thema
Jannes B. Wübbena	QUEST-1	Controlling Motion in Quantum Logic Clocks
Yong Wan	QUEST-1	Quantum Logic Spectroscopy of Atomic and Molecular Ions
Sana Amairi	QUEST-1	A Long Optical Cavity For Sub-Hertz Laser Spectroscopy
Franziska Renner	6.2	Benchmark-Experiment zur Verifikation von Strahlungstransportrechnungen
Marion Bug	6.6	Nanodosimetric particle track simulations in water and DNA media
Cornelia Streeck	7.2	Röntgenfluoreszenzanalyse an Cu(In,Ga)Se ₂ -Dünnschichten zur Bestimmung der Element-tiefengradienten
Ingmar Müller	7.3	Linking Detector Radiometry from Milliwatts Radiant Power to Single Photons
Thomas Schwentek	8.1	Untersuchungen über die Interaktion des Augeninnendrucks mit anderen intraokularen Fundamentalparametern und ihre Rückwirkung auf die messtechnischen Eigenschaften von Tonometern bei der klinischen Evaluierung
Tommaso Fedele	8.2	High-frequency electroencephalography (hf-EEG): Non-invasive detection of spike-related brain activity
Alexander Jelzow	8.3	In vivo quantification of absorption changes in the human brain by time-domain diffuse near-infrared spectroscopy
Stefan Fruhner	8.4	Realistic modeling of electrical excitaton in the human heart and simulation of the cardiac magnetic field
André Fiebach	8.4	A dissipative finite volume scheme for reaction-diffusion systems in heterogeneous materials

Diplom- und Masterarbeiten 2014 • (Master) Theses in 2014

Name	Organisationseinheit	Thema
Rudolph Hemmeter	1.7	Qualifikation des schiefwinkligen Hallraumes für Schallabsorptions- und Schalleisungsmessungen
Ines Barbary	2.2	Untersuchung einer Antennen-Freifeld-Messseinrichtung
Zhouke Xu	2.3	Konzeption und Aufbau eines softwaregesteuerten Messplatzes zur Frequenzgangermittlung mittels analoger Sprungfunktionen
Arne Kuntze	3.2	Charakterisierung eines Partikelanzahlnormal für Rußpartikel: Konditionierung und Stabilität
Johannes Rosahl	3.2	Untersuchungen zu den Anforderungen eines Partikelanzahlnormal für Silber-Nukleationspartikel
Hannah Poppitz	3.7	Untersuchung zur Zündquellenentstehung in metallischen Reibsituationen bei repetierendem Kontakt
Fabian Plag	4.1	Bestimmung der Messmittelfähigkeit eines gepulsten Solarsimulators mit Kennlinienmessgerät für die Kalibrierung von Solarzellen
Sebastian Grondkowski	QUEST-3	Quantenkontrolle von ${}^9\text{Be}^+$ Hyperfein-Qubits
Martin Johansson	6.6	Setup of apparatus for determination of thermal transpiration effect
David Gilbers	7.3	Radiometrische Charakterisierung eines Array-Spektrometers zur Messung des Emissionsgrades im Temperaturbereich bis 2000 °C

Bachelorarbeiten 2014 • Bachelor Theses in 2014

Name	Organisationseinheit	Thema
Thomas Pobieda	1.6	Die praktische Anwendung von Resonatoren zur Bedämpfung akustischer Raummoden
Tobias Michaelis	1.6	Realisierung eines Messplatzes zur Infraschallkalibrierung
Sebastian Stubba	1.6	Experimentelle Validierung eines Schalleistungs-Messplatzes
Tony Granz	2.2	Untersuchung der Error Vector Magnitude bei einer Übertragung mit Trägerfrequenzen im Terahertzbereich
Carolin Peiß	2.2	Messtechnische Untersuchung an Antennen und Streuobjekten im Millimeter-Wellenbereich mit Hilfe eines Antennenscanners
Michael Botschka	2.2	Messtechnische Untersuchung an Antennen und Streuobjekten im Millimeter-Wellenbereich mit Hilfe eines Antennenscanners
Matthias Korejwo	2.3	Charakterisierung der Stromwandlermesseinrichtung ‚SEKAM IV‘ für den Audiofrequenzbereich
Tony Kiesel	2.3	Entwicklung einer Hochleistungs-Normalmesseinrichtung
Stephan Passon	2.3	Aufbau und Kalibrierung eines gedämpft-kapazitiven Hochspannungsteilers für Messungen bis 1 MV
Sören Fricke	2.3	Programmierung und Evaluation eines ratio-metrischen Messsystems zur Modernisierung von Messeinrichtungen für Messwandler
Jörgen Jungclaus	2.4	Optimierung der Technologie für die Herstellung von Nano-SQUIDs mit SNS-Josephson-Kontakten unter 100 nm
Katrin Jungclaus	2.6	Untersuchung von Strom-Equalizern in einer 4-Tor Josephson-Impedanzmessbrücke
Ruben Köhler	3.1	Optimierte Präparation von Goldnanopartikeln für AFM-Größenmessungen mittels Immersions- und Spincoatingverfahren
Julian Grodde	3.2	Charakterisierung und Validierung eines Cantilever basierten photo-akustischen Gasspektrometers zur Detektion von CO ₂ , H ₂ O und NH ₃
Stefan Henkel	3.7	Untersuchung der Zündgefahren elektrischer Spritzpistolen
Alexander Nietiedt	3.7	Entstehung mechanisch erzeugter Zündquellen an realen Anordnungen
Konstantin Ladner	4.1	Integration einer Klimakammer in einen Kennlinienmessplatz für Solarzellen
Stefanie Rathe	QUEST-3	Aufbau einer Apparatur für Experimente mit einzelnen Ionen

Bachelorarbeiten 2014 • Bachelor Theses in 2014

Name	Organisationseinheit	Thema
Carolin Köberl	6.3	Bestimmung der Intensitätsverteilung von Strahlungsfeldern mit hoher Genauigkeit mittels Flat-Panel-Detektor
Michael Andersch	7.2	Charakterisierung von Peptiden mittels Synchrotron-gestützter THz Spektroskopie
Janis Eilbracht	7.2	Validierung des Einflusses stehender Wellenfelder bei Röntgenfluoreszenz- und Röntgenreflektometrieuntersuchungen unter streifendem Einfall an nanoskaligen Multischichtsystemen
Jens Wegener	7.2	Kontaktlose Charakterisierung von Solarzellen mit einem magnetoptischen Verfahren
Markus Wehpke	7.4	Entwicklung eines Kalibriersystems für die Darstellung der Internationalen Temperaturskala
Oliver Eberle	8.1	Tidalvolumenbestimmung eines Kleintierbeatmungsgerätes zur Applikation von hyperpolarisiertem ^{129}Xe Gas und Vorversuche an Mäusen
Isabella Frese	8.1	Experimentelle Bestimmung der rechts- bzw. linksdrehenden B1-Feldkomponenten sowie des E1-Feldes in einem klinischen 3-Tesla MRT mit Hilfe kalibrierter elektrooptischer Feldsensoren

Zahlen und Fakten • Figures and Facts

Personal: Entwicklung • Staff: development

Personelle Entwicklung von 2005 bis 2014 (Stand: 31. Dezember 2014) • Development of staff
 a) unbefristet • unlimited in time b) zeitlich befristet • limited in time

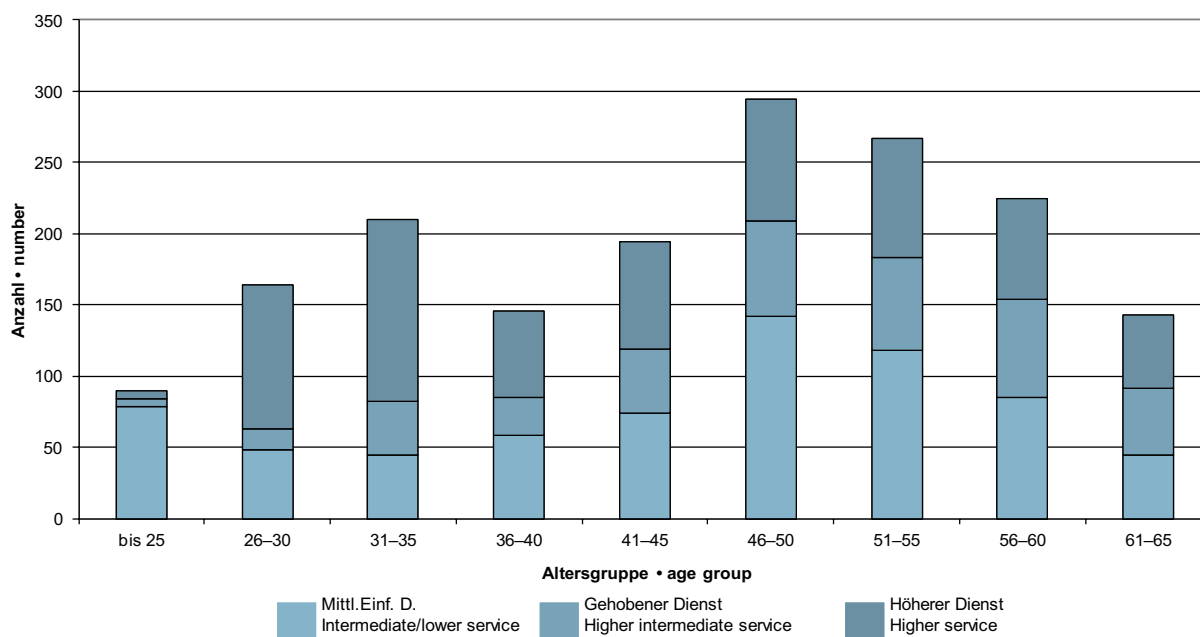
Beschäftigungsverhältnis	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
a)										
Beamte • civil servants	510	515	523	517	513	537	535	550	540	533
Angestellte • employees	692	863	833	830	831	795	779	752	718	704
Arbeiter • workers	193	196	--*	--	--	--	--	--	--	--
gesamt • total	1398	1378	1356	1347	1344	1332	1314	1302	1258	1237

b)

Auszubildende • trainees	159	150	136	134	135	134	131	135	140	142
befristet Beschäftigte • temporary staff	69	66	98	110	175	230	264	209	234	211
Drittmittelpersonal • staff members financed by third parties	109	169	162	172	185	194	216	286	303	295
Mitarbeiter gesamt staff members in total	1735	1763	1752	1763	1839	1890	1925	1932	1935	1885

* 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)

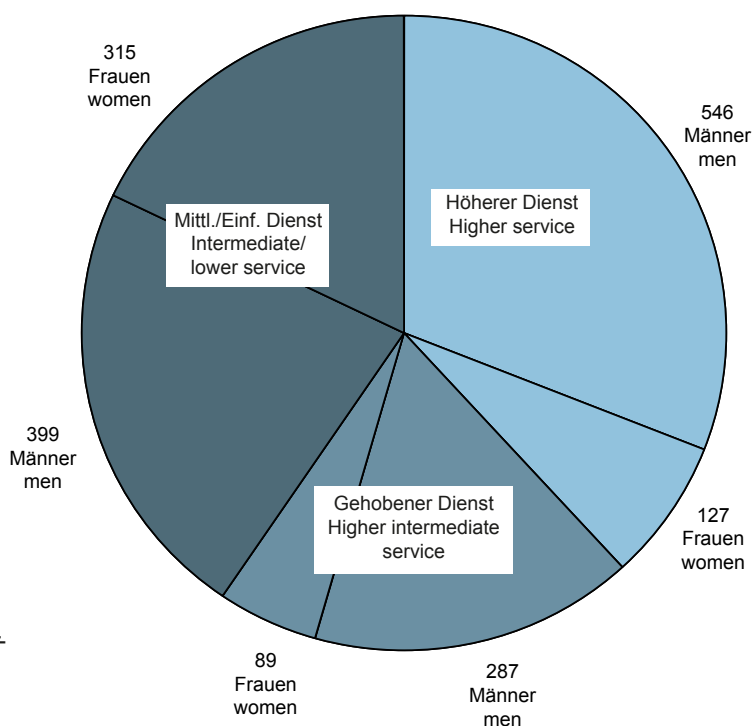
Ausbildung • Training (31. Dezember 2014)

	BS	Berlin	
Duales Studium Elektrotechnik im Praxisverbund	17 (4)	--	Dual studies in electrical engineering in a practice union
IT-Systemelektroniker	16 (6)	--	information and telecommunication technologists
Elektroniker/in für Geräte und Systeme	31 (9)	--	electronics technicians for devices and systems
Physiklaboranten	15 (6)	--	laboratory technicians, physics
Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik	12 (3)	--	electronics engineers for electrical and building services engineering
Feinwerkmechaniker Fachrichtung Feinmechanik	15 (4)	6 (2)	precision instrument makers speciality: precision mechanics
Fotografen	2 (1)	--	photographers
Mediengestalter	3 (1)	--	media designers
Tischler	--	6 (3)	joiners
Elektroniker/in für Informations- und Systemtechnik	--	11 (3)	electronics technicians for information and systems technology
Verwaltungsfachangestellte	--	8 (2)	public administration employees
gesamt	111 (34)	31 (10)	total

Die PTB gehört zu den größten Ausbildungsbetrieben in der Region Braunschweig. Gegenwärtig sind 142 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. 142 trainees are at present employed by PTB. The figures in parentheses indicate fresh engagements in the year under review.

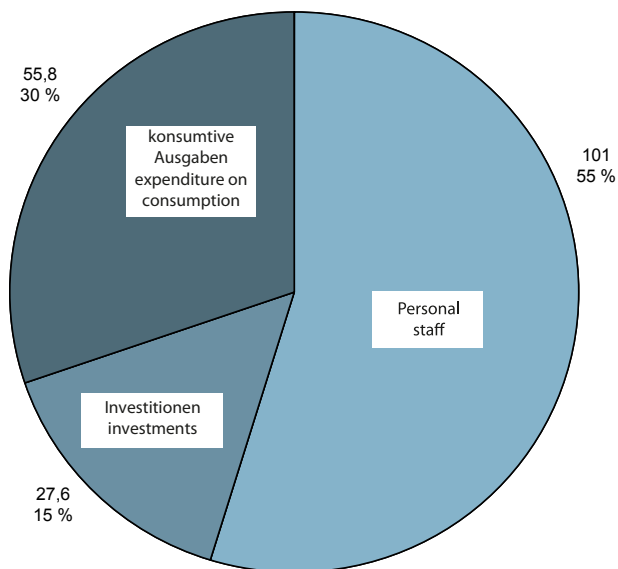
Personal: Laufbahn Staff • civil service career



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

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

Haushalt: Ausgabenverteilung • Budget: break-down of expenditure



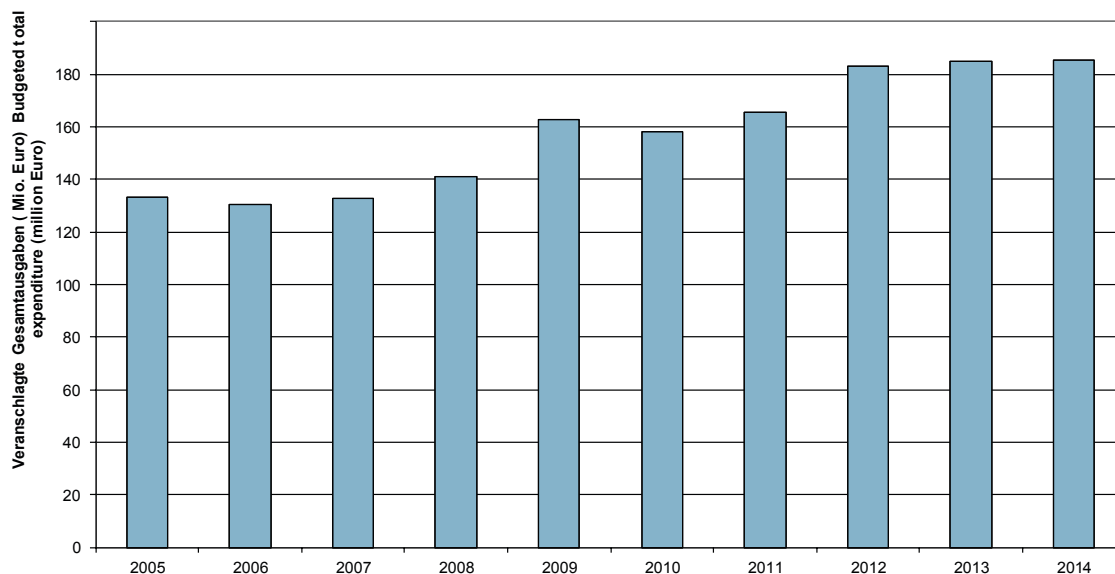
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. Euro). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

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

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

Haushaltsmittel	2012	2013	2013	budgetary means
Personalausgaben	93,9	97,3	101,0	staff costs
Investitionen (Bau und Geräte)	34,2	29,5	27,6	investments (building activities and instruments)
Zuweisungen und Zuschüsse	2,6	1,2	1,1	allocations and grants
konsumtive Ausgaben	52,4	57,1	55,8	expenditure on consumption
gesamt	183,1	185,1	185,5	total

Haushalt: Entwicklung • Budget: development

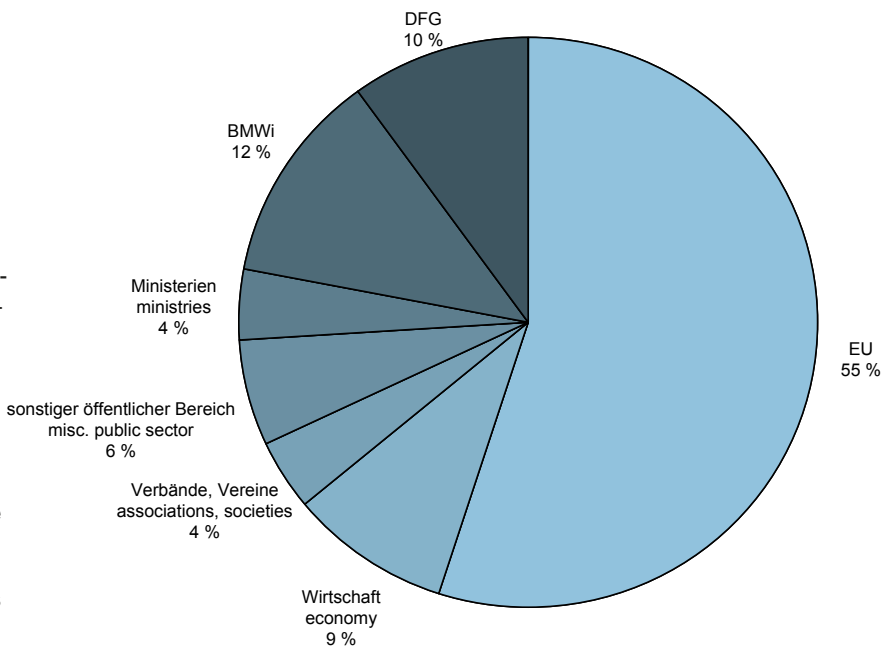


Entwicklung der Gesamtausgaben im PTB-Haushalt in den letzten zehn Jahren
Development of the total expenditure of the PTB budget in the past ten years

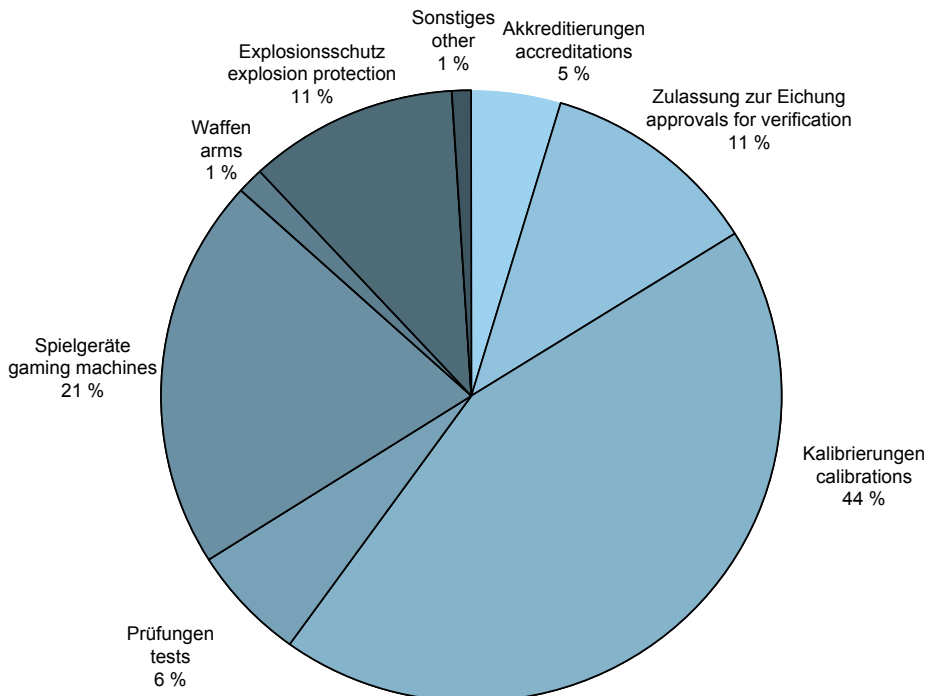
Drittmittel: Forschungsprojekte • Third-party funds: research projects

Die Drittmittel für Forschungsvorhaben summieren sich 2014 auf 17,5 Mio. Euro. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Insgesamt wurden im Berichtsjahr 29,8 Mio. Euro für 591 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) verwendet (davon 3,4 Mio. Euro für 65 Projekte in Berlin).

In 2014, the third-party funds for research projects added up to a total of 17.5 million euros. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources. In the year under review, a total of 29.8 million euros were used for 591 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 3.4 million euros of these for 65 projects in Berlin.



Einnahmenanteile der Dienstleistungsbereiche • Income shares of the service centers



Einnahmenanteile der verschiedenen Dienstleistungsbereiche der PTB im Jahr 2014.
Gesamtforderungen: 11,65 Millionen Euro

Income distribution of 2014 among the various service sectors of PTB.
Total receivables: 11.65 million euros

Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures

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

... in Braunschweig		2012	2013	2014	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	28 200	27 800	27 600	electrical energy
Wärme	MWh	25 700	24 400	21 100	heat
Gas	m ³	29 900	28 500	26 900	gas
Wasser	m ³	90 800	91 100	85 600	water
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	82	87	75	refuse-like
recycelt	t	223	194	209	recycled
zur Beseitigung	t	19	15	20	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	66 900	78 500	83 900	waste disposal costs (approx.)

... in Berlin		2012	2013	2014	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	8050	8000	8500	electrical energy
Gas	m ³	17 000	11 000	19 700	gas
Wasser	m ³	28 900	32 400	32 800	water
Helium, flüssig	l	47 600	48 000	49 300	helium, liquid
Stickstoff, flüssig	l	39 500	44 000	51 900	nitrogen, liquid
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	47	43	47	refuse-like
recycelt	t	70	63	63	recycled
zur Beseitigung	t	2	3	7	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	16 100	15 800	10 950	waste disposal costs (approx.)

PTB-Seminare im Jahr 2014 • PTB seminars in 2014

Messunsicherheiten bei der Darstellung und Messung des Drehmomentes
Leitung: Dr. D. Röske (1.2)
Februar 2014

Berechnung der Messunsicherheit – Empfehlungen für die Praxis
Leitung: Prof. Dr. S. Mieke (8.4)
März 2014

MATHMET 2014 – International Workshop on Mathematics and Statistics for Metrology
Leitung: Prof. Dr. M. Bär (8.4)
März 2014

Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich 2014
Leitung: Dr. J. Melcher, Dr. T. Schrader (2.1/2.2)
Mai 2014

PTB als Partnerin in der Energiewende – Strategiegespräch zur Rückführung mechanischer und dimensioneller Messgrößen für die Windenergie
Leitung: Dr. F. Härtig (1)
Mai 2014

Power-to-Gas
Leitung: Dr. S. Sarge (3.3)
Juni 2014

Waagen in Europa
Leitung: Dr. D. Knopf (1.1)
Juni 2014

Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Verkehrsüberwachungsgeräte
Leitung: Dr. F. Märtens (1.3)
Oktober 2014

MacroScale 2014 – Dimensional and related measurements at the macroscopic scale
Leitung: PTB (Dr. R. Schödel, 5.4) und BEV (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Österreich)
Oktober 2014

TraCIM Service – Traceable computational intensive metrology
Leitung: Dr. F. Härtig (1)
November 2014

Veröffentlichungen und Vorträge • Publications and Lectures

Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 2011 bis 2014 (vgl. Datenbank „PTB-Publica“ im Internet) und Anzahl der auswärtigen Vorträge, die PTB-Mitarbeiter/innen in diesen Jahren gehalten haben

Number of publications by PTB staff members (in scientific journals, books, conference digests, etc.) between 2011 and 2014 (cf. database “PTB-Publica” on the web) and number of lectures held by PTB staff members outside PTB in these years.

	2011*	2012*	2013	2014
Veröffentlichungen	670	706	610	664
Vorträge	962	911	919	996

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

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

Gastwissenschaftler, Gäste und Besucher

Im letzten Jahr kamen rund 13 000 Besucher aus aller Welt in die PTB (Standort Braunschweig). Den größten Anteil bildeten die metrologischen Fachbesucher aus Wissenschaft und Wirtschaft (6560) sowie die Teilnehmer an unterschiedlichsten Seminaren, Tagungen und Kolloquien (4402). Auch der allgemeine Besucherdienst der PTB im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit fand wie gewohnt regen Zuspruch (82 Besuchergruppen). Hinzu kamen zahlreiche Grundschulklassen, die im WissensForscher-Labor der PTB physikalische Experimente selbst durchführten. Insgesamt fanden so rund 2095 „Besucher in Gruppen“ den Weg in die PTB.

Guest scientists, guests and visitors

Last year, approx. 13,000 people from all over the world visited PTB (Braunschweig site). They were largely metrology specialists from science and the economy (6560) as well as participants in various seminars, conferences and colloquia (4402). Visits to PTB by the general public within the scope of public relations work were also very popular as usual (82 groups of visitors). Furthermore, numerous primary school classes came and conducted their own physics experiments in the PTB “WissensForscher” (KnowledgeSearchers) laboratory. Thus, altogether, approx. 2095 “visitors in groups” found their way to PTB.

Projektpartner der PTB

PTB's project partners



Internationale Zusammenarbeit

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

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

Volumen 2014

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung 17,01 Mio €

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.

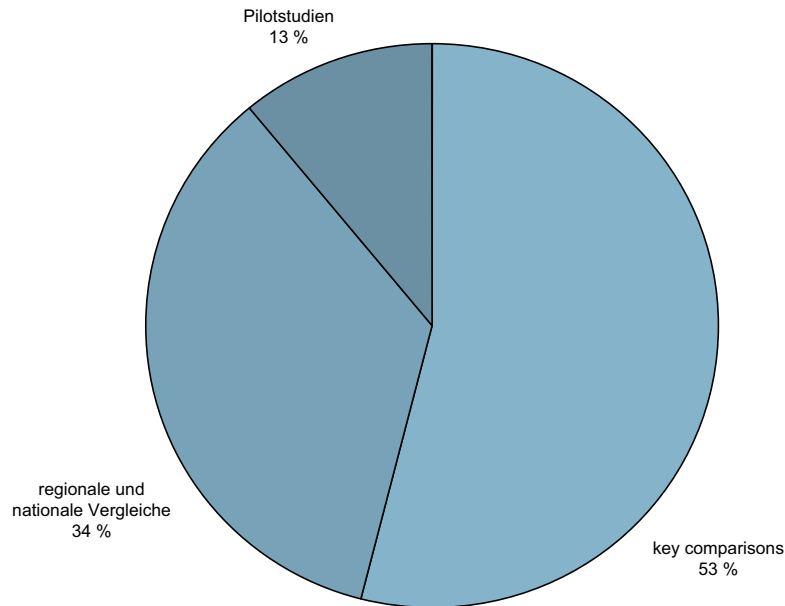
The projects are funded by the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ), the European Union and the World Bank.

Funding volume 2014

Federal Ministry for Economic Cooperation and Development 17.01 million €

Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements

Die PTB nahm im Berichtsjahr an 38 Vergleichsmessungen teil, und zwar an 20 Schlüsselvergleichen, 13 regionalen/nationalen Vergleichen und 5 Pilotstudien. 82 % der Vergleichsmessungen waren von direkter Relevanz für die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB im Rahmen des CIPM-MRA. An 6 Vergleichsmessungen nahm die PTB als Pilotlabor teil.



In the year under report, PTB took part in 38 comparable measurements, namely 20 key comparisons, 13 regional/national comparisons and 5 pilot studies. 82 % of the comparable measurements were of direct relevance to the calibration and measurement capabilities of PTB within the scope of the CIPM MRA. PTB participated in 6 comparable measurements as a pilot lab.

Nationale Normungsvorhaben • National standardization projects

Die PTB engagierte sich im Jahr 2014 in 566 nationalen Gremien, darunter in 234 Normungsgremien. Insgesamt hat sie dabei 91-mal die Leitung inne.

PTB participates in 566 national bodies, among these 234 in the field of standardization. PTB heads a total of 91 of these bodies.

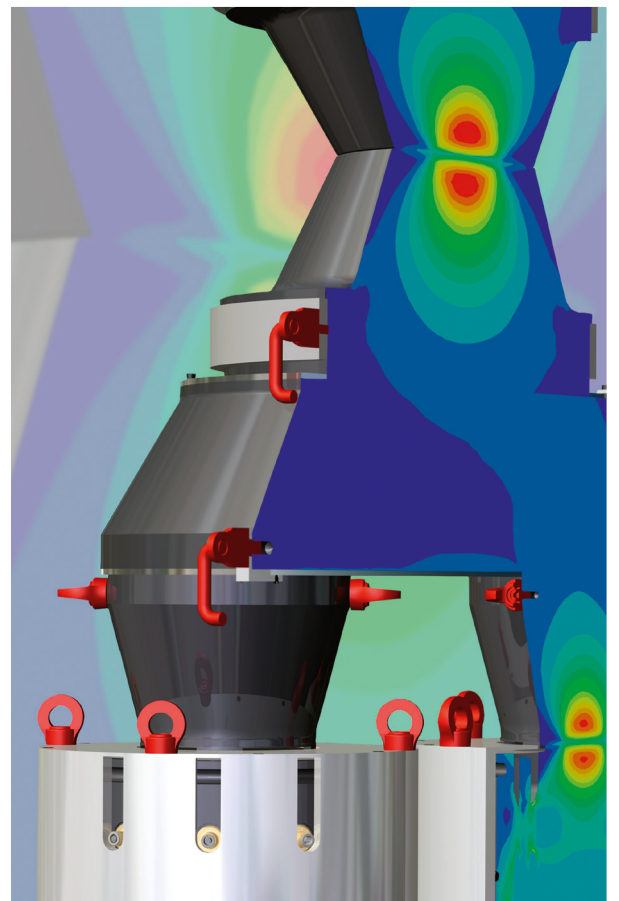
Internationale Normungsvorhaben • International standardization projects

Die PTB engagierte sich im Jahr 2014 in 556 internationalen Gremien, darunter in 205 Normungsgremien. Insgesamt hat sie dabei 85-mal die Leitung inne.

PTB participates in 556 international bodies, among these 205 in the field of standardization. PTB heads a total of 85 of these bodies.

Abteilung 1

Mechanik und Akustik



1. Mechanik und Akustik

Zum 1. April 2014 erfolgte der Wechsel des Abteilungsleiters. Nach vielen Jahren erfolgreicher Abteilungsleitung wechselte Dr. Roman Schwartz in das Präsidium der PTB und nimmt seither die Position des Vizepräsidenten der PTB wahr. Neuer, zunächst kommissarischer Abteilungsleiter wurde Dr. Frank Härtig. Er wechselte aus Abteilung 5 *Fertigungsmesstechnik*, wo er zuletzt den Fachbereich 5.3 *Koordinatenmesstechnik* leitete.

Seit dem Wechsel der Abteilungsleitung wird das europäische Forschungsvorhaben „Traceable Algorithms for Computational intensive Metrology“ (TraCIM); New06 innerhalb der PTB gemeinsam von den Abteilungen 1, 5 und Z bearbeitet. Schwerpunkt des Forschungsvorhabens ist die Validierung metrologischer Auswertalgorithmen unter Verantwortung der teilnehmenden europäischen Metrologieinstitute. Bevorzugtes Kommunikationsmedium ist das Internet, das interessierten Kunden die Möglichkeit bietet, ihre Auswertalgorithmen online und quasi automatisch validieren zu lassen. Bereits zur Mitte der dreijährigen Projektlaufzeit wurde hierzu der Verein TraCIM e. V. nach deutschem Recht gegründet. Die Gründungsveranstaltung fand im März 2014 statt. Der Verein hält auch die Wortmarke TraCIM. Das Sekretariat wird derzeit von der PTB wahrgenommen. Bereits im Mai 2014 wurde der Servicebetrieb aufgenommen. Seither können Auswertalgorithmen für Regelgeometrien nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate validiert werden. Angeboten werden für 2- und 3-dimensionale Daten Auswertungen für die Geometrien Gerade, Ebene, Kreis, Kugel, Zylinder und Konus. Die Firma Mitutoyo GmbH hat als erste Firma im Juni 2014, und damit ein Jahr vor Projektende, das erste Zertifikat erhalten.

Die Abteilung 1 ist sehr stark in Aufgaben des gesetzlichen Messwesens eingebunden. In Vorbereitung auf das Inkrafttreten des neuen Mess- und Eichgesetzes sowie der neuen Mess- und Eichverordnung, wurden mehrere abteilungsinterne Veranstaltungen durchgeführt, in denen die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter auf den bevorstehenden Wechsel vorbereitet wurden.

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

1.1 Masse und abgeleitete Größen

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

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

Das Thema Neudefinition des Kilogramms war auch in diesem Jahr ein Schwerpunkt der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse*. Neben der weiteren Unterstützung des Avogadro-Projekts innerhalb der PTB stehen dabei auch Arbeiten der im Rahmen der CCM-Roadmap zur Neudefinition vereinbarten Arbeiten im Fokus. Zurzeit werden Kilogramm-Prototypen verschiedener nationaler Metrologieinstitute im BIPM auf das Internationale Kilogramm-Prototyp rückgeführt, um eine möglichst gute Übereinstimmung der Experimente zur Neudefinition mit der aktuellen Kilogrammdefinition zu gewährleisten. Im Rahmen der vom BIPM ausgeführten „Extraordinary Calibrations“ wird auch die Rückführung der deutschen Prototypen auf das Internationale Kilogrammprototyp aktualisiert. In Vorbereitung der Neudefinition beteiligt sich die PTB an den EMRP-Projekten SIB03 „kNOW“ und SIB05 „NewKILO“ (Informationen unter www.euramet.org). Hierzu wurden u. a. die Masse einer ^{28}Si -Kugel in Luft und Vakuum bestimmt und Untersuchungen zum Einfluss der Oxidbildung auf die Massestabilität von Siliziumkugeln sowie zur Abhängigkeit des Sorptionsverhaltens von Massenormalen von dem verwendeten Massekomparator untersucht. Messungen zum Transfer und zur Aufbewahrung von Massenormalen in unterschiedlichen Medien (Luft/Vakuum/Schutzgas) wurden vorbereitet und werden derzeit ausgeführt. Als Mitglied des Steering

Titelbild:

Finite-Elemente-Simulation eines 30-MN-Build-Up-Systems



Bild 1: Teilnehmer des 280. PTB-Seminars mit dem Titel „Waagen in Europa“ im Juni 2014

Committees für die internationalen Vergleichsmessungen CCM.M-K4 (Informationen unter www.bipm.org) unterstützte die PTB die Auswertung der Ergebnisse der Teilnehmer und die Erstellung des Abschlussberichtes (Metrologia 51, 2014, Tech. Suppl., 07009). Die Messungen zum internationalen Vergleich CCM.M-K7 konnten in diesem Jahr abgeschlossen werden. Das Pilotlabor, das Korea Research Institute of Standards and Science, wird von den Kollegen der PTB bei der Auswertung und der Erstellung des Abschlussberichtes unterstützt. Der im Rahmen von COOMET geplante Vergleich COOMET.M.MK8, bei dem das ukrainische Staatsinstitut NSC IM als Pilotlabor agiert, wurde vorbereitet. Auch hier unterstützt die PTB die Durchführung des Vergleichs.

Neben diesen besonderen Aufgaben sorgen die Kollegen der Arbeitsgruppe auch auf nationaler Ebene für Rückführungen auf höchstem Niveau. Die Weitergabe des Know-hows bei der Kalibrierung von Gewichtsstücken auf dem sogenannten „E0“-Niveau wird im Rahmen eines „Generationswechsels“ bei den Kollegen auch im nächsten Jahr eine wichtige Aufgabe sein.

Im Arbeitsgebiet *Waagen* (Arbeitsgruppen 1.12 „Waagen“, 1.13 „Dynamisches Wägen“ und 1.14 „IT-Wägetechnik“) gab es in diesem Jahr neben den laufenden Arbeiten zu Prüfungen und Zertifizierungen von Waagen drei Highlights. Nachdem im September 2013 das Audit der Herstellerprüflaboratorien (manufacturer testing laboratory, MTL) im Rahmen des OIML-MAs für nichtselbsttätige Waagen erfolgreich durchgeführt wurde, konnten in diesem Jahr die Ergebnisse der Audits beim Treffen

des CPRs (committee of participation review) der OIML vorgestellt werden. Der Antrag der PTB auf Aufnahme der MTLs in die Liste ihrer Prüflaboratorien wurde diskutiert und die Laboratorien entsprechend akzeptiert (siehe http://www.oiml.org/en/certificates/maa/pdf/r76_biml_registration_rev9.pdf).

Im Sommer fand in Braunschweig das 280. PTB-Seminar statt, das unter dem Titel „Waagen in Europa“ sowohl vom Helmholtz-Fonds als auch vom Herstellerverband VDMA unterstützt wurde (Bild 1). Den mehr als 80 Teilnehmern aus Industrie, Eichbehörden und Konformitätsbewertungsstellen wurde neben Informationen zum neuen deutschen Eichrecht, IT im Waagenbereich, internationalen Gremien und spezifischen Fragestellungen bei der Konformitätsbewertung und Eichung von Waagen die Möglichkeit eines intensiven Austauschs geboten.

Im September 2014 fand das jährliche Treffen der Arbeitsgruppe 2 der WELMEC statt (siehe www.welmec.org), die sich hauptsächlich mit der technischen Interpretation und Umsetzung der europäischen Waagenrichtlinie (NAWID, 2009/23/EU) beschäftigt. Nachdem es in den vergangenen Jahren nicht gelungen war, die bestehenden Leitfäden so zu überarbeiten, dass eine Umsetzung des freiwilligen modularen Konzepts, wie es im Leitfaden 8.8 der WELMEC beschrieben ist, in für alle akzeptablem Rahmen möglich ist, wurde beim diesjährigen Treffen über eine neue Struktur der Leitfäden dieser Arbeitsgruppe diskutiert. Der vom NMi (Niederlande), NMO (Großbritannien) und der PTB unter Beteiligung der Herstellvertreter (CECIP) entwickelte

Struktur-Vorschlag wird von der Arbeitsgruppe einstimmig unterstützt. Nach Zustimmung durch das WELMEC-Committee (Vorstand) soll mit der Gestaltung neuer Leitfäden begonnen werden. Auch hierbei wird die PTB durch die Leitung von zwei Unterarbeitsgruppen wesentlich eingebunden sein.

Im Fachbereich 1.2 *Festkörpermechanik* werden mit Kraft-Normalmesseinrichtungen Kräfte von 0,5 N bis 16,5 MN und mit Drehmoment-Normalmesseinrichtungen Drehmomente von 1 mN · m bis 1,1 MN · m realisiert. Die Weitergabe dieser Einheiten erfolgt über die Kalibrierung von Kraft- und Drehmomentmessgeräten in den Normalmesseinrichtungen.

In der Arbeitsgruppe 1.21 *Darstellung Kraft* können mit der größten Kraft-Normalmesseinrichtung nach dem Prinzip der hydraulischen Übersetzung Kräfte bis 16,5 MN in Zug- und Druckrichtung realisiert werden und so Kraftmessgeräte mit relativen erweiterten Messunsicherheiten von 0,01 % im vollautomatischen Betrieb kalibriert werden. Dies wurde möglich durch die umfangreiche Modernisierung der Anlage in den vergangenen Jahren und der im Anschluss von der PTB durchgeführten Untersuchung dieser Anlage über den gesamten Messbereich. Damit steht dieses nationale Normal für Kalibrierungen von Kraftmessgeräten geringster Genauigkeitsklasse (Klasse 00 nach ISO 376) zur Verfügung und wird desweiteren für internationale Forschungsprojekte eingesetzt. So wurden im vergangenen Jahr im Rahmen des EMRP-Projektes SIB63 „Force Metrology“ die neuen Built-up-Systeme der PTB für Kräfte bis 30 MN und 50 MN ausgiebig untersucht und bereits für Messungen in großen Kraftmesseinrichtungen des NPL, der BAM und der MPA Braunschweig eingesetzt. Die Zielsetzung ist dabei, im obersten Kraftbereich die Messunsicherheiten zu reduzieren.

Die Arbeitsgruppe 1.22 *Darstellung Drehmoment* betreibt seit einiger Zeit eine Normalmesseinrichtung für statische Drehmomente mit einem Messbereich von 1 N · m und einem kleinsten dargestellten Drehmoment von 1 mN · m. Diese ist nach dem bewährten Hebel-Masse-Prinzip aufgebaut, wobei ein Hebel aus Invar zum Einsatz kommt, damit die Temperatureinflüsse auf das dargestellte Drehmoment minimiert werden. Eine Luftlagerung des Hebels sorgt für hinreichend kleine Reibungseinflüsse auf das zum Aufnehmer hin übertragene Drehmoment. In diesem Messbereich ist diese Einrichtung eine von ganz wenigen Messeinrichtungen weltweit. Nach einer Betriebszeit von ca. fünf Jahren

war es notwendig geworden, die messtechnischen Parameter, insbesondere die Langzeitstabilität, zu überprüfen. Zu diesem Zweck wurde eine Studie durchgeführt, die alle Einflussgrößen und deren Messunsicherheiten betrachtete. Es wurde nachgewiesen, dass im Bereich von 0,1 N · m bis 1 N · m eine kleinste erweiterte relative Messunsicherheit von $0,43 \cdot 10^{-4}$ ($k = 2$) erreicht wird. Für kleinere Drehmomente von 0,01 N · m bis 0,1 N · m beträgt dieser Wert $1,1 \cdot 10^{-4}$ und im untersten Bereich von 0,001 N · m bis 0,01 N · m muss mit $1,0 \cdot 10^{-3}$ gerechnet werden. Bei den kleinsten Drehmomenten hat sich die Reibung im Luftlager als begrenzender Einfluss erwiesen. Dieser ist sehr klein und kann nur indirekt über einen Empfindlichkeitstest nachgewiesen werden.

Für die Luftlagerreibung wurde eine Standardmessunsicherheit von $0,3 \mu\text{N} \cdot \text{m}$ abgeschätzt. Mit demselben Wert wurden veränderliche Antriebsmomente im Luftlager oder variable Kräfte auf das Hebel-Masse-System bewertet. Insgesamt ergab sich, dass die angestrebte erweiterte relative Messunsicherheit von $1 \cdot 10^{-4}$ für die oberen zwei Größenordnungen von 0,01 N · m bis 1 N · m im Wesentlichen erreicht und teilweise unterboten werden. Die im Rahmen von Kalibrierungen verwendeten Werte sind dabei aufgerundet.

Einen neuen Pfad betrat die Arbeitsgruppe mit der Ausrichtung eines Seminars zum Thema Messunsicherheiten bei der Darstellung und Messung des Drehmomentes in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Kalibrierdienst. Dieses 276. PTB-Seminar fand am 19. und 20. Februar 2014 in der PTB statt und richtete sich hauptsächlich an Mitarbeiter von für die Messgröße Drehmoment akkreditierten Kalibrierlaboratorien.

Im Gegensatz zu ähnlichen Seminaren, die in der Regel ein größeres Spektrum abdecken, wurde bei diesem Seminar der Schwerpunkt auf die Messgröße Drehmoment gelegt.

Im Fachbereich 1.2 wird neben den Einzelgrößen Kraft bzw. Drehmoment auch die Überlagerung dieser Größen als Mehrkomponentenmessung untersucht. Insbesondere für die Rückführung von Reibwertmessungen, mit deren Hilfe Schraubenverbindungen optimiert werden, wurde eine Kalibriermöglichkeit geschaffen, bei der eine Kraft im Bereich von einigen hundert Kilonewton (die Vorspannkraft der Schraube) mit einem Drehmoment von einigen hundert Newtonmeter (dem Anzugsmoment der Schraube) überlagert werden kann. Dazu wurde für

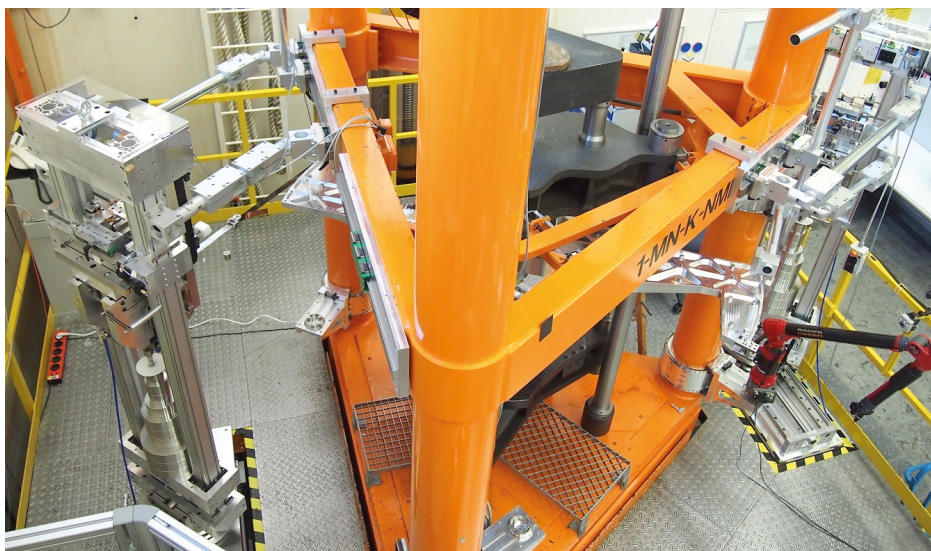


Bild 2: 1-MN-Kraft-Normalmessenrichtung (Mitte) mit zwei zusätzlichen Belastungseinrichtungen für die Erzeugung eines Drehmomentes als Kräftepaar und einem Hebel mit Wabenstruktur

die 1-MN-Kraft-Normalmessenrichtung eine Zusatzrichtung entwickelt, konstruiert und aufgebaut, die genau dies ermöglicht.

Bild 2 zeigt einen Ausschnitt aus der Kraftmessrichtung. Mit ihr können Kräfte mit einer erweiterten relativen Messunsicherheit von $2 \cdot 10^{-5}$ ($k = 2$) dargestellt werden. Darüber hinaus sind zwei zusätzliche Belastungseinrichtungen zu erkennen. Über direkte Massewirkung im Schwerfeld der Erde durch Umlenkung der Kraftwirkungslinie aus der vertikalen in die horizontale Richtung wird ein Kräftepaar und damit ein Drehmoment erzeugt. Luftlager verringern den Einfluss von Reibkräften.

Die Ergebnisse zeigen, dass auch für das überlagerte Drehmoment eine hinreichend kleine erweiterte Messunsicherheit unter $2 \cdot 10^{-4}$ ($k = 2$) erreicht wird.

Im Zusammenhang mit den in Windenergieanlagen auftretenden sehr großen Drehmomenten von mehreren MN · m sind als weiterer abteilungsübergreifender Schwerpunkt der Abteilungen 1 und 5 die Ausführungs- und Realisierungsplanungen für ein Kompetenzzentrum Windenergie entstanden. Die Grundlage bildet das Energiekonzept der PTB, das 2012 vorgestellt wurde. Auf Einladung des Präsidenten wurden im Mai 2014 Vertreter aus Industrie und Hochschulen zu einem Strategiegeländgespräch eingeladen dem 286. PTB-Seminar mit dem Titel „PTB als Partnerin in der Energiewende“ (Bild 3). Erörtert wurde, inwieweit die PTB die deutsche Industrie beim Aufbau aktueller und künftiger Windkraftanlagen unterstützen kann.

Auf der Basis des benannten Bedarfs laufen bis heute Planungen zur technischen Umsetzung und zur



Bild 3: Teilnehmer des 286. PTB-Seminars mit dem Titel „PTB als Partnerin in der Energiewende“ im Mai 2014

finanziellen Realisierung. Inhaltliche Schwerpunkte bilden die Messung geometrischer Bauteile aus dem Antriebstrang von Windkraftanlagen, wie Lager, Wellen, Getriebeteile oder Bremscheiben mit Bauteilabmessungen von $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 2\text{ m}$. Darüber hinaus werden Pläne zum stufenweisen Aufbau einer Drehmomentnormalmesseinrichtung erarbeitet. Zunächst ist an den Aufbau einer $5\text{-MN} \cdot \text{m}$ -Anlage gedacht. Dritter Schwerpunkt ist die Erprobung und die Realisierung einer neuen Wind-LIDAR Mess-einrichtung des Fachbereiches 1.4 *Gase*. Ungeklärt sind derzeit die Finanzierung sowie der Standort des Kompetenzzentrums.

Im August 2014 endete das europäische Forschungsprojekt „Rückführbare dynamische Messung mechanischer Größen“ (EMRP IND09), das über drei Jahre die Forschung und Entwicklung in den Arbeitsgruppen 1.71 *Darstellung Beschleunigung*, 1.73 *Stoßdynamik*, 1.23 *Periodische Kräfte* und 1.33 *Dynamische Druckmessung* der Fachbereiche 1.7, 1.2 und 1.3 prägte. Auch nach Abschluss der offiziellen Projektphase gehen die Entwicklungsarbeiten an diesem Themenkomplex weiter.

Im Rahmen des Projektes wurden grundlegende Entwicklungen zur dynamischen Kalibrierung von Kraft- und Drehmomentsensoren sowie Messverstärkern vorangetrieben, mit denen die PTB ihre Vorreiterrolle auf dem Gebiet des Messens dynamischer Größen ausbauen konnte. Gleichzeitig wurden andere europäische Institute in die Lage versetzt, ähnliche Messsysteme, wie sie in der PTB bereits vorhanden sind, aufzubauen und eigene Forschung auf diesem Gebiet zu betreiben.

Im vergangenen Jahr wurden die neuen Ergebnisse zur dynamischen Kalibrierung von Messverstärkern (Spannungs-, Ladungs- und Brückenverstärkern) in einen Normentwurf zusammengefasst und bei DIN und ISO erfolgreich eingereicht. Damit werden die Ergebnisse in absehbarer Zeit der Industrie als Richtlinie für die Arbeit in den industriellen Kalibrierlaboratorien zur Verfügung stehen.

Die Untersuchungsergebnisse für die Kalibrierung von Kraft- und Drehmomentenaufnehmern sowie die Charakterisierung der Kalibriereinrichtungen wurden auf internationalen Konferenzen veröffentlicht.

Dass sowohl das Thema des dynamischen Messens mechanischer Größen als auch das EMRP-Projekt als solches große internationale Beachtung erreicht hat, spiegelt sich auch in den Einladungen zu Vor-

trägen u. a. in Mexiko und Brasilien wieder, denen die PTB Mitarbeiter gern nachgekommen sind.

Die Arbeitsgruppe 1.23 *Periodische Kräfte* hat in diesem Projekt verschiedene Einflüsse auf die Unsicherheit bei der periodischen Kalibrierung von Kraftaufnehmern untersucht. Dazu zählen beispielsweise die longitudinale und transversale Beschleunigungsverteilung der zur Erzeugung der dynamischen Kraft eingesetzten Zusatzmasse. Transversale Schwingungen der Zusatzmasse, sogenannte Taumelbewegungen, führen zu einer erhöhten Messunsicherheit der Gesamtbeschleunigung und damit der wirksamen dynamischen Kraft. Um diese Beschleunigungskomponenten genauer zu untersuchen, wurden Messungen mit triaxialen Beschleunigungssensoren durchgeführt. Diese Sensoren erlauben die simultane Messung der Beschleunigung in allen drei Raumrichtungen. Durch die spezielle Anordnung von vier solchen Aufnehmern ist es möglich, die Transversalbeschleunigung in acht verschiedene Richtungen mit einem Winkelabstand von 45° auf der Oberfläche der Zusatzmasse zu messen; siehe Bild 4. Durch diese Messungen konnten bestimmte Frequenzen identifiziert werden, bei denen erhebliche Querschwingungen auftreten. Der physikalische Grund für dieses Verhalten konnte mit Hilfe von FEM-Simulationen in einer Modalanalyse sichtbar gemacht werden. Ursachen sind demnach Nickbewegungen und Torsionsschwingungen der Zusatzmasse relativ zum Kraftaufnehmer. Teilweise könnten diese Moden durch Einsatz eines Luftlagers abgeschwächt oder bei Kenntnis der Frequenzen durch vorherige FEM-Analyse bei einer Kalibrierung vermieden werden.

Die Arbeitsgruppe 1.33 *Dynamische Druckmessung* hat im Rahmen dieses EMRP-Projektes eine neuartige Kalibriereinrichtung aufgebaut, in der hohe Druckpulse bis über 500 MPa mithilfe interferometrischer Verfahren gemessen und letztlich rückgeführt werden sollen. Der Aufbau der Einrichtung (siehe Bild 5) wurde im vergangenen Jahr mit den ersten Testmessungen erfolgreich abgeschlossen.

1.2 Durchfluss

Der Themenbereich *Durchfluss* wird in den Fachbereichen 1.4 *Gase* und 1.5 *Flüssigkeiten* bearbeitet. Er befasst sich mit der Darstellung und Weitergabe der Einheiten für Menge, Durchfluss und Geschwindigkeit strömender Gase, Menge und Durchfluss strömender Flüssigkeiten sowie der Menge von Flüssigkeiten in ruhendem Zustand.

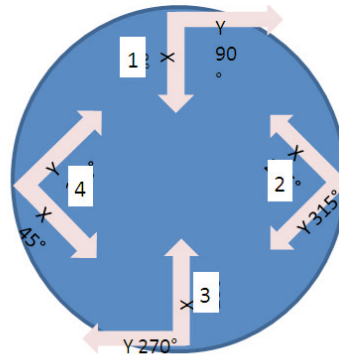
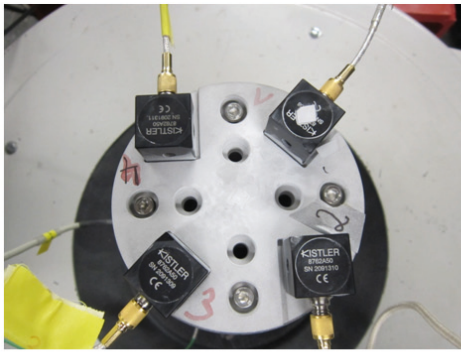


Bild 4: Die obere Reihe zeigt die Anordnung der triaxialen Beschleunigungssensoren auf der Zusatzmasse. Die Diagramme zeigen die Amplitude der transversalen Beschleunigung in den verschiedenen Winkelrichtungen. Die FEM-Simulationen zeigen die korrespondierenden Modalfrequenzen zu den aufgezeigten Messungen bei ca. 0,25 und 1,5 kHz.

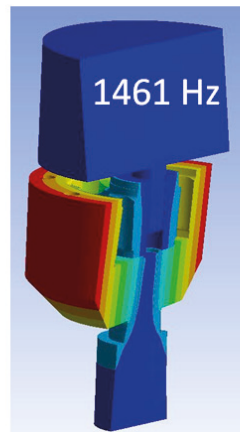
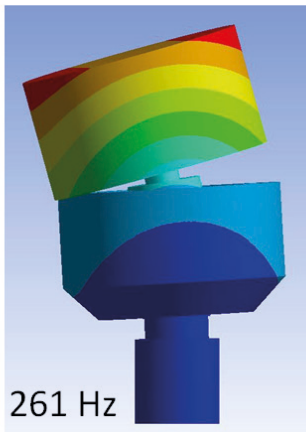
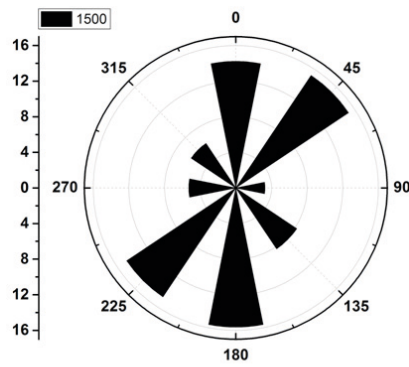
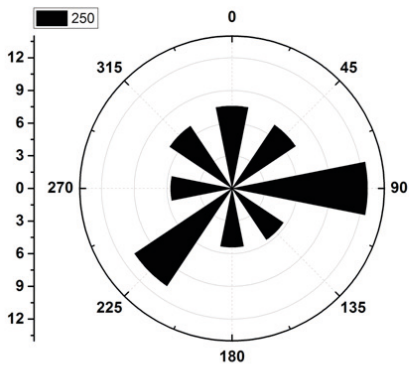


Bild 5: Neue Einrichtung zur laserinterferenziellen Messung von Druckimpulsen hoher Intensität

Bild 6: Versuchsaufbau des bistatischen Transfer-Wind-Lidar-Systems (links) und kommerziell erhältliches, monostatisches WindCube-Lidar (rechts)



In der Arbeitsgruppe *Strömungsmesstechnik* des Fachbereiches 1.4 Gase wurde der Göttinger Windkanal im Zusammenhang mit Messungen zum CCM Key Comparison KC3 „Air Speed“ und Untersuchungen zur Kalibrierung von Prandtl'schen Staurohren mit einem zusätzlichen langzeitstabilen LDA-Bezugsnormal ausgestattet. Durch diese Maßnahme konnten Messabweichungen im Bereich von 0,2 % näher analysiert werden.

Gemeinsam mit der TU Dresden, der ILA-GmbH und der OPTOLUTION Messtechnik GmbH wurde das vom BMWi im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) geförderte Projekt „Entwicklung von Profilsensoren für Laser-Doppler-Velocimeter (LDV)“ bearbeitet. Das von der PTB entwickelte Erweiterungsmodul für kommerzielle LDV-Systeme konnte mit einer Ortsauflösung von 0,3 % der gewählten Messvolumenlänge, die bei üblichen LDV-Systemen bis zu 10 mm betragen kann, realisiert werden.

Im Rahmen der „Transfer-Wind-Lidar“-Entwicklungsarbeiten erfolgten erste erfolgreiche Vergleichsmessungen mit kalibrierten konventionellen Anemometern für die Windmessung. Hierzu wurden erstmals die Messdaten von einem in der Windenergiebranche gebräuchlichen „WindCube-Lidar“ in Messhöhen von 50 m bis 200 m wie auch die Daten von einem auf einem 10 m hohen Messmasten montierten Ultraschallanemometer mit den jeweils in gleichen Höhen zeitgleich aufgenommenen Daten des Transfer-Wind-Lidar-Systems verglichen (Bild 6). Dabei wurden in flachem Gelände für die über eine Stunde gemittelten Geschwindigkeitswerte Abweichungen von weniger als 1 % festgestellt.

Mit dem EMRP-Projekt ENV07 METEOMET konnten auch die auf Transfer-Wind-Lidar-Messungen basierenden Untersuchungen zur Rückführbarkeit von Vor-Ort Windmessungen, in denen die mittels

Ultraschallanemometer in 10 m Höhe in flachem und komplexem Gelände erhaltenen Daten in direkten Bezug zu den zeitgleich erfassten Transfer-Wind-Lidar-Daten aus 10 m und 50 m Messhöhe gesetzt wurden, erfolgreich abgeschlossen werden.

Für die genaue und präzise Messung von Gasmenigen höherer Temperatur stellt die Temperaturschichtung in der Rohrleitung eine entscheidende Einflussgröße dar. Die Arbeitsgruppe *Gasmessgeräte* hat hierzu auf dem Hochtemperatur-Gasdurchflussprüfstand erste Untersuchungen zur orts aufgelösten Temperaturmessung mit einer Wärmebildkamera und einem in der Strömung befindlichen, aus Quarzstäben bestehendem Target durchgeführt. Mit dem Prüfstand, der sich hinsichtlich kleiner Durchflusswerte und der einzustellenden Gastemperaturen durch eine hohe Stabilität auszeichnet, lassen sich u. a. Temperaturdifferenzen zwischen der Rohrströmung und der Rohrumbgebung von bis ca. 500 K erzeugen, die beispielsweise bei der Abgasmessung von BHKW-Anlagen oder auf Motorenprüfständen auftreten können.

Die im Großgaszählerprüfstand zur Kalibrierung von Gaszählern bis 27 000 m³/h eingesetzten Durchflussnormale wurden im Staffelfverfahren turnusgemäß rekaliibriert. Die festgestellten Abweichungen gegenüber der letzten Rekalibrierung lagen innerhalb der in den CMC-Tabellen bestätigten Messunsicherheitswerte. Die Bereitstellung einer langzeitstabilen Prüfinfrastruktur mit geringer Messunsicherheit ist für die zunehmende Anzahl von Laboratorien, die sich für die Messung großer Gasdurchflüsse akkreditiert haben, von großer Bedeutung.

Mit Einführung des sogenannten „Smart meterings“ kommen auch im Bereich der Gasmessung neue Technologien zum Einsatz, die im Rahmen von Zulassungs- bzw. Konformitätsbewertungsverfahren auch entsprechend bewertet werden müssen.

Hieraus ergab sich eine verstärkte Tätigkeit in nationalen und internationalen Gremien des gesetzlichen Messwesens (DVGW, WELMEC) und den einschlägigen Standardisierungsorganisationen (CEN). Auch wirft die Einspeisung von Wasserstoff in das deutsche Erdgasnetz, das unter dem Stichwort „power-to-gas“ bekannt ist, für die Gasbeschaffenheitsmessung und auch für die Mengenmesstechnik neue Fragen auf. Bisherige Untersuchungen lassen erwarten, dass sich in Abhängigkeit vom Wasserstoffanteil das Messverhalten verschiedener Zählertypen ändert. Vor diesem Hintergrund und insbesondere im Zusammenhang mit dem neuen Mess- und Eichgesetz findet eine verstärkte Mitarbeit in den für den Gasbereich relevanten, regelsetzenden Gremien statt. Darüber hinaus musste eine Erweiterung der Prüfmöglichkeiten hinsichtlich der Mengenmessung von Reingasen und methanreichen Gasgemischen durchgeführt werden.

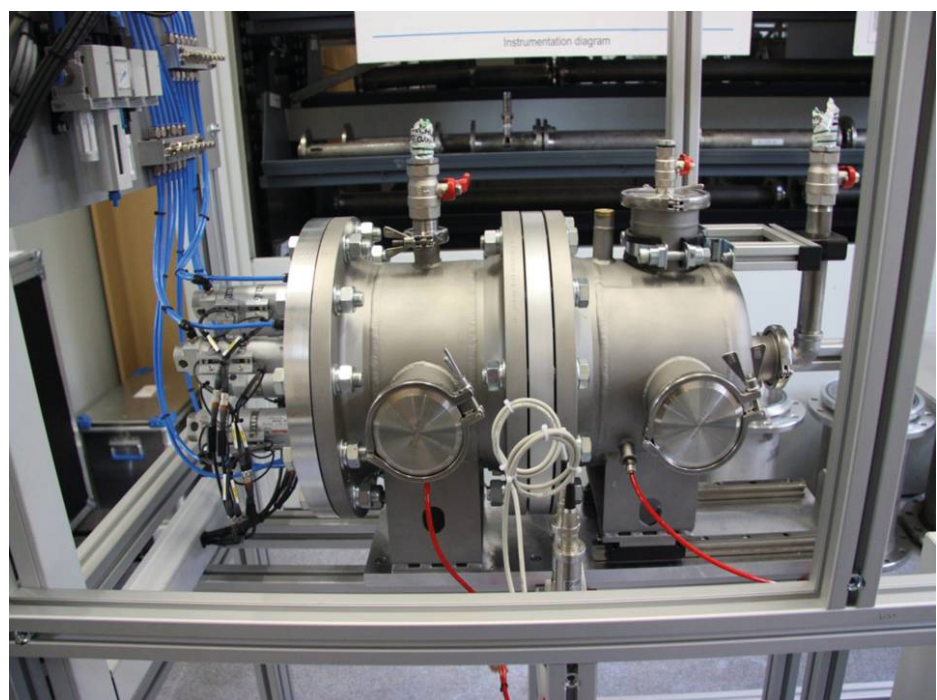
Die Arbeitsgruppe *Hochdruck-Erdgas* hat 2014 die Errichtung eines neuen volumetrischen Primärnormals für Hochdruck-Erdgas technisch begleitet und metrologisch bewertet. Das neue Primärnormal ist eine Kopie der bewährten Hochdruck-Rohrprüfstrecke der PTB, die auf dem Prüfstand *pigsar* seit mehr als 20 Jahren im Einsatz ist. Eine Kopie wurde in Lizenz durch eine deutsche Firma für China gebaut und wird dort eine zentrale Rolle in der Rückführungskette für Hochdruck-Erdgas unter der Leitung des NIM einnehmen. Die Hauptaufgabe der PTB bestand in der fachlichen Beratung, der geometrischen Messung des Referenzvolumens sowie der Kooperation bei der Durchführung der

Inbetriebnahme und der ersten Abnahmeprüfung durch den Kunden. Für die Bewertung der metrologisch relevanten Eigenschaften wurden zwei Turbinenradgaszähler der Nenngröße G250 zunächst mit der PTB-Rohrprüfstrecke mit bestmöglicher Messunsicherheit von 0,07 % kalibriert und anschließend die Kalibrierung mit dem neuen System wiederholt. Im Vergleich der beiden Kalibrierergebnisse konnte nach den Regeln der Ringvergleiche festgestellt werden, dass alle Messergebnisse innerhalb der Messunsicherheiten übereinstimmen und somit auch das neue System die gleichen grundlegenden messtechnischen Eigenschaften besitzt. Es war der erste direkte Vergleich zweier volumetrischer Normale für Hochdruck-Erdgas auf diesem Unsicherheitsniveau.

Der Fachbereich 1.5 *Flüssigkeiten* bearbeitet ein breites Aufgabenspektrum im Bereich der Mengen- und Durchflussmessung sowohl strömender wie auch ruhender Flüssigkeiten. Die Aufgaben des Fachbereichs 1.5 *Flüssigkeiten* teilen sich etwa zu gleichen Teilen auf Dienstleistungstätigkeiten und Aktivitäten im Bereich Forschung und Entwicklung auf.

Das Tätigkeitsfeld der Arbeitsgruppe *Flüssigkeitsmessgeräte* konzentriert sich dabei auf den Bereich der Zulassung und Zertifizierung von Flüssigkeitsmessgeräten im Rahmen des Eichgesetzes, insbesondere auch als benannte Stelle für die Anhänge 001 und 005 der Europäischen Messgeräte-Richtlinie MID. Der Trend der letzten Jahre in Hinsicht auf ein stetig zunehmendes Arbeitsaufkommen setzt sich

Bild 7: Prüfstand zur Erzeugung schnell wechselnder, reproduzierbarer Flüssigkeitsdurchflüsse mit sechs Kavitationsdüsen, die in beliebigen Kombinationen für beliebige Messzeiten zu- oder abgeschaltet werden und Durchflüsse zwischen 100 L/h und 10 m³/h realisieren können



fort. Dennoch konnte durch eine weitere Optimierung der Bearbeitungsabläufe erreicht werden, dass mehr als 75 % aller Vorgänge innerhalb von zwei Wochen fertiggestellt und dem Kunden die entsprechenden Zertifikate übergeben werden konnten.

Gleichzeitig erfordern technische Neu- und Weiterentwicklungen im Messgeräte- und Anlagensektor eine Intensivierung der nationalen und internationalen Vorschriften- und Gremienarbeit. Als wichtigstes Ergebnis ist hier die Fertigstellung der Teile 2 und 3 der OIML-Empfehlung R 117 „Dynamische Messanlagen für Flüssigkeiten außer Wasser“ zu nennen, die unter gemeinsamer Leitung von PTB und NIST koordiniert wurde.

Die Arbeitsgruppe *Flüssigkeitsprüfstände* ist für den Betrieb und die Neu- bzw. Weiterentwicklung der Flüssigkeitsnormalmesseinrichtungen des Fachbereichs zuständig. Aktuelle Herausforderungen ergeben sich hierbei aus der Notwendigkeit, die unter idealen Bedingungen im Labor erreichten Messergebnisse zuverlässig an die unter völlig anderen, „realen“ Bedingungen arbeitenden Messgeräte vor Ort weiterzugeben. Hierfür werden Messeinrichtungen benötigt, die im Labor reproduzierbar reale Zustände nachbilden und somit fundierte Untersuchungen möglicher Veränderungen des Verhaltens der verschiedenen Messgerätebauarten erlauben. Durch Anwendung sogenannter Kavitationsdüsen – Venturi-Düsen (Bild 7), in deren engstem Querschnitt sich bei ausreichendem Druckgefälle ein durch einsetzende Kavitation bedingter definierter Volumenstrom einstellt – konnten erstmals diskrete, aber beliebig wechselnde Durchflüsse mit Reproduzierbarkeiten deutlich kleiner als 0,1 % erzeugt werden. Gleichzeitig wurde in Kooperation mit der TU Duisburg-Essen mittels CFD-Simulation auch der theoretische Nachweis für dieses strömungstechnische Phänomen erbracht. Experimentell wurden die Durchflussänderungen durch zeitlich hochaufgelöste Einzelmessungen der Strömungsgeschwindigkeit mithilfe der Laser-Doppler-Apparatur verifiziert.

Im Fokus der Arbeitsgruppe *Rückführung Flüssigkeitsmessung* standen umfangreiche Untersuchungen an Durchflussmessgeräten verschiedener Bauarten hinsichtlich der Kurz- und Langzeitstabilität ihres messtechnischen Verhaltens. Nach wie vor ist die Auswahl geeigneter Transfornormale für die Durchführung von Vergleichsmessungen im Flüssigkeitsbereich die zentrale und entscheidende Aufgabe. An dem derzeit angelaufenen BIPM-Schlüsselvergleich CCM.FF-K1 für Wasser

im Durchflussbereich von 50 m³/h bis 180 m³/h, für den die PTB als Pilotlabor fungiert, nehmen weltweit insgesamt 11 Institute teil. Das entwickelte Transfornormal-Package, bestehend aus je einem Turbinenrad- und Coriolis-Durchflussmessgerät der Nennweite DN 100, peripherer Messtechnik für Druck und Temperatur sowie Hard- und Software für die gesamte Datenerfassung und -auswertung, wird derzeit kopiert. Es soll dabei nicht nur als Reserve zur Absicherung des Schlüsselvergleichs, sondern auch für nationale Vergleiche und Rückführungen für den DAkkS und die Eichaufsichtsbehörden genutzt werden.

1.3 Akustik, Ultraschall und Beschleunigung

Im Themenbereich *Akustik, Ultraschall und Beschleunigung* werden von den Fachbereichen 1.6 *Schall* und 1.7 *Akustik und Dynamik* 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 metrologischen Fragestellungen zur akustischen Messtechnik, zur Zulassung von Schallpegelmessern und -kalibratoren, zum Gehör und zum Ultraschall bearbeitet.

Die Arbeitsgruppe *Hörschall* bearbeitete ein ZIM-gefördertes Projekt zur Sicherung und Verbesserung der Verständlichkeit von Durchsagen im öffentlichen Verkehrsraum im Sinne der Barrierefreiheit für Hörbehinderte. Ziel des Projektes war es herauszufinden, welche mithilfe des Speech-Transmission-Index STI beurteilte Übertragungsqualität für Hörbehinderte erforderlich ist, um bei Notfalldurchsagen eine normgerechte Satzverständlichkeit zu erreichen. Mit 60 Versuchspersonen (27 Normalhörenden, 14 geringgradig Schwerhörenden an der Indikationsgrenze zur Hörgeräteversorgung und 19 Hörgeräteträgern) wurden dazu Sprachverständlichkeitsmessungen mit dem Oldenburger Satztest in einem synthetischen Schallfeld durchgeführt. Aus den Ergebnissen der gesamten Hörversuchsreihe konnte für Beschallungsanlagen, die entsprechende Barrierefreiheit für Hörbehinderte garantieren, ein STI-Wert $\geq 0,69$ als modifizierte Anforderung abgeleitet werden.

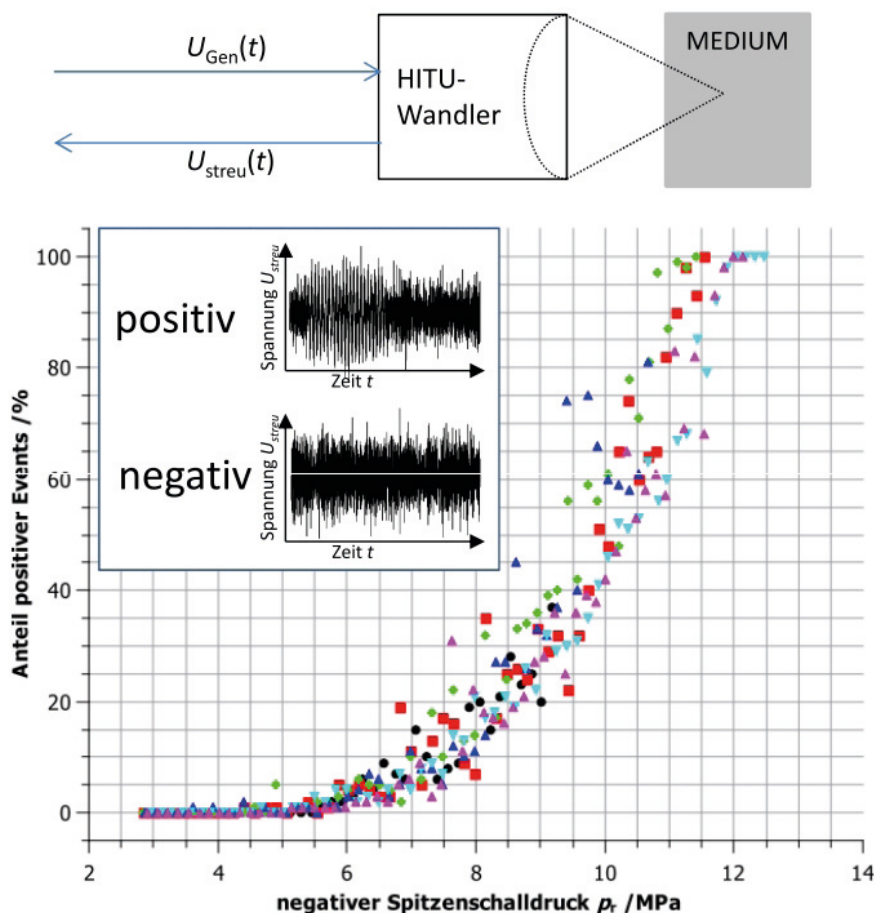


Bild 8: Kavitationsschwellen-detektion; oben: schematischer Aufbau; unten: Anteil positiver Events bei jeweils 100 einzelnen Beschallungen als Funktion des negativen Spitzenschalldrucks – als positiver Event wird eine signifikante Veränderung des Spannungssignals in der Sendepause gewertet (siehe Inset). Die Symbole unterscheiden mehrere unabhängige Messreihen im selben Medium.

Im Rahmen des EMRP-Projektes „HLT03 – DUTy“ wurde in der Arbeitsgruppe *Ultraschall* ein einfaches Verfahren zur Detektion und Quantifizierung von Kavitation in verschiedenen Medien entwickelt, das nun in der Arbeitsgruppe *Ultraschall* experimentell umgesetzt wurde. Bei diesem Verfahren wird mit einem HITU-Wandler (hochintensiver therapeutischer Ultraschall) das Medium mit einem kurzen Ultraschall-Burst beschallt (Bild 8). Wenn dadurch eine Kavitationsblase oder ein Blasenfeld erzeugt wird, wird ein Teil des Ultraschalls daran zum Ultraschallwandler zurückgestreut, wodurch sich das Spannungssignal in den Sendepausen charakteristisch ändert. Als nächste Schritte sollen nun die Reproduzierbarkeit der mit diesem Verfahren gewonnenen Ergebnisse und anschließend das Kavitationsverhalten in einigen ausgesuchten Medien, die als Gewebephantom Verwendung finden, untersucht werden.

In der Arbeitsgruppe *Geräuschmesstechnik* wurde eine neue Messeinrichtung für die Sekundärkalibrierung von Mikrofonen und Schallpegelmessern im Bereich unterhalb des Hörfrequenzbereichs aufgebaut, die insbesondere im Rahmen der Bauartzulassung benötigt wird. Nach den Methoden der Substitution und Komparation können 1“- und ½“-Working-Standard-Mikrofone (WS) und Labora-



Bild 9: Zylindrische Messkammer zur Kalibrierung im Frequenzbereich 1 Hz bis 50 Hz

tory-Standard-Mikrofone (LS) im Frequenzbereich 1 Hz bis 50 Hz in einer zylindrischen Messkammer (Bild 9) kalibriert werden. Eine Erweiterung der Kalibriermöglichkeiten wurde aber auch oberhalb des Hörfrequenzbereichs durch den Aufbau eines Messplatzes zur Sekundärkalibrierung von $\frac{1}{4}$ "-Working-Standard-Mikrofonen (WS3) im Freifeld nach dem Substitutionsverfahren vorgenommen. Im Frequenzbereich von ca. 10 kHz bis in den Ultraschallbereich bei ca. 100 kHz können Mikrofone auf einen Primärstandard zurückgeführt werden.

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

Die Umsetzung von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen in internationale Normen ist eine Hauptaufgabe der Arbeitsgruppe *Angewandte Akustik*. Im letzten Jahr erschienen vier Normen, die unter der Federführung der PTB entstanden und mit denen langjährige PTB-Forschungsschwerpunkte ihren vorläufigen Abschluss fanden. Die ISO 12999-1 „Bestimmung und Anwendung der Messunsicherheiten in der Bauakustik – Teil 1: Schalldämmung“ fasst die Arbeiten zu den Unsicherheiten in der Bauakustik zusammen. Die dort enthaltenen Zahlenwerte sind durch umfangreiche Auswertungen von Ringversuchen entstanden und stellen die besten derzeit verfügbaren Schätzwerte für die Unsicherheiten der Luft- und Trittschalldämmung dar.

Ein ähnliches Thema hat die DIN SPEC 45660-1 „Leitfaden zum Umgang mit der Unsicherheit in der Akustik und Schwingungstechnik – Teil 1: Unsicherheit akustischer Kenngrößen“. Dieser Leitfaden ist für die Autoren von akustischen Normen gedacht und zeigt auf, wie die Unsicherheit mithilfe von Ringversuchen, analytischen Rechenmodellen oder anderweitig verfügbarem Fachwissen ermittelt und z. B. beim Vergleich mit Richt- und Anforderungswerten angewendet werden kann.

Außerdem wurde mit dem Erscheinen der ISO 16251-1 „Akustik – Labormessung der Trittschallminderung von Deckenauflagen auf kleinflächigen Prüfdeckennachbildungen – Teil 1: Schwere Massivdecke“ ein an der PTB entwickeltes Messverfahren abschließend genormt. Dieses Verfahren wurde im Rahmen von zwei AiF-Forschungsvorhaben gefördert und reduziert den apparativen Aufwand für die Messung der Trittschallminderung erheblich. Kleine und mittelständische Hersteller von weichen Fußbodenauflagen (PVC, Linoleum, Teppich) werden damit in die Lage versetzt, die für diese Produkte

zentrale akustische Kenngröße mit wenig Aufwand selbst zu ermitteln.

Auch die bisherigen Arbeiten zum Gehrschall konnten mit dem Erscheinen der EN 16205 „Messung von Gehrschall auf Fußböden im Prüfstand“ erfolgreich beendet werden. Von der PTB wurde zu diesem Verfahren ein Ringvergleich organisiert, der die Anwendbarkeit des Verfahrens bestätigt hat und zudem eine Abschätzung der Unsicherheit ermöglicht.

Neben diesen abgeschlossenen Normungsvorhaben wurden im Berichtszeitraum auch normungsvorbereitende Forschungen zur Einbeziehung der tiefen Frequenzen in die Bewertung bauakustischer Kenngrößen durchgeführt.

Im Fachbereich 1.3 *Geschwindigkeit* wurden in der Arbeitsgruppe *Geschwindigkeitsmessgeräte* die messtechnischen Eigenschaften eines neuartigen Radarsensors eingehend untersucht. Eine wesentliche Fragestellung war hierbei die Eignung des Radarsensors für Verkehrsflussanalysen auf Autobahnen. Der Schwerpunkt wurde daher auf die gemessenen Geschwindigkeiten und Verkehrsstärken gelegt.

Der Radarsensor ist in der Lage, die Geschwindigkeiten und Positionen aller Fahrzeuge, die sich im Erfassungsbereich befinden, zu bestimmen. Alle erfassten Fahrzeuge werden zudem bis zum Verlassen des Erfassungsbereiches vom Sensor verfolgt (Tracking). Der Radarsensor wird daher als Trackingradar bezeichnet.

Um die messtechnischen Eigenschaften dieses Trackingradars bewerten zu können, wurden die Geschwindigkeiten der vorbeifahrenden Fahrzeuge und deren Verkehrsstärke gleichzeitig mit einem zugelassenen Geschwindigkeitsüberwachungsgerät in Form eines Laserscanners gemessen. Die Messwerte des Laserscanners dienen hier als Referenz. In Bild 10 sind die aufgetretenen Abweichungen der Geschwindigkeitsmesswerte von Trackingradar und Laserscanner für eine Aufstellung dargestellt. Es zeigt sich, dass die Geschwindigkeitsmesswerte des Trackingradars nur wenig von denen der Referenz abweichen. Ähnlich gute messtechnische Eigenschaften zeigte das Trackingradar bezüglich der Verkehrsstärke (hier nicht dargestellt).

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass aufgrund der gefundenen messtechnischen Eigenschaften und der einfachen Handhabung sich das untersuchte Trackingradar für Verkehrsflussanalysen auf Autobahnen sehr gut eignet. Solche Verkehrsfluss-

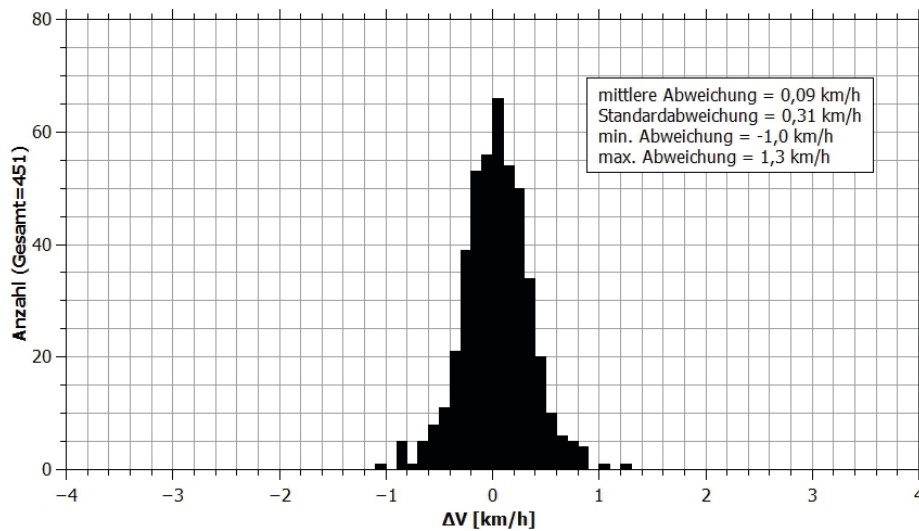


Bild 10: Histogramm der Messwertabweichungen zwischen Trackingradar und Laserscanner für 451 Fahrzeuge

analysen sollen in Zukunft im Rahmen einer Dissertation in der Arbeitsgruppe *Geschwindigkeitsmessgeräte* durchgeführt und ausgewertet werden. Untersuchungsgegenstand ist dabei das Verhalten der Autofahrer in unmittelbarer Nähe zu einem stationären Geschwindigkeitsüberwachungsgerät auf Autobahnen mit Streckenbeeinflussungsanlagen (www.ptb.de/cms/blitzer-umfrage).

Die Arbeiten im Bereich „dynamischer Druck“ des Fachbereichs waren im vergangenen Jahr geprägt durch die seit 2013 laufenden, umfangreichen Baumaßnahmen zur Modernisierung der eigenen Schießanlagen. Trotz der damit verbundenen starken Beeinträchtigungen in den Arbeitsmöglichkeiten konnte die Arbeitsgruppe ihren gesetzlichen Aufgaben zur Prüfung von Waffen, Munition und pulverbetriebenen Werkzeugen weiterhin nachkommen. Die Baumaßnahmen sollen noch im Jahr 2014 abgeschlossen werden.

Über den Rahmen der reinen Aufgabenbearbeitung wurden erfolgreich dynamische Druckmessungen und Energiebestimmungen im Rahmen einer Vergleichsmessung der Ständigen Internationalen Kommission für die Prüfung von Handfeuerwaffen und Munition (CIP) durchgeführt.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Modellbasierte Stoßkalibrierung von Kraftaufnehmern

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes EMRP IND09 „Rückführbares dynamisches Messen mechanischer Größen“ wurde der Ansatz der modellbasierten dynamischen Kalibrierung an Kraftaufnehmern bei stoßförmiger Anregung erforscht. Kraftaufnehmer unterschiedlichen Designs, Größe und mechanischer Ankopplung wurden hierzu an der 20-kN-Stoßkalibriereinrichtung der PTB experimentell untersucht. Das dynamische Verhalten von Kraftaufnehmer und Messeinrichtung wird mithilfe von Modellen beschrieben, deren charakteristische Parameter aus den Messdaten identifiziert werden sollen. Zur Verifizierung geeigneter Modelle und Entwicklung geeigneter Methoden zur Messdatenanalyse und Parameteridentifizierung wurden die mit unterschiedlichen Modellen erzielten Ergebnisse für einen exemplarisch ausgewählten Kraftaufnehmer verglichen. (M. Kobusch, FB 1.7, michael.kobusch@ptb.de)

Analyse von Stoßmessungen für die modellbasierte dynamische Kalibrierung von Kraftaufnehmern

Für die dynamische Kalibrierung von Kraftaufnehmern wird der Ansatz der modellbasierten Kalibrierung verfolgt. Die für das dynamische Verhalten maßgeblichen Modellparameter des Kraftaufnehmers sollen dabei aus dynamischen Messdaten ermittelt werden. Um bei einer Stoßanregung des Kraftaufnehmers die Eigenfrequenzen hinreichend stark anzuregen, wurde an der 20-kN-Kraftstoßkalibriereinrichtung der PTB ein Pendelstoß mit kleineren Stoßmassen experimentell erprobt. Die vorgestellten Arbeiten erfolgten im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes EMRP IND09 „Rückführbares dynamisches Messen mechanischer Größen“. (M. Kobusch, FB 1.7, michael.kobusch@ptb.de)

Dynamische Drehmomentkalibrierung durch Modellparameter-Identifikation

Für eine dynamische Kalibrierung von Drehmomentaufnehmern wurden ein Modell des Aufnehmers, ein erweitertes Modell von Aufnehmer und Messeinrichtung und ein Verfahren zur Bestimmung der Modellparameter entwickelt. Das dynamische Verhalten eines Drehmomentaufnehmers

wird durch seine Modellparameter beschrieben, die auf Basis von Messdaten identifiziert werden. (L. Klaus, FB 1.7, leonard.klaus@ptb.de, M. Kobusch, FB 1.7, michael.kobusch@ptb.de)

Experimentelles Verfahren für die Bestimmung der Dämpfung von Torsionsschwingungen

Für die modellbasierte Kalibrierung einer dynamischen Drehmomentmesseinrichtung war es erforderlich, deren Modelleigenschaften zu bestimmen. Eine Messgröße war die Bestimmung der Dämpfung von Torsionsschwingungen. Für die Messung dieser Dämpfungseigenschaften wurden ein Messverfahren und eine entsprechende Messeinrichtung entwickelt. (L. Klaus, FB 1.7, leonard.klaus@ptb.de, M. Kobusch, FB 1.7, michael.kobusch@ptb.de)

Referenzquellen für therapeutischen Ultraschall

Ultraschall kann in der Medizin zu therapeutischen Zwecken eingesetzt werden – z. B. zur nichtinvasiven lokalen Zerstörung von Tumoren (HITU) oder zur Behandlung von Muskelerkrankungen und -verletzungen (Physiotherapie). Die für diese Zwecke benötigten hohen Ultraschalleistungen erfordern entsprechend hohe elektrische Eingangsleistungen, die die Ultraschallwandler während des Betriebs erwärmen und zu Veränderung der Ausgangsfelder führen. Dadurch können Sekundärkalibrierungen entsprechender Messgeräte oder Bioeffekt-Studien verfälscht werden. An der PTB wurde nun mit ausgewählten Geräten und einer Feed-forward-control-Software ein Referenz-Setup aufgebaut und damit die zeitliche Konstanz der Ultraschallfelder signifikant erhöht. (J. Haller, FB 1.6, julian.haller@ptb.de, V. Wilkens, FB 1.6, volker.wilkens@ptb.de)

Messunsicherheitsberechnungen mit freier Software

Die Berechnung kombinierter Messunsicherheiten stellt im Fall einer komplizierteren Modellfunktion höhere mathematische Anforderungen, die zum Beispiel nicht mit einer Tabellenkalkulation erfüllt werden können. Während man bei kommerziellen, häufig aber auch bei freien Softwarepaketen für die Messunsicherheitsberechnung an die vom Programm zur Verfügung gestellten Funktionen gebunden ist, wird gezeigt, wie man mit dem freien Mathematikpaket Maxima und etwas Programmierarbeit eine von Lizenzfragen freie Lösung dieses Problem finden kann, die außerdem sehr flexibel ist, da sie mit wenig Aufwand an eigene Erforder-

nisse angepasst werden kann. (D. Röske, FB 1.2, dirk.roeske@ptb.de)

Richtcharakteristik von Luftultraschallquellen

Schallquellen, die hochfrequenten Luftultraschall ausstrahlen, weisen ausgeprägte Richtcharakteristiken auf. In diesem Frequenzbereich sind die Wellenlängen nur wenige Millimeter lang und die abstrahlenden Flächen oft größer. Dies führt zu Interferenzen im Schallfeld, und der Ultraschall wird mit starker Richtwirkung abgestrahlt. Dieser Effekt erschwert die Bestimmung der Emission einer Schallquelle oder die Messung der Immission auf einen Menschen, zum Beispiel an einem Arbeitsplatz. Um solche Richtcharakteristiken genauer untersuchen zu können, wurde ein Messplatz aufgebaut, mit dem die Emission verschiedener Quellen hochaufgelöst und pegelgenau untersucht werden kann. (C. Kling, FB 1.6, christoph.kling@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Erfolgreiche Vergleichsmessung mit PTB-Wind-Lidar-System

Ein neu entwickeltes Lidar-System erlaubt die vektorielle Bestimmung der Windgeschwindigkeit anhand des Streulichts einzelner Aerosole innerhalb eines räumlich hochaufgelösten Messvolumens in Höhen von 5 m bis über 200 m mit einer Geschwindigkeitsauflösung von 0,1 m/s. Im Gegensatz zu konventionellen Wind-Lidar-Systemen, welche für die präzise Messung des Windvektors nahezu homogene Strömungsfelder im Umkreis von 100 m voraussetzen, kann das von der PTB entwickelte Wind-Lidar damit auch in komplexen Geländestrukturen eingesetzt werden. (M. Eggert, FB 1.4, michael.eggert@ptb.de)

Laser-Doppler-Profilensor zur hochaufgelösten Erfassung von Strömungsgeschwindigkeitsprofilen

Die Ortsauflösung kommerzieller LDV-Systeme zur Messung von lokalen Strömungsgeschwindigkeiten in Gasen und Flüssigkeiten liegt im Bereich von 1 mm bis 10 mm und wird durch die Schnittvolumenlängen der sich kreuzenden Laserstrahlen vorgegeben. Im Rahmen eines Kooperationsprojektes des „Zentralen Innovationsprogrammes Mittelstand“ (ZIM) wurde nach einem an der PTB entwickelten Verfahren ein kompaktes Profilsensor-Nachrüstmodul für bestehende LDV-Systeme realisiert, das Messungen von Geschwindigkeitsprofilen mit einer Ortsauflösung von 0,3 % der Messvolumenlänge erlaubt. (S. Oertel, FB 1.4, stefan.oertel@ptb.de)

Kompaktprüfstand für die Bestimmung der Trittschallminderung von Bodenbelägen

Das an der PTB entwickelte kompakte Prüfverfahren zur Bestimmung der Trittschallminderung von Bodenbelägen verringert im Vergleich zur bisherigen Methode den apparativen und zeitlichen Aufwand einer solchen Messung. Es wurde im Jahr 2014 international genormt. (J.-H. Schmidt, FB 1.7, jan-henning.schmidt@ptb.de)

DKD-Ringvergleich für statische Drehmomente bis 200 N · m erfolgreich abgeschlossen

Im Rahmen des Deutschen Kalibrierdienstes war von der Arbeitsgruppe *Darstellung Drehmoment* der PTB ein Ringvergleich für Drehmomentenaufnehmer organisiert und durchgeführt worden, an dem 13 akkreditierte Laboratorien teilnahmen. Der jetzt vorliegende Bericht dokumentiert, dass die Darstellung und Weitergabe der Einheit der Messgröße statisches Drehmoment in diesem Bereich hervorragend funktioniert. Zwei Besonderheiten dieses Ergebnisses bestehen außerdem darin, dass hierbei sowohl verschiedene Wege der Rückführung als auch verschiedene Messprinzipien miteinander verglichen wurden. (D. Röske, FB 1.2, dirk.roeske@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Mehr Barrierefreiheit im öffentlichen Verkehrsraum durch Optimierung von Lautsprecherdurchsagen für Schwerhörnde

Die Übertragungsqualität von Beschallungsanlagen wird mit dem Speech-Transmission-Index (STI) qualifiziert (DIN EN 60628-16), welcher im Wesentlichen die Güte der Modulationsübertragung beschreibt. Dabei entspricht ein STI-Wert von 0 einem kompletten Verlust der Signalmodulationen und ein STI-Wert von 1 einer idealen Signalübertragung. Für Notfallwarnsysteme wird ein STI-Wert $\geq 0,5$ gefordert, was für Normalhörende einer Satzverständlichkeit von $\geq 95\%$ entspricht. Bei Hörbehinderung sinkt jedoch die Satzverständlichkeit für gegebenen STI-Wert. Ziel dieses Projektes war die Ermittlung von objektiven Parametern zur Bewertung der Sprachverständlichkeit bei Hörbehinderten im öffentlichen Verkehrsraum und die darauf aufbauende Ableitung von modifizierten Anforderungen, um für Hörbehinderte bei Notfalldurchsagen ebenfalls eine ausreichende Satzverständlichkeit zu erreichen. Mit 60 Versuchspersonen (27 Normalhörenden, 14 geringgradig Schwerhörenden an der Indikationsgrenze zur Hörgeräteversorgung und 19 Hörgeräteträgern) erfolgten Sprachverständlichkeitsmessungen mit dem Oldenburger Satztest bei verschiedenen

durch Zugabe von Nachhall und Störgeräusch zum Sprachmaterial eingestellten STI-Werten. Aus den Ergebnissen der Hörversuche konnte für Hörbehinderte ein STI-Wert $\geq 0,69$ als modifizierte Anforderung abgeleitet werden. (F. Kramer, FB 1.6, florian.kramer@ptb.de)

Das Ende einer fragwürdigen Tradition: Trittschall-Dämmmaße sollten Norm-Trittschallpegel ersetzen

Das Verhalten von Gebäuden bei direkter Anregung der Decken und Wände, wie z. B. durch gehende Menschen, wird bisher messtechnisch durch Einsatz eines Hammerwerks und Bestimmung der erzeugten Schalleistung im betroffenen Raum („Norm-Trittschallpegel“) charakterisiert. Diese Methode liefert jedoch wegen der Verschiedenheit der Hammerwerke von den interessierenden realen Quellen undurchsichtige und oftmals irreführende Aussagen. Ein sauber definiertes Trittschall-Dämmmaß kann hier Abhilfe schaffen. (W. Scholl, FB 1.7, werner.scholl@ptb.de)

Schallquelle für die objektive Untersuchung der auditorischen Wahrnehmung von Infraschall mittels Magnetoenzephalografie (MEG) und Magnetresonanztomografie (MRT)

Es wurde eine akustische Quelle konstruiert, die der objektiven Untersuchung der auditorischen Wahrnehmung und Verarbeitung von tieffrequentem Schall und Infraschall mithilfe bildgebender Verfahren (MEG, MRT) dient. Die Infraschall-Quelle ist in der Lage, eine verzerrungsarme akustische Stimulierung im Frequenzbereich von 2 Hz bis 250 Hz bis zu einem oberen Schalldruckpegel gemäß der 60-phon-Kurve (130 dB Schalldruckpegel (SPL) für 2,5 Hz) zu gewährleisten. Zur Validierung wurden Hörschwellen im Frequenzbereich von 2,5 Hz bis 125 Hz für 18 normalhörende Testpersonen ermittelt. Die mittleren Hörschwellen sind vergleichbar mit Werten aus der Literatur und stellen Orientierungswerte für nachfolgende Untersuchungen im MEG und MRT in der PTB in Berlin dar. (R. Kühler, FB 1.6, robert.kuehler@ptb.de; J. Hensel, FB 1.6, johannes.hensel@ptb.de)

Kann das Schalldämmmaß von Gebäuden auch bei tiefen Frequenzen angewendet werden?

In unserer Umgebung nimmt Lärm zu, der tiefe Frequenzen (unter 100 Hz) enthält. Die Messgröße zum Schutz gegen Lärm in Gebäuden – das Schalldämmmaß – setzt aber Verhältnisse voraus, die erst bei höheren Frequenzen vorliegen. Es wurde untersucht, wie sich das Schalldämmmaß bei tiefen Fre-

quenzen, d. h. außerhalb des Gültigkeitsbereichs, verhält. (W. Scholl, FB 1.7, werner.scholl@ptb.de)

Ursachen von Zellschädigungen im Zusammenhang mit Katarakt-Operationen zur Behandlung des grauen Stars

Nach einer Katarakt-Operation werden bei der überwiegenden Mehrzahl der Patienten Schädigungen der auf der Innenseite der Hornhaut liegenden Endothelzellen beobachtet. Die Ursachen für diese Zellschäden sind bisher nur unvollständig geklärt und können zu einer Beeinträchtigung der von diesen Zellen bewerkstelligten Hornhautdehydrierung führen. Die in diesem Fall geminderte Leistungsfähigkeit der Endothelzellen verursacht bei den betroffenen Patienten eine vorübergehende Schwellung der Hornhaut. Bei sehr seltenen Vorbelastungen durch Vorerkrankungen oder früheren Augenoperationen besteht jedoch zudem die Gefahr einer Hornhaut-Trübung und damit einer permanenten Erblindung des Patienten. In einem interdisziplinären Forschungsprojekt mit Beteiligung von Augenärzten konnten an der PTB nun neue Erkenntnisse über die mögliche Ursache für die Zellschädigungen erzielt werden. (S. Buschschlüter, FB 1.6, steffen.buschschlueter@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Bilateraler Vergleich der Flüssigkeitsprüfstände von PTB und NEL erfolgreich abgeschlossen

Die Qualität von Vergleichsmessungen wird wesentlich von den Eigenschaften der verwendeten Transfornormale bestimmt, deren Messstabilität unmittelbar in die Berechnung des sogenannten *Standardized Degree of Equivalence* (E_N) eingeht. Auf dem Gebiet der Flüssigkeitsmessung sind hierbei insbesondere Temperatur- und Druckabhängigkeit, Wiederhol- und Vergleichpräzision sowie die Drift des Messgerätes von Bedeutung. Ein bilateraler Vergleich zwischen den Flüssigkeitsprüfständen der PTB Braunschweig und des NEL Glasgow wurde unter diesem Gesichtspunkt gleichzeitig auch zur gezielten Untersuchung und Auswahl geeigneter Transfornormale für den bevorstehenden BIPM-Schlüsselvergleich (CCM.FF-K1) genutzt, für den die PTB als Pilotlabor agieren wird. (E. Frahm, FB 1.5, enrico.frahm@ptb.de; R. Engel, FB 1.5, rainer.engel@ptb.de)

Erfolgreiche Entwicklung von Prüfprozeduren und Prüfberichtsvorlagen zur OIML-Empfehlung R 117-1 „Dynamische Messanlagen für Flüssigkeiten außer Wasser“

Nach der Veröffentlichung der messtechnischen Anforderungen an Messanlagen für Flüssigkeiten außer Wasser als Teil 1 zur OIML-Empfehlung R 117 im Jahr 2007 liegen nun auch die Teile 2 und 3 mit den entsprechenden Prüfprozeduren und Prüfberichtsvorlagen zur Abstimmung auf der nächsten Sitzung des CIML in Auckland/Neuseeland im November 2014 vor. (M. Rinker, FB 1.5, michael.rinker@ptb.de)

Hervorragende Bestätigung der PTB-Technologie für volumetrische Primärnormale im Anwendungsbereich für atmosphärische Luft im Rahmen zweier internationaler Ringvergleiche

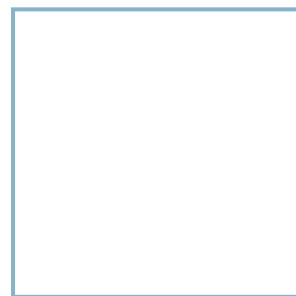
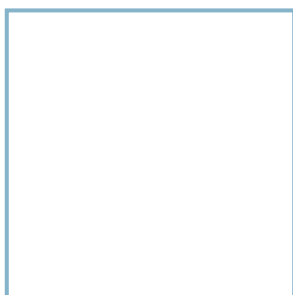
Die CMC-Einträge der PTB für Durchflussmessung mit atmosphärischer Luft wurden in zwei internationalen Ringvergleichen auch bei Verwendung eines neuen Primärnormals mit verringerter Messunsicherheit von 0,045 % eindrucksvoll bestätigt. (B. Mickan, FB 1.4, bodo.mickan@ptb.de)

Europäische Harmonisierung des Kubikmeters für die Erdgasmessung neu gestaltet

Die Darstellung und Weitergabe eines harmonisierten Kubikmeters im Bereich der Volumenmessung von Erdgas unter hohem Druck wird mit nunmehr vier Partnern auf vertraglich neu gestalteter Basis fortgesetzt. (B. Mickan, FB 1.4, bodo.mickan@ptb.de)

Abteilung 2

Elektrizität



Elektrische Größen treten in nahezu allen Bereichen des Messwesens auf. Aufgabe der Abteilung *Elektrizität* ist die Darstellung und Weitergabe sämtlicher elektrischer und magnetischer Einheiten. Die Arbeiten umfassen die Untersuchung metrologisch relevanter Prozesse in Festkörper-Nanoschaltungen, die Entwicklung von elektrischen Quanten-, Primär- und Transfernormalen sowie Kalibrier- und Prüfdienstleistungen. Durch Beratungsaktivitäten, die Mitarbeit in Normungs- und sonstigen Gremien sowie durch Technologietransfer unterstützt die Abteilung die deutsche Wirtschaft und trägt zur Einheitlichkeit des Messwesens bei.

Zur Bearbeitung dieser umfangreichen 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 identifiziert.

Die Forschungsarbeiten der Abteilung werden in vielen Fällen in enger Kooperation mit anderen nationalen metrologischen Instituten durchgeführt. Hierzu beteiligt sich die Abteilung an dem von der EU geförderten European Metrology Research Programme (EMRP) bzw. dem Nachfolgeprogramm EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research). Die Programme werden unter strategischen Gesichtspunkten zur Stärkung der o. g. Schwerpunktthemen genutzt. Im Berichtszeitraum sind die dreijährigen Projekte der Förderlinie „Industrie I“ erfolgreich abgeschlossen worden. Die Abteilung war an drei Projekten mit maßgeblichen Arbeitspaketen beteiligt und hat zwei dieser Projekte koordiniert: das Projekt „Ultrafast“, in dem neue Messverfahren für die Datenübertragung bei hohen Datenraten entwickelt wurden, sowie das Projekt „MetMags“, in dem Messtechniken für die Weiterentwicklung und Kalibrierung industrieller magnetischer Sensoren untersucht wurden.

Titelbild:

Kalibrierung eines fliegenden 3D-Messsystems für die elektrische Hochfrequenz-Feldstärke (Oktokopter) auf dem Freifeld der PTB

Auf lokaler Ebene wurde die Kooperation mit der Technischen Universität Braunschweig (TU BS) vertieft. Im Berichtszeitraum konnten TU BS und PTB das von der DFG geförderte Graduiertenkolleg „Metrology for Complex Nanosystems“ (Nanomet) einwerben. Die Abteilung *Elektrizität* ist eine von vier an Nanomet beteiligten Fachabteilungen der PTB und bringt Arbeiten zur multiparametrischen Wellenformmetrologie im GHz- und THz-Bereich sowie zur Entwicklung von Nanomaterialien für Quantenwiderstandsnormale in das Graduiertenkolleg ein. Die intensivierte Zusammenarbeit mit der TU BS unterstützt die Abteilung bei der Nachwuchsgewinnung und gibt neue Impulse für die Forschung.

Auch der Dienstleistungsbereich wurde im Berichtsjahr gezielt weiterentwickelt. Der überwiegende Teil der angebotenen Kalibrierungen kann mit Verweis auf das „Mutual Recognition Arrangement“ der Meterkonvention (CIPM-MRA) erbracht werden. Dadurch wird die internationale Anerkennung der Kalibrierungen gewährleistet. Die Abteilung baut die Integration ihrer Kalibrierungen in das CIPM-MRA systematisch aus. Zur Förderung des Dialogs mit den Kunden, insbesondere den akkreditierten Kalibrierlaboratorien, wurde auch im Jahr 2014 wieder ein PTB-Seminar angeboten, in dem Neuerungen auf dem Gebiet der elektrischen Messtechnik und der Kalibrierung elektrischer Größen vorgestellt wurden. Besonders wurde die zukünftige Neudefinition der SI-Einheiten und etwaige Auswirkungen auf den Kalibrierbetrieb angesprochen. Für die Mehrzahl der Kalibrierungen ergeben sich keine Änderungen. Dort wo die Neudefinition Auswirkungen auf Kalibrierungen hat, können sich die Kalibrierlaboratorien langfristig darauf einstellen.

Nach diesem allgemeinen Überblick wird im Folgenden über die im Jahr 2014 erzielten Fortschritte in den fünf Schwerpunktgebieten berichtet.

Grundlagen der elektrischen Metrologie

Im Schwerpunkt Grundlagen arbeitet die Abteilung intensiv an der Entwicklung von Einzelelektronen-Stromquellen. Mit solchen Quantenstromquellen kann die elektrische Basiseinheit Ampere gemäß der geplanten neuen SI-Definition direkt durch den Transport einzelner Elektronenladungen dargestellt werden. Im Berichtsjahr wurde erstmals eine sogenannte selbstreferenzierte Quantenstromquelle auf Basis von Halbleiter-Einzelelektronen-Stromquellen und metallischen DC-Einzelelektronen-Detektoren demonstriert (siehe auch Nachricht des Jahres). Es

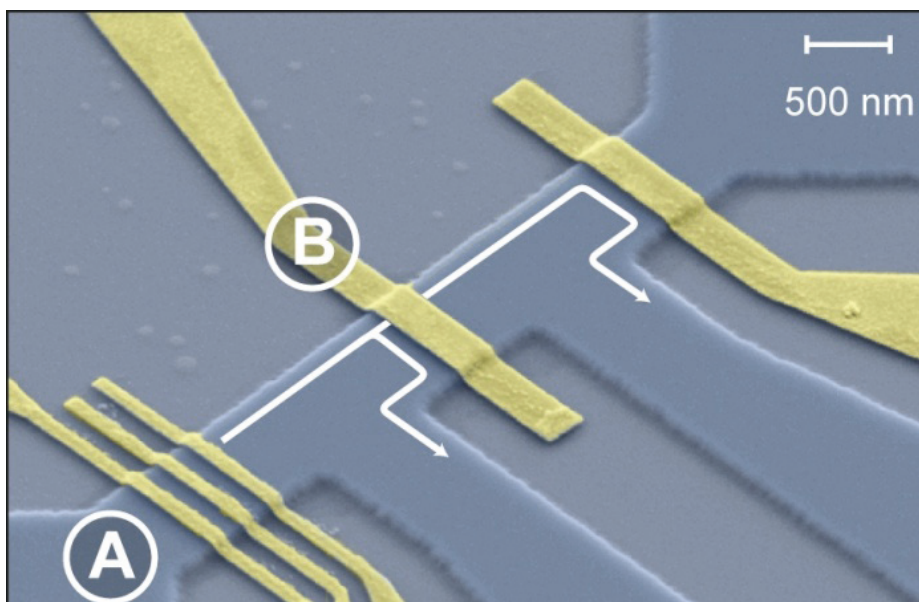


Bild 1: Halbleiterchip mit einer Einzelelektronen-Stromquelle (A) und einer einstellbaren Potenzialbarriere (B). Die weiße Linie zeigt die zwei unterschiedlichen Wege der an der Barriere getrennten Elektronen.

konnte gezeigt werden, dass der quantisierte Strom aus einer solchen integrierten Schaltung aus Quellen und Detektoren eine geringere Unsicherheit hat als der Strom aus einer einfachen Einzelelektronen-Stromquelle. Die Arbeit wurde mit dem Hermann-von-Helmholtz-Preis für Metrologie 2014 ausgezeichnet, da sie einen neuen Weg aufzeigt, die hohen Anforderungen an ein Quantenstromnormal zur Darstellung des neu definierten Amperes zu erfüllen.

Zurzeit wird intensiv an der Hochskalierung der Frequenz von selbstreferenzierten Quantenstromquellen gearbeitet. Dazu werden breitbandige Einzelelektronen-Detektoren (RF-SET-Detektoren) entwickelt, die die bisher benutzten schmalbandigen DC-Einzelelektronen-Detektoren ersetzen sollen. Die Erhöhung der Detektionsbandbreite bietet das Potenzial, quantisierte Ströme von 100 pA

und mehr mit verringerter Unsicherheit (kleiner als $0,1 \mu\text{A}/\text{A}$) zu erzeugen. Im Berichtsjahr wurde RF-SET-Detektion mit Einzellaadungsauflösung bei einer Resonanzfrequenz des Schwingkreises von etwa 350 MHz demonstriert.

Die an der PTB entwickelten Halbleiter-Einzelelektronen-Stromquellen können auch in der Grundlagenforschung und bei der Entwicklung zukünftiger Quantentechnologien eingesetzt werden. Im Berichtsjahr wurde demonstriert, dass sich Elektronenpaare aus solchen Stromquellen räumlich trennen lassen. Dazu wird das Paar an einer Potenzialbarriere aufgespalten und die beiden einzelnen Elektronen werden in verschiedene Leitungen eingespeist (Bild 1). Damit wurde ein Pendant zur Generation von Photonenpaaren und ihrer anschließenden Trennung an einem Strahlteiler geschaffen. Diese



Bild 2: Prototyp eines zweikanaligen hochstabilen, rauscharmen Stromverstärkers und Pikoampere-meters

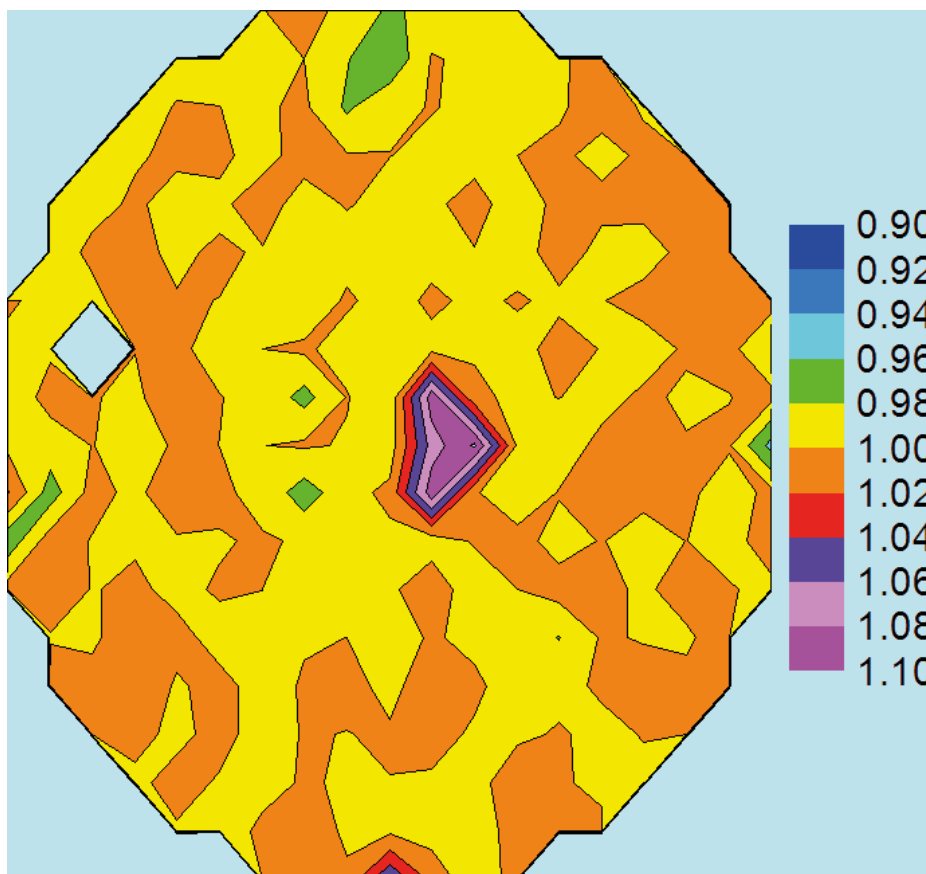


Bild 3: Verteilung von 292 gemessenen, relativen Schichtdickenwerten auf einem 3-Zoll-Wafer für ein Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb-Josephson-Spannungsnormale. Die Messwerte wurden auf ihren Mittelwert von 85,4 nm normiert.

Technik aus der Quantenoptik bildet eine wichtige Grundlage der Quanteninformationsverarbeitung.

Die Funktion von Quantenschaltungen in Festkörpern kann durch die Absorption von Mikrowellen-Photonen erheblich beeinträchtigt werden. Daher arbeitet die Abteilung an einem EMRP-Projekt mit, in dem der Mikrowellenhintergrund in der kryogenen Umgebung solcher Schaltungen mit einer Auflösung auf Einzelphotonenniveau charakterisiert werden soll. Darauf aufbauend sollen Methoden zur Unterdrückung von Mikrowellen-Photon-Anregung entwickelt werden. Im Berichtsjahr wurde eine Photonenquelle für den Mikrowellenbereich bis 170 GHz entwickelt. Sie besteht aus Al/Al-Oxid-Josephson-Kontakten in einer SQUID-Anordnung und soll zur On-Chip-Kalibrierung von Einzelphotonen-Detektoren eingesetzt werden.

Einzelelektronen-Stromquellen erzeugen Ströme mit Stromstärken bis zu einem Nanoampere. Für die rückgeführte Messung solcher kleinen Stromstärken wurde in einer Zusammenarbeit der Abteilungen 7 und 2 der PTB ein neuartiges, handliches Pikoamperemeter mit hervorragender Präzision entwickelt (Bild 2). Mit einem zum Patent angemeldeten neuen Konzept wird ein sehr niedriges Eingangsstromrauschen von nur 2,4 fA/√Hz mit weißem Spektrum bis herab zu Frequenzen von etwa 1 mHz erreicht. Damit kann ein Strom der Stärke

100 pA innerhalb einer Messzeit von nur zehn Stunden mit einer relativen Unsicherheit von 10⁻⁷ rückgeführt gemessen werden.

Aufbau von Quanten- und klassischen Einheitenskalen

Die Industrie benötigt Kalibrierungen elektrischer Messgeräte in sich ständig erweiternden Werte- und Frequenzbereichen. Daher baut die Abteilung die Skalenbereiche, über die die elektrischen Einheiten dargestellt und weitergegeben werden können, beständig aus. Weiterhin arbeitet die Abteilung daran, vermehrt Quantennormale einzusetzen, da damit Kalibrierketten verkürzt und Kalibrierungen kostengünstiger angeboten werden können.

Spannungskalibrierungen basieren auf Josephson-Spannungsnormalen. Die Abteilung hat in den letzten Jahren die Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb-Technologie zur Herstellung von SNS-Josephson-Kontakten (S: Supraleiter, N: Normalleiter) erfolgreich im Reinraumzentrum der PTB etabliert. Programmierbare binäre Josephson-Normale mit Ausgangsspannungen von 10 V werden inzwischen routinemäßig hergestellt. Im Berichtsjahr konnte die Fertigungsausbeute nochmals erhöht werden. Dazu wurde die Homogenität der Wafer, besonders der Barrierendicke, die die elektrischen Eigenschaften stark beeinflusst,

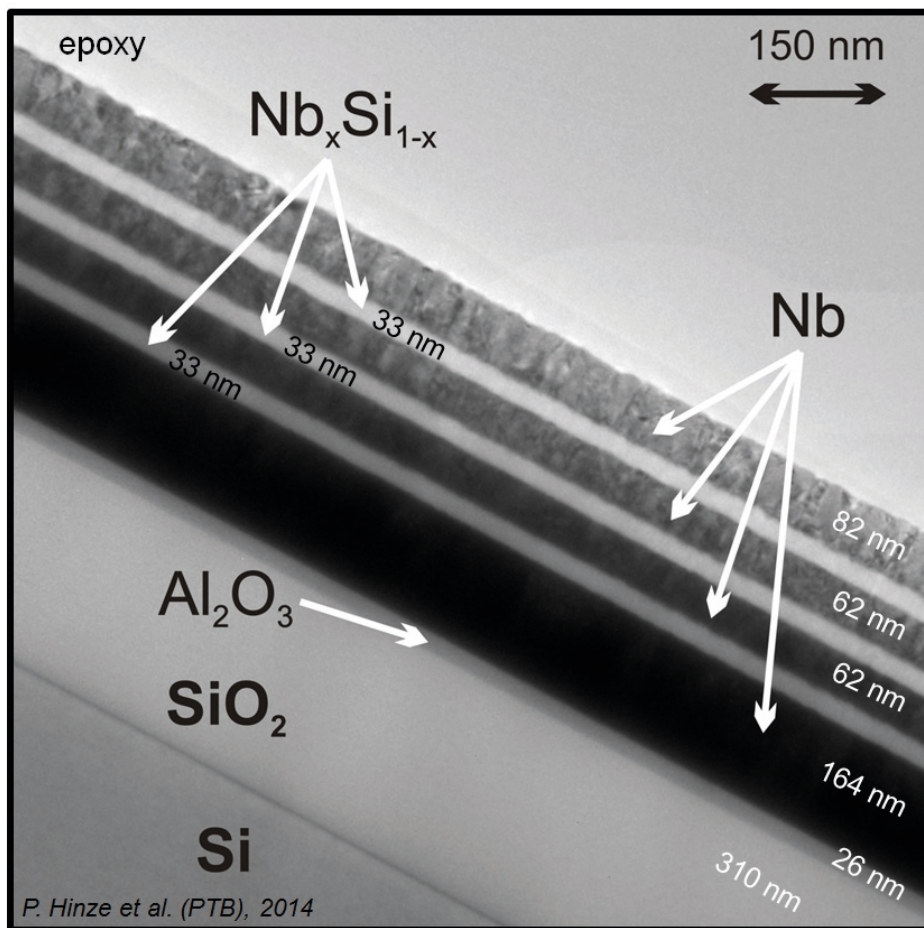


Bild 4: Transmissionselektronenmikroskop-Aufnahme von dreifach gestapelten Josephson-Kontakten für ein pulsgetriebenes Josephson-Spannungsnormal

durch die Optimierung der Beschichtungsanlage verbessert (Bild 3).

Programmierbare binäre Josephson-Normale werden inzwischen in verschiedenen messtechnischen Anwendungen eingesetzt, so z. B. zur Messung von Impedanzverhältnissen mit Hilfe sogenann-

ter Josephson-Impedanzmessbrücken. Diese Messungen sind inzwischen mit einer 4-Tor-Anordnung möglich, die halbautomatische Messungen über einen Frequenzbereich von 25 Hz bis 10 kHz erlaubt. Dabei wird innerhalb von 60 Minuten eine relative Messunsicherheit von weniger als 10^{-7} erreicht. Binäre Josephson-Normale werden auch in

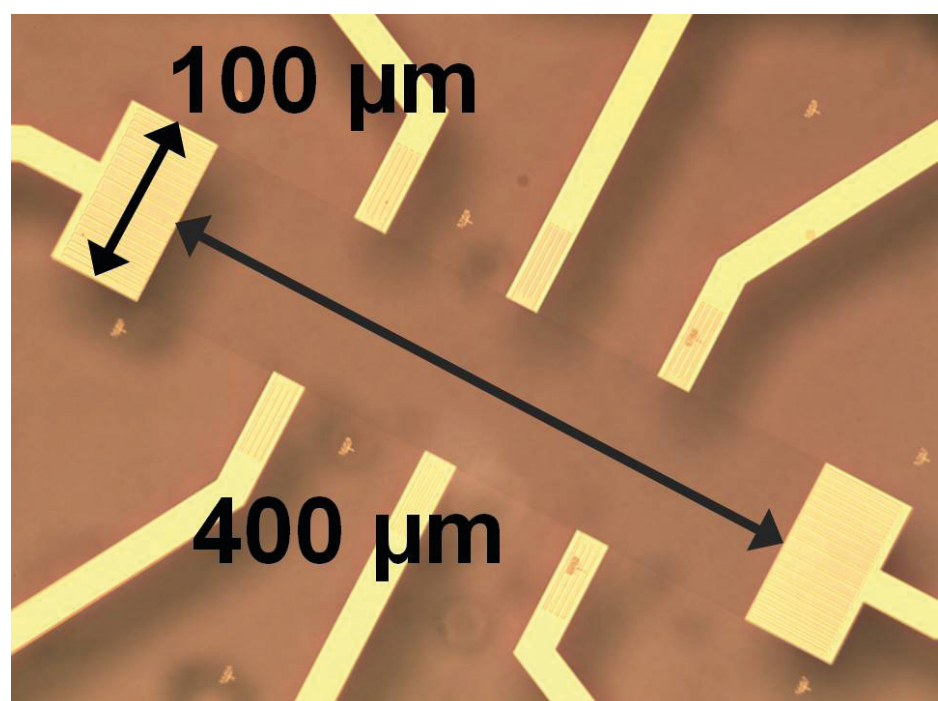
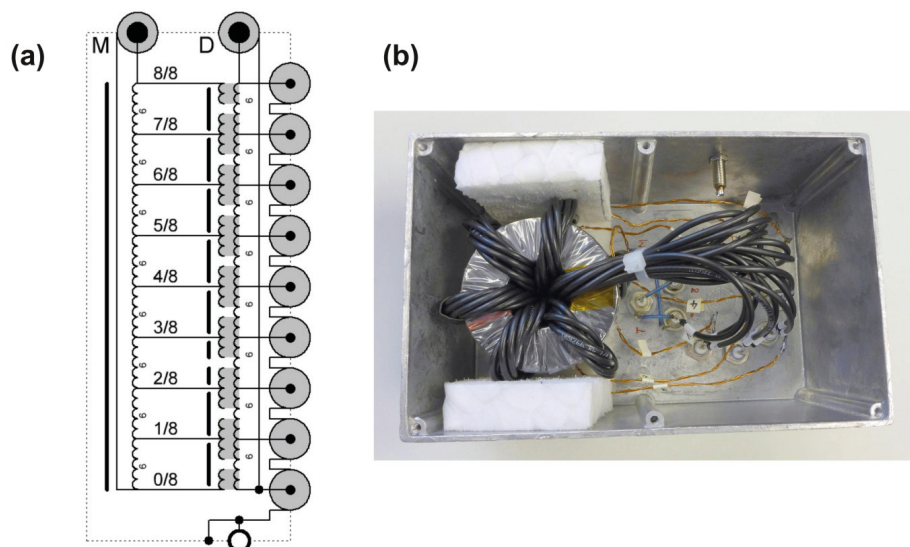


Bild 5: Rechteckige Hall-Struktur aus in der PTB hergestelltem Graphen. Die dünnen Gold-Kontakte dienen zur Messung von Hall- und Längsspannung.

Bild 6: Induktiver Spannungsteiler mit coaxialen Wicklungen für Frequenzen bis 100 kHz: (a) schematischer Aufbau, (b) Foto.



Spannungsmessgeräten, sogenannten Quantenvoltmetern, verwendet. In Kooperation mit dem nationalen Metrologieinstitut von Finnland, MIKES, konnte gezeigt werden, dass damit Wechselspannungen von 2,5 V und einer Frequenz von 500 Hz innerhalb einer Minute mit einer Unsicherheit von nur $0,02 \mu\text{V}/\text{V}$ gemessen werden können. Dies ist deutlich besser als die typische Messunsicherheit von Wechselspannungskalibrierungen, die bei etwa $1 \mu\text{V}/\text{V}$ liegt.

Binäre Josephson-Spannungsnormale erzeugen hohe Amplituden, jedoch nur bis zu Frequenzen im kHz-Bereich. Daher wird die Entwicklung von pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormalen intensiv vorangetrieben. Pulsgetriebene Josephson-Normale können Spannungen mit Frequenzen bis in den MHz-Bereich erzeugen. Zur Erhöhung ihrer Ausgangsspannung bedarf es jedoch noch beträchtlicher Anstrengungen. Im Berichtsjahr ist es gelungen, pulsgetriebene Josephson-Normale mit dreifach gestapelten Josephson-Kontakten zu fertigen und zu charakterisieren (Bild 4). Ferner konnten mehrere Josephson-Schaltungen in Serie geschaltet werden. Dadurch ist es gelungen, die Ausgangsamplitude pulsgetriebener Josephson-Spannungsnormale auf mehrere 100 mV zu erhöhen.

Für die hochpräzise Reproduzierung von Widerstandswerten wird der Quanten-Hall-Effekt benutzt. Für die Vereinfachung dieser Technologie bietet aus SiC hergestelltes Graphen großes Potenzial. Im Berichtsjahr hat die Abteilung die Herstellung dieses Materials im Reinraumzentrum der PTB etabliert (Bild 5). Die in der PTB hergestellten Graphen-Quanten-Hall-Strukturen reproduzieren Widerstandswerte mit einer Messunsicherheit im Bereich

10^{-9} . Auch erste Messungen des Wechselstrom-Quanten-Hall-Effekts in Graphen haben vielversprechende Ergebnisse geliefert. Das Potenzial von Graphen für die Impedanzmetrologie soll in den kommenden Jahren detailliert untersucht werden.

Der Ausbau der Einheitenskalen mit Methoden der klassischen elektrischen Messtechnik wurde ebenfalls systematisch fortgesetzt. Im Berichtsjahr wurde ein induktiver Spannungsteiler für Frequenzen bis 100 kHz entwickelt und kalibriert (Bild 6). Damit wurde der Grundstein gelegt, um zukünftig Kalibrierungen von Spannungsverhältnissen bis 100 kHz für die industrielle Messtechnik für dynamische Kräfte und dynamischen Druck anbieten zu können. Durch eine Neuberechnung der Messunsicherheit für den Wechselstromstärke-Gleichstromstärke-Transfer konnten die Kalibriermöglichkeiten für Wechselstrom-Messwiderstände bis zu Frequenzen von 100 kHz erweitert werden (bei Stromstärken bis zu 100 A). Zur Verringerung der Messunsicherheit bei der Darstellung und Weitergabe der Einheit der magnetischen Flussdichte, Tesla, im Bereich des Erdmagnetfeldes wurde die für diese Messungen notwendige Kompensation des Erdmagnetfeldes durch das Braunbek-Spulensystem der PTB erneuert und weiterentwickelt (Bild 7). Der Erfolg dieser Entwicklung konnte in einem internationalen Ringvergleich nachgewiesen werden.

Elektrische Energiemesstechnik

Elektrische Energiemesstechnik ist die Grundlage für die korrekte Abrechnung elektrischer Energie, die Überwachung elektrischer Verteil- und Übertragungsnetze und die Entwicklung verlustarmer Energieübertragungstechnologien. In ihren For-



Bild 7: Dreiachsiges Spulensystem nach Braunbek zur Kompensation der drei Komponenten des Erdmagnetfeldes

schungs- und Entwicklungsarbeiten greift die Abteilung metrologische Themen auf, die sich aus der aktuellen Entwicklung des Energieversorgungssystems ergeben.

Im Berichtsjahr wurde ein Messsystem zur Bestimmung der Verlustleistung von Leistungstransformatoren weiterentwickelt. Das System wurde bereits bei Vor-Ort-Messungen im Rahmen eines Akkreditierungsverfahrens der DAkkS eingesetzt. Im Bereich der Hochspannungsmesstechnik wurde ein Prototyp eines gedämpft-kapazitiven Stoßspannungsteilers nach dem Zaengl-Prinzip aufgebaut und ersten Untersuchungen unterzogen (Bild 8). Der Teiler ist für Stoßspannungen mit Scheitelwerten von bis zu 1000 kV ausgelegt, die bei der Wechselstromübertragung in modernen, zukunftsfähigen Energienetzen auftreten.

Im Gebiet der elektrischen Leistungsmesstechnik wird ein Normal für die breitbandige Leistungsmessung bis zu Frequenzen von 150 kHz aufgebaut. Oberschwingungen mit derart hohen Frequenzen, weit über der Grundfrequenz von 50 Hz, entstehen durch die Einbindung regenerativer Energiequellen ins elektrische Netz und durch die Verwendung nichtlinearer Verbraucher.

Die elektrische Leistungsmessung bei 50 Hz ist die Basis der Abrechnungsmesstechnik für elektrische Energie. Dementsprechend wichtig ist es, die Vergleichbarkeit dieser Messungen im internationalen Rahmen zu überprüfen. Das Beratende Komitee für Elektrizität und Magnetismus der Meterkonvention bereitet zurzeit einen internationalen Vergleich

der elektrischen Leistungsmessung bei 50 Hz vor. Die Abteilung arbeitet in der Leitungsgruppe dieses Vergleichs mit und leistet damit ihren Beitrag zur internationalen Harmonisierung des Messwesens.

Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie

Neben der messtechnischen Erschließung neuer Frequenzbereiche gewinnt die Vor-Ort-Messung von Hochfrequenzgrößen zunehmende Bedeutung.



Bild 8: Prototyp eines gedämpft-kapazitiven 1000-kV-Stoßspannungsteilers

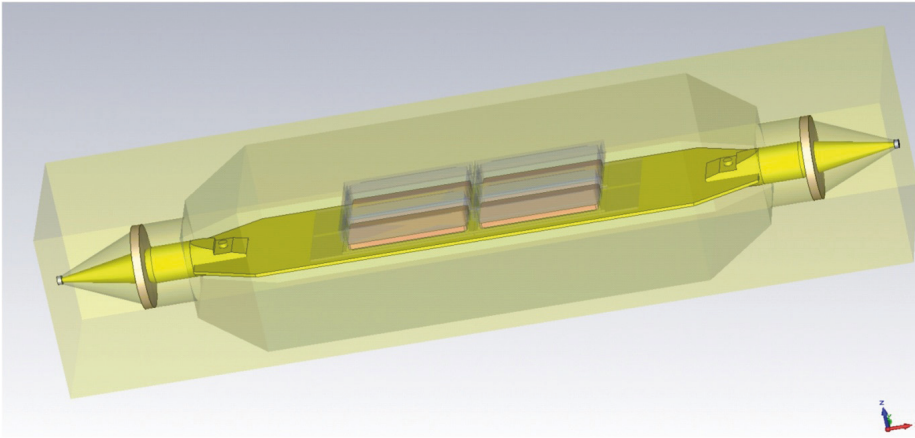


Bild 9: Computermodell einer mit vier Probenbehältern beladenen sogenannten μ TEM-Zelle, die als Feld-generator für die Exposition von biologischem Gewebe dient

Daher entwickelt die Abteilung neue Messsysteme für die Feldstärkeverteilung im freien Raum auf der Basis von Oktokoptern (unmanned aerial vehicle – UAV), siehe Titelblatt des Berichts der Abteilung 2. Im Berichtsjahr wurden gute Fortschritte bei der Präzisionslokalisierung von Oktokoptern sowie der Entwicklung von Sensorköpfen für unterschiedliche Frequenzbereiche erzielt. Die Technik wird für Messungen an Instrumentenlandesystemen auf Verkehrsflughäfen sowie Untersuchungen zur Wechselwirkung von Windenergieanlagen mit terrestrischen Navigationsanlagen wie UKW-Drehfunkfeuern und Radaranlagen eingesetzt.

Die elektrische Feldmesstechnik wird auch weiterentwickelt, um die Wechselwirkung hochfrequenter Felder mit biologischem Material zu untersuchen. Im Berichtsjahr wurde ein vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) gefördertes Projekt abgeschlossen, in dem die Wirkung von Signalen des Mobilfunks auf Blutzellen untersucht wurde. Die Abteilung war in dem Projekt für die Charakterisierung der Feldexpositionsanordnung verantwortlich (Bild 9). Es konnte kein signifikanter Einfluss der Felder auf das blutbildende System festgestellt werden.

Dämpfungsglieder zur Pegelbegrenzung von elektrischen Signalen werden in vielen Bereichen eingesetzt. Daher wurden im Rahmen einer Industriekooperation drei neue Messaufbauten für präzise Dämpfungsmessungen bis 110 GHz erstellt. Im Bereich 33 GHz bis 50 GHz konnten bereits rückgeführte Messungen mit einer Messunsicherheit ($k = 2$) von 0,06 dB bis 0,15 dB für Objekte mit einer Dämpfung von bis zu 30 dB durchgeführt werden. An der Rückführung der Messungen in den Bereichen 50 GHz bis 67 GHz und 67 GHz bis 110 GHz wird zurzeit gearbeitet.

Optoelektronische Techniken basierend auf Femtosekundenlasern erlauben extrem breitbandige Messungen von wenigen GHz bis in der THz-Bereich.

Bisher konnte das optoelektronische Messsignal jedoch nur in willkürlichen Einheiten angegeben werden. Mit Hilfe eines kalibrierten Radiometers ist es im Berichtsjahr gelungen, die Intensität von GHz- und THz-Quellen im Freiraum in SI-Einheiten zu messen (Bild 10).

Metrologie für magnetische Nanostrukturen

Die Arbeiten im Schwerpunktgebiet *Metrologie für magnetische Nanostrukturen* haben zum Ziel, rückführbare Messverfahren für die Parameter nanomagnetischer Bauteile, wie magnetische Speicherchips (Magnetic Random Access Memory, MRAM) oder magnetische Sensoren, zu entwickeln. Das Herzstück von MRAMs, die magnetische Speicherzelle, besteht aus einer sogenannten magnetischen Tunnelstruktur aus zwei magnetischen Dünnschichten, getrennt von einer nur etwa 1 nm dicken Isolatorschicht, der Tunnelbarriere. Einer ihrer wichtigsten Parameter ist die kritische Stromdichte, die bislang nur an fertig prozessierten Speicherzellen – nach komplexen mehrstufigen Prozes-

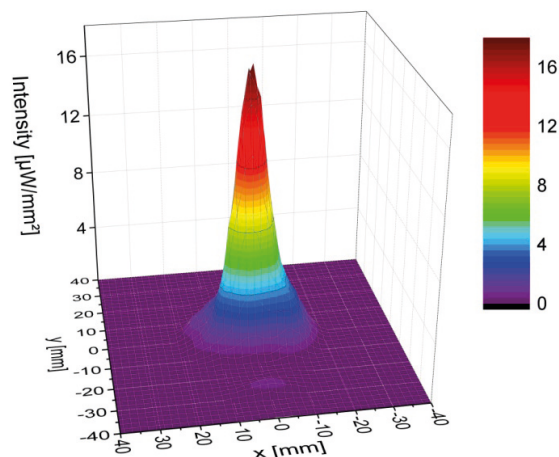


Bild 10: In den Freiraum emittierte Intensität (in SI-Einheiten) einer 100-GHz-Antenne, gemessen mit optoelektronischen Methoden

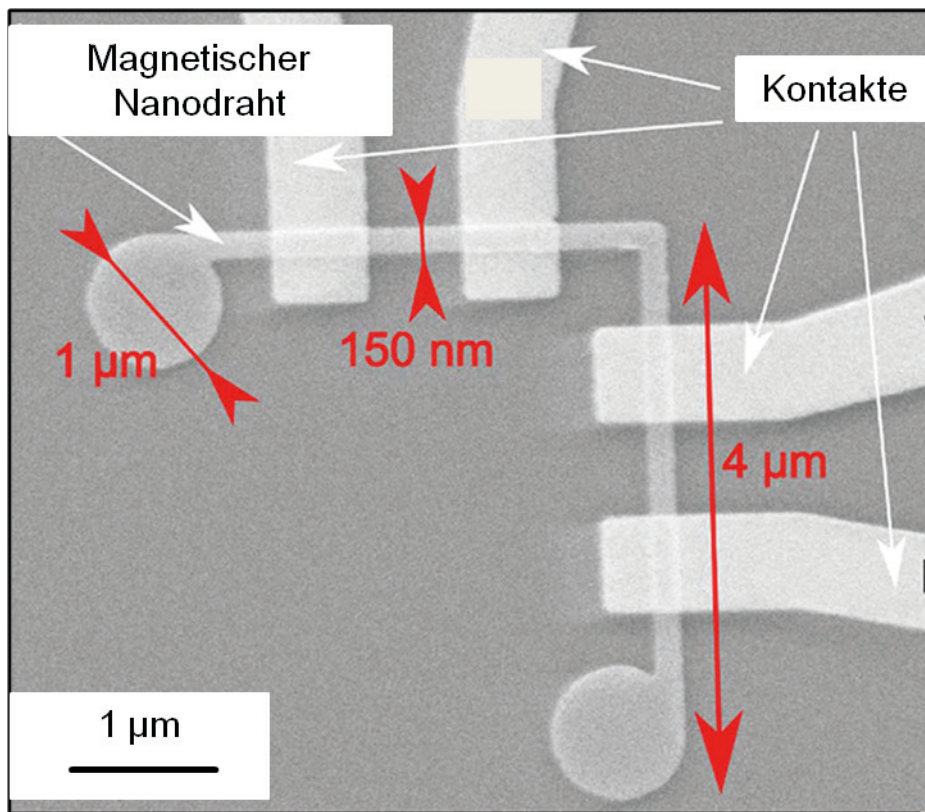


Bild 11: Gewinkelter magnetischer Nanodraht mit vier elektrischen Kontakten

sierungsschritten – ermittelt werden konnte. Ein neuentwickeltes induktives Messverfahren erlaubt es, die kritische Stromdichte aus Messungen der Magnetisierungsdynamik der Tunnelstruktur zu bestimmen. Der Vergleich mit elektrischen Messungen an nanostrukturierten Speicherzellen zeigt eine gute Übereinstimmung. Dies ermöglicht zukünftig eine schnelle Messung der kritischen Parameter direkt nach der Materialabscheidung und damit eine effiziente Prozesskontrolle während der Herstellung.

Ein vielversprechendes neues Sensorkonzept basiert auf der Erzeugung, Manipulation und Detektion einer einzelnen magnetischen Domänenwand in einem magnetischen Nanodraht. In einem gewinkelten Nanodraht kann eine Domänenwand durch ein Magnetfeld in dem Winkel erzeugt werden. Die Domänenwand ändert den elektrischen Widerstand des Drahtes, der über elektrische Kontakte gemessen werden kann. Zur Untersuchung dieses Sensor-konzepts wurden in der PTB Nanodrähte gefertigt (Bild 11), deren Eigenschaften im Rahmen einer internationalen Kooperation untersucht werden. Eine vielversprechende Anwendung ist die Detektion magnetischer Nanopartikel.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Präzise Messung von hohen Gleichspannungen zur Bestimmung der Ionen-Umlaufgeschwindigkeit in der Schwerionenforschung

Für ein Experiment zur Laserspektroskopie am Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GSI wurde im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung zwischen dem Institut für Kernphysik der TU Darmstadt und der PTB Braunschweig ein Präzisions-Spannungsteiler sowie ein Restwelligkeitsmesssystem am Hochspannungsterminal des Elektronenkühlers des Experimentierspeicherrings (ESR) installiert. Mithilfe des Präzisionsteilers konnte die Umlaufgeschwindigkeit der Ionen mit hoher Genauigkeit bestimmt und der daraus resultierende Dopplereffekt bei der Laserspektroskopie korrigiert werden. (J. Meisner, FB 2.3, johann.meisner@ptb.de)

Weitere Erhöhung der Ausgangsspannung von JAWS-Spannungsnormalen durch Einsatz dreifach gestapelter Josephson-Kontakte in Serienschaltung

Die Ausgangsspannung von JAWS-Spannungsnormalen (JAWS – Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer) konnte durch Kombination von dreifach gestapelten Josephson-Kontakten und durch die Serienschaltung von zwei Schaltungen, die auf einem Chip supraleitend gekoppelt sind, erhöht werden. Mit insgesamt 18 000 Kontakten pro Chip konnten Ausgangsspannungen von ca. $355 \text{ mV}_{\text{RMS}}$ bzw. $1005 \text{ mV}_{\text{pp}}$ synthetisiert werden. Diese Verbesserungen sind ein wesentlicher Schritt zu dem Ziel, Ausgangsspannungen von 1 V zu erreichen. (O. Kieler, FB 2.4, oliver.kieler@ptb.de)

Erfolgreiche Herstellung komplexer Nano-SQUIDs

Im Rahmen des EMRP-Projekts „MetNEMS“ und des DFG-Projekts „Hochempfindliche Nano-SQUIDs zur Detektion kleiner Spin-Systeme“ wurden SQUIDs mit unterschiedlichen Designs hergestellt. Die komplexen Designs der PTB Berlin für konventionelle SQUIDs wurden dabei an den bestehenden Herstellungsprozess für Nano-SQUIDs der PTB Braunschweig adaptiert. Die Charakterisierung dieser SQUIDs in Berlin ergab, dass sie für die geplanten Anwendungen sehr gut geeignet sind. (O. Kieler, FB 2.4, oliver.kieler@ptb.de)

Erste Entwicklungen für ein optisch betriebenes JAWS-Spannungsnormal

Im Rahmen des EMRP-Projekts „Q-WAVE“ und in enger Kooperation mit den Projektpartnern NPL (Großbritannien) und JV (Norwegen) wurden für den Betrieb von JAWS-Spannungsnormalen mit optischen Pulsen Chip-Carrier entworfen, im Reinraum der PTB hergestellt und mit Photodioden bestückt. Weitere Untersuchungen bei den Projektpartnern ergaben, dass diese Carrier und die Dioden gut für den Betrieb in JAWS geeignet sind. (O. Kieler, FB 2.4, oliver.kieler@ptb.de)

Al/AIO_x/Al-Josephson-Kontakt-basierter Mikrowellengenerator für die Anwendung in Einzelelektronentunnel-Experimenten unterhalb von 100 mK

Für den Einsatz als Photonen-Quelle im Mikrowellenbereich bis 170 GHz wurde eine anwendungsspezifische Josephson-Kontakt-Schaltung entwickelt. Sie besteht aus zwei parallel geschalteten Aluminium Josephson-Kontakten (sog. SQUID-Schaltung) und vier Bias-Widerständen auf der Basis einer teilweise oxidierten Titan- Metallschicht. Die Schaltung dient der On-Chip-Kalibrierung von Einzelphotonen-Detektoren, die zur quantitativen Charakterisierung des Mikrowellen-Hintergrundes innerhalb einer kryogenen Schaltungsumgebung unterhalb von $T = 100 \text{ mK}$ verwendet werden. (S. Lotkhov, FB 2.4, sergey.lotkhov@ptb.de)

Entwicklung von RF-SETs als ultra-sensitive Elektrometer für Einzelelektronenexperimente

Für die Fehlerkorrektur von Einzelelektronenpumpen und Integration mit diesen Pumpen wurden RF-SETs entwickelt und in ersten Messungen charakterisiert. (D. Reifert, FB 2.4, david.reifert@ptb.de)

Erhöhte Fertigungsausbeute von AC-Josephson-Spannungsnormalen mit Nb_xSi_{1-x}-Barriere

Die Fertigungsausbeute von AC-Josephson-Spannungsnormalen konnte durch einen Umbau der Beschichtungsanlage erhöht werden, der zu einer verbesserten Homogenität der Schichtdicke von Nb_xSi_{1-x}-Schichten für die Barriere der Josephson-Kontakte führte. (T. Scheller, FB 2.4, thomas.scheller@ptb.de)

Quantitative laserbasierte Intensitätsmessung von GHz- und THz- Quellen

Optoelektronische Techniken basierend auf Femtosekundenlasern ermöglichen die quantitative Messung der Intensität von GHz- und THz-Quellen im Freiraum. Die Messtechnik ist auf ein kalibriertes Radiometer zurückgeführt. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

Selbstreferenzierte Quantenstromquelle für die SI-Basiseinheit Ampere

Halbleiter-Einzelelektronenpumpen gelten als vielversprechende Kandidaten für ein zukünftiges Quantennormal der elektrischen Basiseinheit Ampere. An der PTB wurde jetzt erstmals ein Quantennormal aus solchen Einzelelektronenpumpen entwickelt, das einen Strom erzeugt und gleichzeitig die Präzision des erzeugten Stromes unabhängig verifiziert. (L. Fricke, FB 2.5, lukas.fricke@ptb.de)

Magnetische Nanodrähte für die Nanosensorik

An der PTB hergestellte magnetische Nanodrähte werden im Rahmen einer internationalen Forschungskoooperation im Hinblick auf Sensoranwendungen untersucht. (P. Krzysteczko, FB 2.5, patryk.krzysteczko@ptb.de)

Quanten-Hall-Schaltung aus epitaktischem Graphen liefert exakt quantisierten Widerstandswert

An der PTB wurde der Wachstumsprozess zur Herstellung von Graphen auf Siliziumkarbid (SiC) verbessert. Das so hergestellte Material eignet sich hervorragend für die Widerstandsmetrologie. (K. Pierz, FB 2.5, klaus.pierz@ptb.de)

Magneto-optisch induzierte Photoströme in GaAs: Volumen- und Oberflächenbeiträge

Durch Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften des Kristallgitters konnten Volumen- und Oberflächenbeiträge zu magneto-optisch induzierten Photoströmen in GaAs getrennt werden. Die nichtinvasiven und zeitlich aufgelösten Messungen ermöglichen weitergehende Untersuchungen zur Impulsraumdynamik von Ladungsträgern. (C. B. Schmidt, FB 2.5, christian.b.schmidt@ptb.de)

Quantenoptik mit Elektronen: Gezielte räumlich Trennung von Elektronenpaaren

In der Quantenoptik können Photonenpaare nach Bedarf erzeugt und an Strahlteilern räumlich getrennt werden. Dies gelang an der PTB nun auch mit Elektronenpaaren in einem Halbleiter. (N. Ubbelohde, FB 2.5, niels.ubbelohde@ptb.de)

Laserbasierter Messaufbau zur Bestimmung der thermischen Transporteigenschaften von Dünnschichten und Nanostrukturen

Ein neu aufgebautes Zeitbereichsreflektometer basierend auf Femtosekundenlasern ermöglicht die Messung der thermischen Transporteigenschaften von Dünnschichten und Nanostrukturen mit hoher räumlicher Auflösung. (H. Yang, FB 2.5, hangfu.yang@ptb.de)

Ein ultrastabiler rauscharmer Stromverstärker

In der PTB wurde ein neuartiges, handliches Pikoamperemeter für die rückgeführte Messung kleinster Stromstärken auf überragendem Präzisionsniveau entwickelt. (D. Drung, H. Scherer, FB 7.2, 2.6, dietmar.drung@ptb.de, hansjoerg.scherer@ptb.de)

Erste vielversprechende AC-Messungen des Quanten-Hall-Effekts in Graphen

Die besonderen Eigenschaften von Graphen könnten nicht nur Elektronikanwendungen von Transistoren bis zu Touchscreens revolutionieren. Graphen weist auch einen Quanten-Hall-Effekt auf, der für die Metrologie hochinteressant ist. An der PTB wurde nun gezeigt, dass die Wechselstromeigenschaften des Quanten-Hall-Widerstandes von Graphen relativ günstig sind, sodass eine Entwicklung als zukünftiges Quanten-Impedanz-Normal realisierbar erscheint. (J. Schurr, FB 2.6, juergen.schurr@ptb.de)

4-Tor-Josephson-Impedanzmessbrücke realisiert

Die Kalibrierung von Impedanzverhältnissen mit einer Josephson-Impedanzmessbrücke ist nun auch mit einer 4-Tor-Anordnung möglich. (R. Behr, FB 2.6, ralf.behr@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Entwicklung von induktiven Spannungsteilern für die Spannungsverhältniskalibrierung bis 100 kHz

Für die Spannungsverhältniskalibrierung im Frequenzbereich von 5 kHz bis 100 kHz wurden ein induktiver N/8-Spannungsteiler mit koaxialen Wicklungen sowie weitere induktive Komponenten zu dessen Rückführung entwickelt und kalibriert. Damit wurde der Grundstein gelegt, um zukünftig Spannungsverhältniskalibrierungen bis 100 kHz für Anwendungen im Bereich industrieller Messungen von dynamischen Kräften und dynamischem Druck anbieten zu können. (F. Beug, FB 2.1, florian.beug@ptb.de)

Erweiterung der Kalibriermöglichkeiten für Wechselstrom-Strommesswiderstände

Wechselstrom-Strommesswiderstände wurden bisher hauptsächlich bei technischen Frequenzen von 16 $\frac{2}{3}$ Hz bis 1 kHz kalibriert. Durch eine Neuberechnung der Messunsicherheiten für den Wechselstromstärke-Gleichstromstärke-Transfer ergab sich eine Erweiterung der Kalibriermöglichkeiten bis zu Frequenzen von 100 kHz bei Stromstärken bis zu 100 A. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

Verifizierung der Niederfrequenz-Transferdifferenz von planaren Thermokonvertern mittels Abtastverfahren

Die bei planaren Thermokonvertern auftretenden Transferdifferenzen bei niedrigen Frequenzen wurden erstmals mittels eines asynchronen Abtastverfahrens bestimmt. Zur Berechnung des Effektivwertes des Messsignals aus den Abtastwerten wurde ein Sinus-Fit angewandt, mit dem die Transferdifferenzen zwischen 5 Hz und 45 Hz mit einer erweiterten Messunsicherheit von $1,2 \cdot 10^{-6}$ bestimmt wurden. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

Kalibrierung der Leitfähigkeit von Metallen mit Proben quadratischer Geometrie

Mit dem im Aufbau befindlichen van-der-Pauw-Messplatz für Halbleiter wurden erstmals quadratische Leitfähigkeitsstandards aus Metall für Kunden kalibriert. (B. Schumacher, FB 2.1, bernhard.schumacher@ptb.de)

Modellierung mehrfach beschichteter, koaxialer Luftleitungen

Es wurde ein analytisches Mehrschichten-Modell für die Berechnung von Stromverteilung und Dämpfung einer mehrfach beschichteten, koaxialen Luftleitung entwickelt. (S. Zinal, FB 2.2, sherko.zinal@ptb.de)

Erweiterung des Messbereichs für dielektrische Verlustfaktor-Messungen in Transmissionsmesstechnik

Ein neues Messverfahren, bei dem koplanare Wellenleiter zum Einsatz kommen, erlaubt erstmalig die Bestimmung dielektrischer Verlustfaktoren in der Größenordnung 10^{-4} in einem weiten Frequenzbereich von unter 10 GHz bis mindestens 80 GHz. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

Messung von HF-Dämpfung im Millimeterwellenbereich

Dämpfungsglieder zur Pegelbegrenzung von elektrischen Signalen werden in vielen Bereichen eingesetzt, z. B. in Messtechnik, Kommunikation, Rundfunk und bei Satellitenanwendungen. Während im niedrigen und mittleren Frequenzbereich der Dämpfungswert bereits seit einiger Zeit rückgeführt und mit geringer Unsicherheit bestimmt werden kann, wurde im Millimeterwellenbereich oft auf die vektorielle Netzwerkanalyse zurückgegriffen, die besondere messtechnische Herausforderungen und Unsicherheiten mit sich bringt. Im Rahmen einer Industriekooperation wurden nun in der PTB drei neue Messaufbauten erstellt, um präzise Dämpfungsmessungen bis 110 GHz durchzuführen. (R. Judaschke, FB 2.2, rolf.judaschke@ptb.de)

UAV-basierte Messung von Feldstärken und Antennendiagrammen im freien Raum

Die Messung von Feldstärkeverteilungen im freien Raum bzw. der Richtcharakteristik von fest installierten Antennenanlagen vor Ort war bisher nur sehr schwer oder gar nicht möglich. Auf der Basis von Oktokoptern (unmanned aerial vehicle – UAV) entwickelt die PTB für diese Fragestellungen technische Lösungen und erweitert damit ihre Messmöglichkeiten. Beispiele für Anwendungen sind Messungen an Instrumentenlandesystemen auf Verkehrsflughäfen sowie Untersuchungen zur Wechselwirkung von Windenergieanlagen mit terrestrischen Navigationsanlagen wie UKW-Drehfunkfeuer und Radaranlagen. (T. Schrader, FB 2.2, thorsten.schrader@ptb.de)

2-Kanal Abtastsystem für den Einsatz in automatisierten Messwandlerprüfeinrichtungen

Die derzeit im Bereich der Prüfung und Kalibrierung von Prüfmitteln für Messwandler eingesetzten Messeinrichtungen sind seit etwa 20 Jahren erfolgreich im Betrieb. Die verwendeten Komponenten in diesen Einrichtungen bzw. deren Software sind jedoch nicht mehr erhältlich. Daher ist es notwendig, diese Messsysteme zu modernisieren, wobei auch deren messtechnische Eigenschaften verbessert werden sollen. Gemeinsames Herzstück dieser Messsysteme wird ein zweikanaliges Abtastsystem sein. Der Schwerpunkt seiner Entwicklung liegt auf dem Erreichen eines nach Betrag und Phase hervorragenden Gleichlaufs zwischen beiden Kanälen, um das für die Messaufgabe notwendige komplexe Spannungsverhältnis mit möglichst geringer Messunsicherheit zu erfassen. (E. Mohns, FB 2.3, enrico.mohns@ptb.de)

Erfolgreiche Weiterentwicklung der Erdmagnetfeldkompensation im internationalen Ringvergleich nachgewiesen

Zur Verringerung der Messunsicherheit bei der Darstellung und Weitergabe der Einheit Tesla im Bereich der Flussdichte des Erdmagnetfeldes wurde die für diese Messungen notwendige Kompensation des Erdmagnetfeldes durch das Braunkbek-Spulensystem der PTB erneuert und weiterentwickelt. Hierbei wurde insbesondere die Steuerung der durch das Spulensystem fließenden Kompensationsströme optimiert. Der Erfolg dieser Entwicklung konnte im Rahmen eines internationalen Ringvergleiches eindrucksvoll nachgewiesen werden, bei dem die PTB mit einer in diesem Feldbereich um den Faktor 5 geringeren Messunsicherheit teilnehmen konnte. (H. Harcken, FB 2.5, hans.harcken@ptb.de)

Nichtdestruktive Messtechnik für kritische Materialparameter magnetischer Tunnelsysteme

Eine an der PTB entwickelte induktive Messtechnik ermöglicht die Bestimmung kritischer Materialparameter für neuartige magnetische Speichermaterialien. (S. Sievers, FB 2.5, sibylle.sievers@ptb.de)

Ein Quantenvoltmeter für präzise Wechselspannungsmessungen

Das Quantenvoltmeter der PTB kann Wechselspannungen ($2,5 \text{ V}_{\text{RMS}}$, 500 Hz) mit einer Unsicherheit von $0,02 \mu\text{V}/\text{V}$ messen. (J. Lee, FB 2.6, jinni.lee@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Projekt „Einfluss hochfrequenter Felder des Mobilfunks auf das blutbildende System in vitro“ abgeschlossen

Das vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) geförderte Projekt „Einfluss hochfrequenter Felder des Mobilfunks auf das blutbildende System in vitro“, in dem die PTB zusammen mit dem Institut für Pharmakologie und Toxikologie der Universität Würzburg die Auswirkungen der Exposition von Blutzellen mit hochfrequenten Feldern untersucht hat, wurde erfolgreich abgeschlossen. Im Rahmen des Projektes wurden die Auswirkungen der Feldexposition mit Signalen des Mobilfunks auf Zelllinien in drei unabhängigen Replikaten untersucht. Nach Auswertung der untersuchten Endpunkte konnte kein signifikanter Einfluss der Felder auf das blutbildende System festgestellt werden. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Abschluss des Projekts „Electromagnetic Characterisation of Materials for Industrial Applications up to Microwave Frequencies“

2014 wurde das EMRP-Projekt „Electromagnetic Characterisation of Materials for Industrial Applications up to Microwave Frequencies – EMINDA“ erfolgreich abgeschlossen. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

Joint Research Project „Ultrafast Electronics and High Speed Communications (Ultrafast)“ abgeschlossen

Im Juni 2014 wurde das EMRP-Projekt „Ultrafast Electronics and High Speed Communications (Ultrafast)“ erfolgreich beendet, in dem die PTB zusammen mit sechs anderen nationalen Metrologieinstituten und weiteren Partnern an neuen Messverfahren für Signale und Komponenten für die Übertragung sehr hoher Datenraten gearbeitet hat. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

Internationales Projekt zur Metrologie für magnetische Sensoren erfolgreich abgeschlossen

Ein von der PTB koordiniertes Europäisches Forschungsprojekt zur Messtechnik für magnetische Sensoren wurde erfolgreich abgeschlossen. (H. W. Schumacher, FB 2.5, hans.w.schumacher@ptb.de)

Widerstandsmetrologie: Erfolgreicher On-Site-Vergleich mit dem BIPM und D-A-CH-Peer-Review schließen Neuentwicklung der Kryostromkomparator-Messbrücke ab

Die Kryostromkomparator-Messbrücke der PTB wurde in den vergangenen Jahren einer vollständigen Überarbeitung unterzogen. Die im Rahmen dieser Entwicklung erzielte signifikante Verbesserung der Messmöglichkeiten wurde in einem On-Site-Vergleich mit dem Internationalen Büro für Maß und Gewicht, BIPM, und in einem D-A-CH-Peer-Review bestätigt. (M. Götz, FB 2.6, martin.goezt@ptb.de)

Abteilung 3

Chemische Physik und Explosionsschutz



Sitzungen von IEC TC 31 (Explosionsschutz) und Chairman's Advisory Group vom 24. März bis 4. April 2014 in der PTB Braunschweig

Die Sitzungen des IEC Technical Committee 31 „Equipment for explosive atmospheres“ und der Chairman's Advisory Group (CAG) wurden vom 24. März bis 4. April 2014 von der PTB in Braunschweig als Gastgeber ausgerichtet. An den insgesamt 25 Sitzungen verschiedener Maintenance-Teams, Arbeitsgruppen und Projekt-Teams nahmen ca. 150 Explosionsschutz-Experten aus aller Welt teil (Bild 1).

Die Teilnehmer aus Kreisen der Hersteller, Anlagenbetreiber und Prüfstellen arbeiteten während dieser Sitzungen an der Fortschreibung der internationalen IEC-Normen sowie auch an der Erarbeitung neuer Normen. Mehr als 10 PTB-Mitarbeiter sind in den internationalen IEC-Gruppen (Hauptkomitee, Unterkomitees, Arbeitsgruppen, Maintenance-Teams, Projekt-Teams), zum Teil in leitender Funktion, tätig. Dabei fließen Erfahrungen und Kenntnisse ein, die den Stand der Wissenschaft und aktuelle Erkenntnisse aus der Praxis der Sicherheitstechnik berücksichtigen. Durch die große Bandbreite und die damit verbundene technisch-wissenschaftliche Expertise, insbesondere durch die Bündelung der Arbeiten im gemeinsamen Lenkungs-gremium von

BAM und PTB auf dem Gebiet der physikalisch-chemischen Sicherheitstechnik, können hier zahlreiche Impulse für die Normung gegeben werden.

Die Sitzungsteilnehmer wurden bei der Abendveranstaltung am 3. April 2014 in der Dornse des Altstadtrathauses mit jeweils einer Grußnote der Bürgermeisterin der Stadt Braunschweig, eines Mitglieds des PTB-Präsidiums und des Vorsitzenden des Hauptkomitees TC 31 festlich empfangen. Beim gemeinsamen Abendessen der Gäste und PTB-Mitarbeiter wurden anregende Gespräche geführt (Bild 2).

PTB Ex Proficiency Testing Scheme

Im Rahmen des internationalen „PTB Ex Proficiency Testing Schemes“, organisiert durch die PTB, wurden die Ex-Ringvergleichsprogramme „Temperature Classification“ und „Flame Transmission“ erfolgreich abgeschlossen. Beim erstgenannten Programm wurden durch die teilnehmenden Ex-Prüflaboratorien an von der PTB eigens entwickelten homogenen Vergleichsprüfmustern der sogenannte „Hotspot“ (heißester Punkt auf dem Prüfmuster) ermittelt sowie die maximale Oberflächentemperatur an unterschiedlichen Materialien gemessen (s. Bild 3). Anschließend wurde, basierend auf den Messdaten, in Übereinstimmung mit der IEC 60079-0 eine Temperaturklasse bestimmt. Beim Programm



Titelbild:

Zündung eines explosionsfähigen Gemischs durch ein kleines, heißes Partikel

Bild 1: Teilnehmer der IEC TC31 Chairman's Advisory Group am 3. April 2014 in der PTB in Braunschweig



Bild 2: Abendveranstaltung der IEC TC31 Chairman's Advisory Group am 3. April 2014 in der Dornse des Altstadtrathauses in Braunschweig

„Flame Transmission“ erhielten die Prüflaboratorien mithilfe eines Prüfmusters, bestehend aus einer Rohranordnung und drei hochpräzisen Messingdüsen unterschiedlicher Durchmesser, Zündwahrscheinlichkeiten in Übereinstimmung mit der IEC 60079-1.

Die Ergebnisse der insgesamt 51 nationalen und internationalen Ex-Prüflaboratorien aus 25 Nationen wurden anschließend verglichen und in Ergebnisberichten innerhalb des IEC Ex-Systems in anonymisierter Form veröffentlicht. Ein wesentliches

Merkmal des „PTB Ex Proficiency Testing Schemes“ ist es, neben der statistischen Auswertung der Teilnehmerergebnisse auch die Analyse der Ursachen für mögliche Abweichungen durchzuführen. Dies geschieht in enger Abstimmung mit den jeweiligen Prüflaboratorien in Workshops mit der gesamten Ex-Community. In diesem Sinne war die PTB im September 2014 Organisator eines viertägigen Workshops, zu dem sich mehr als 70 Experten aus dem Bereich Explosionsschutz in der PTB versammelt hatten. Der gesamte Erkenntnisgewinn und die gesammelten Erfahrungen wurden abschließend konzentriert in sogenannten „Best Practice Papers“ veröffentlicht und dienen ergänzend zu den jeweiligen Normen als Unterstützung bei der Durchführung von Messungen bzw. bei der Bestimmung von Kenngrößen im Bereich Explosionsschutz.

Das „PTB Ex Proficiency Testing Scheme“ der PTB ist in Form und Umfang einzigartig und umfasst mittlerweile vier Programme, die verschiedene Bereiche des Explosionsschutzes abdecken. Die PTB als Provider wird sich dauerhaft für die wissenschaftliche Begleitung verantwortlich zeigen, insbesondere für die Entwicklung der Vergleichsverfahren, ihre Methodik und Auswertungsalgorithmen. Die Planungen für zwei neue Programme mit den thematischen Schwerpunkten „Eigensicherheit“ und „Oberflächenwiderstand“ haben bereits begonnen.

Erwärmung von Leuchtstofflampen am Ende ihrer Lebensdauer

An explosionsgeschützten Langfeldleuchten der Zündschutzarten erhöhte Sicherheit „e“ und nicht-funkend „nA“, in denen der Betrieb von Leucht-



Bild 3: Prüfmuster „TC“ des Ringvergleichsprogramms „Temperature Classification“

stofflampen nach IEC 60081 mit elektronischen Vorschaltgeräten erfolgt, muss an den Lampen auch am Ende ihrer Lebensdauer eine maximal zulässige Oberflächentemperatur eingehalten werden. Das Risiko, dass an gealterten Leuchtstofflampen Temperaturen über der maximal zulässigen Oberflächentemperatur auftreten, wurde in der Vergangenheit als hinreichend gering eingeschätzt, da für die in diesen Leuchten verwendeten Leuchtstofflampen keine dieser Annahme widersprechenden Erfahrungen vorlagen und die Betriebsgeräte für Leuchtstofflampen in explosionsgeschützten Leuchten dem Stand der Technik entsprachen.

Allerdings zeigte sich mit steigender Anzahl der installierten Leuchten mit elektronischem Vorschaltgerät und mit Leuchtstofflampen mit zwei Stiften (statt der bisherigen Einstiftleuchtstofflampen mit konventionellem Vorschaltgerät), dass sicherheitsrelevante höhere Temperaturen an den Leuchtstofflampen auftreten können. Die Erfahrungen mit offensichtlich erhöhten Temperaturen an Leuchtstofflampen in Leuchten für Allgemeinbeleuchtung führten zu Sicherheitsanforderungen an elektronische Betriebsgeräte gemäß EN/IEC 6134723. Damit war ein sicherheitstechnisch relevanter Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur der Lampe, dem Leistungsumsatz in den Elektroden der Leuchtstofflampe an ihrem Lebensdauerende und der Funktion des elektronischen Betriebsgerätes im sicherheitstechnischen Konzept zu berücksichtigen. Diese Anforderungen gelten für alle elektronischen Betriebsgeräte (Vorschaltgeräte), die für den Hochfrequenzbetrieb von Leuchtstofflampen nach IEC 60081 und damit auch für Betriebsgeräte dieser Art in explosionsgeschützten Leuchten vorgesehen sind.

Die Anwendbarkeit der in der EN/IEC 61347-2-3 angegebenen Grenzwerte für die höchste Elektrodenleistung zur Einhaltung der Temperaturgrenzen an Leuchtstofflampen in explosionsgeschützten Leuchten wurde durch die PTB untersucht (s. Bild 4). Aus experimentellen Untersuchungen mit Leuchtstofflampen im explosionsfähigen Gemisch und aus Temperaturmessungen an Leuchtstofflampen wurden dabei sicherheitstechnisch begründete niedrigere Grenzwerte der Elektrodenleistung zur Vermeidung zu hoher Oberflächentemperaturen an Leuchtstofflampen in explosionsgeschützten Leuchten abgeleitet.

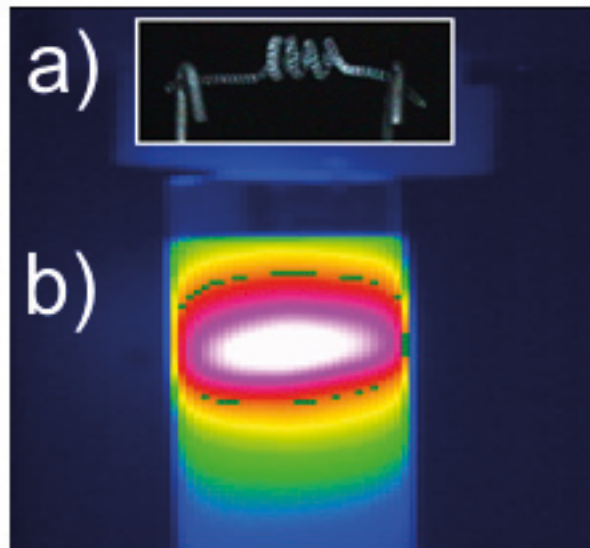





Bild 4: a) Elektrode am Ende der Lebensdauer der Lampe, b) Oberflächentemperatur der Leuchtstofflampe; ohne Begrenzung des Leistungsumsatzes in den Elektroden der Leuchtstofflampe können zündwirksame Oberflächentemperaturen erreicht werden.

Untersuchungen an Magnetmaterialien zum Einsatz in explosionsgeschützten permanentmagneterregten Synchronmaschinen

Aufgrund des hohen Energieeinsparungspotenzials insbesondere im Teillastbereich und der guten Regelbarkeit besteht seitens der Hersteller und auch der Anwender der Wunsch, permanentmagneterregte (PM-) Synchronmaschinen auch in explosionsgefährdeten Bereichen einzusetzen, wobei für den Einsatz in der Zone 1 wegen der einfacheren mechanischen Ausführbarkeit und aus Kostengründen die Zündschutzart erhöhte Sicherheit bevorzugt wird.

Neben der Betrachtung der Erwärmung im Normalbetrieb und im Störfall müssen die im Rotor vorhandenen Magnete einer Betrachtung unterzogen werden, um einen sicheren Betrieb gewährleisten zu können. Hierbei sind die folgenden Punkte zu betrachten:

- die sichere Befestigung der Magnete auf bzw. im Rotor
- das Korrosionsverhalten der Magnete und ggf. entsprechende Korrosionsschutzmaßnahmen sowie
- die Einsatztemperaturgrenze, bis zu der mit keiner irreversiblen Änderung der magnetischen Eigenschaften zu rechnen ist.

	Foto	Φ / Vs	B / T	% B
Vor der Lagerung		0,00904	1,16699	100
Nach 7 Tagen		0,00901	1,16312	99,67
Nach 21 Tagen		0,00902	1,16441	99,78

Zurzeit werden diese Fragestellungen im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Programms „Innovation mit Normen und Standards (INS)“ in einem Forschungsprojekt zusammen mit zwei namenhaften Herstellern von PM-Synchronmaschinen wissenschaftlich untersucht, wobei bisher die Schwerpunkte auf der Temperaturbeständigkeit und den Korrosionseigenschaften der NdFeB-Magneten lagen. Um die bei atmosphärischen Bedingungen sehr langsam ablaufenden Korrosionsprozesse zu beschleunigen, wurden die Magnetproben in einem Klimaschrank bei einer Temperatur von 90 °C und 90 % relativer Luftfeuchte für insgesamt 21 Tage gelagert. Vor der Lagerung, nach 7 Tagen und am Ende nach 21 Tagen wurden die Magnete aus der Prüfkammer entnommen und der Zustand der Magnete (Oberfläche und magnetische Eigenschaften) mit den Referenzwerten vor der Lagerung verglichen. Die magnetischen Eigenschaften wurden nicht durch die Korrosion infolge der Klimalagerung beeinflusst (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Ergebnis der Korrosionsversuche an NdFeB-Magneten

Die Temperaturabhängigkeit der magnetischen Eigenschaften wurde ebenfalls in einem Klimaschrank untersucht, hierbei jedoch ohne Luftbefeuchtung. Die Magnetproben wurden hierbei insgesamt für 14 Tage bei 95 °C, 115 °C, 130 °C oder 150 °C gelagert. Zu Beginn der Lagerung, nach 7 Tagen und nach 14 Tagen wurden die magnetischen Eigenschaften der Proben mittels Helmholtz-Spulen gemessen. Bezogen auf die magnetischen Flussdichten der Proben vor der Lagerung ist gemäß Bild 5 ab einer Temperatur von 130 °C eine signifikante irreversible Reduzierung der magnetischen Flussdichte zu beobachten.

Zusammenfassend betrachtet scheint bei dem hier untersuchten Magnetmaterial die während der Klimalagerung aufgetretene, deutlich sichtbare Korrosion der Magnete noch keinen sichtbaren Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften zu haben. Es

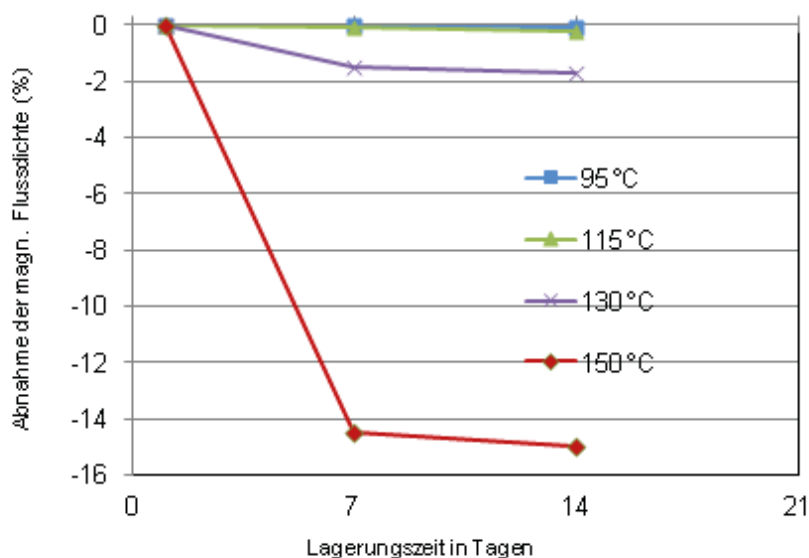


Bild 5: Irreversible Abnahme der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur

konnte jedoch beobachtet werden, dass bereits bei einer Temperatur von 130 °C eine irreversible Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften auftritt. Da mit der abnehmenden Flussdichte der Magnete bei gleichem Drehmoment ein höherer Strombedarf des Motors einhergeht und den Explosionsschutz betreffende höhere Erwärmungen auftreten, wird dieser Punkt Gegenstand zukünftiger detaillierterer Untersuchungen sein. Bei der Prüfung explosionsgeschützter Maschinen ist daher auch die maximale Magnettemperatur eine wichtige Größe, die erfasst und bewertet werden muss.

Zündung durch elektrische Entladungen

Elektrische Entladungen gehören zu den häufigsten Zündquellen für Gasexplosionen. Das Verständnis des durch elektrische Entladungen ausgelösten Zündprozesses ist daher von großem Interesse. Bisher wird bei der Zulassung von explosionsgeschützten Geräten im Wesentlichen mit empirisch ermittelten Grenzwerten für die zulässige Energie von Entladungen gearbeitet. Im Rahmen der DFG-geförderten Forschergruppe FOR 1447 „Physicochemical-based Models for the Prediction of safety-relevant Ignition Processes“ wird deshalb die Zündung durch elektrische Entladungen untersucht. Durch die Kombination experimenteller und numerischer Methoden soll ein detaillierter Einblick in die zugrundeliegenden physikalischen und chemischen Prozesse erfolgen. Letztlich soll die Entwicklung eines numerischen Modells die

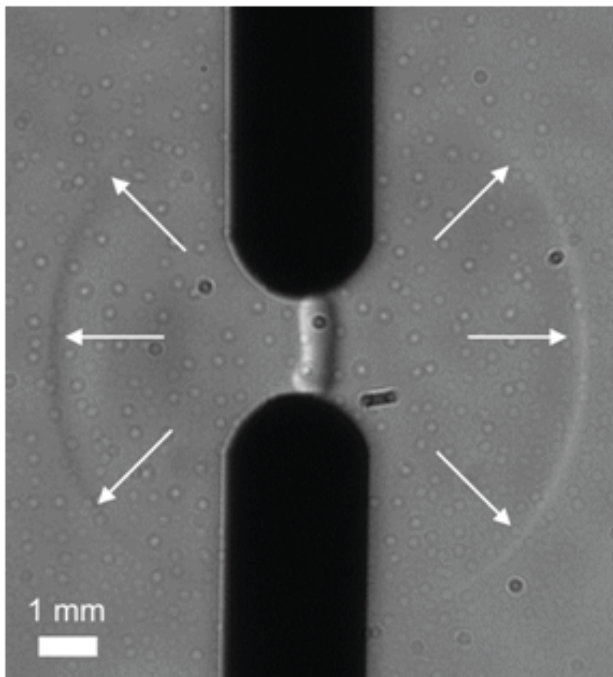


Bild 6: Schlieren-Bild einer Stoßwelle infolge einer elektrischen Entladung

Vorhersage von Zündungen möglich machen und damit die sicherheitstechnische Beurteilung von explosionsgeschützten Geräten unterstützen.

Elektrische Entladungen können innerhalb sehr kurzer Zeit (weniger als einer Mikrosekunde) ein kleines Gasvolumen um mehrere tausend Kelvin aufheizen. Dieser starke Temperaturanstieg führt zu einer schnellen Expansion des heißen Gases und zur Entstehung einer Stoßwelle. Die Stoßwelle pflanzt sich näherungsweise mit Schallgeschwindigkeit fort und verdichtet das umgebende Gas. Damit wird Energie vom Zündvolumen weg transportiert und somit die Effizienz der Entladung hinsichtlich einer Zündung verringert. Die Stoßwelle ist neben anderen Effekten wie z. B. Wärmeleitung ein wichtiger Parameter bei der Beschreibung des Zündprozesses und der Verluste. Experimentell wird die Stoßwelle durch das Schlieren-Verfahren untersucht. Dabei werden Brechungsindexunterschiede in transparenten Medien sichtbar gemacht. In Gasen korreliert der Brechungsindex mit der Gasdichte. An der Stoßwellenfront ändert sich die Dichte schlagartig, sodass sie im Schlieren-Bild als feine Linie sichtbar wird (in Bild 6 mit Pfeilen angedeutet). Deutlicher zu erkennen ist der heiße Plasmakern zwischen den Elektroden, dessen Durchmesser ein weiterer wichtiger Parameter für die numerische Simulation der Entladung ist. Die Ausbreitung der Stoßwelle wird für verschiedene Kombinationen von Elektrodenabstand, Entladungsenergie und Gemischzusammensetzung betrachtet. Es ist zu erwarten, dass diese Parameter die Stoßwelle vor allem zu frühen Zeitpunkten, also wenige Mikrosekunden nach der Entladung, beeinflussen.

Einige Eigenschaften der Entladung sind experimentell nicht oder nur schwer zugänglich, beispielsweise plasmaphysikalische und chemische Eigenschaften. Über die Simulation der Entladungen und den Abgleich mit experimentell bestimmten Charakteristika können diese Eigenschaften dann berechnet werden.

Ultraschall in explosionsfähigen Atmosphären

Ultraschall wird in vielerlei Anwendungen mit brennbaren Flüssigkeiten und explosionsfähigen Atmosphären eingesetzt. Beispiele dafür sind die industrielle Teilereinigung, Ultraschallbäder mit brennbaren Reinigungsflüssigkeiten, Messgeräte zur Durchfluss- oder Füllstandsmessung, das Zerstäuben von Flüssigkeiten und die Abwasserbehandlung.

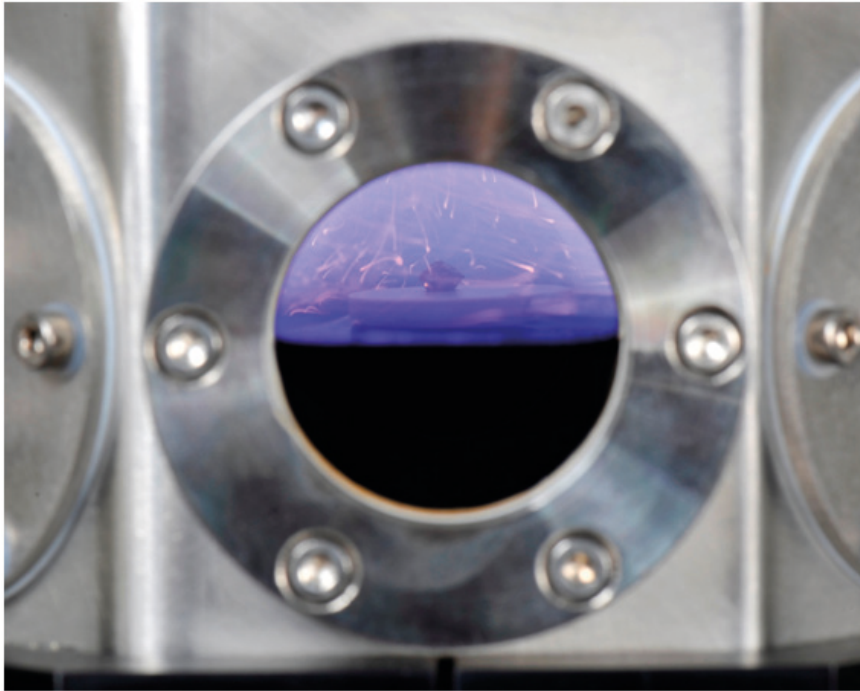


Bild 7: Zündung eines explosionsfähigen Gemisches durch an einem Zielkörper fokussierten Ultraschall

Ultraschall ist in den Technischen Regeln für Betriebssicherheit TRBS 2152 Teil 3 „Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre“ und der DIN EN 11271:2011 „Explosionsschutz – Grundlagen und Methodik“ als eine von 13 Zündquellenarten genannt. Für Ultraschall gilt gegenwärtig ein Intensitätsgrenzwert von 1 mW/mm^2 , der vor etwa 40 Jahren allein durch Analogiebetrachtungen zu anderen Zündquellen und theoretische Abschätzungen festgelegt wurde. Zu diesen Abschätzungen liegen jedoch keine aussagekräftigen Aufzeichnungen oder Veröffentlichungen vor.

Dieser Grenzwert wurde in den letzten Jahren zunehmend zu einem Innovationshindernis, da die technische Entwicklung der Ultraschallanwendungen mehr und mehr an diesen Grenzwert stößt. Zum einen ist er aus messtechnischer Sicht nicht hinreichend definiert. Zum anderen gab es bislang weder Explosionsunfälle, die auf Ultraschall zurückzuführen sind, noch einen experimentellen Nachweis, dass Ultraschall als Zündquelle wirksam werden kann. Ziel eines Forschungsprojektes der PTB-Fachbereiche 3.7 *Zündquellsicherheit* und 1.6 *Schall* in Kooperation mit Herstellerfirmen von Ultraschallgeräten sowie Berufsgenossenschaften war deshalb die Beantwortung der Frage, ob und unter welchen Bedingungen eine Zündung durch Ultraschall erfolgen kann.

Auf Grundlage der Anwendungsgebiete von Ultraschall wurden Worst-Case-Szenarien für Ultraschall in gasförmigen Atmosphären und in Flüssigkeiten entwickelt und experimentell untersucht. Im Rah-

men des Forschungsprojektes konnte erstmals gezeigt werden, dass Ultraschall sowohl in explosionsfähigen Atmosphären von Gasen, Dämpfen und Stäuben als auch an der Oberfläche von Ultraschallbädern mit brennbaren Flüssigkeiten zündwirksam werden kann. Kavitation kommt dagegen nicht als wirksame Zündquelle in Betracht. Die Zündung erfordert in den genannten Fällen bestimmte Bedingungen, insbesondere das Vorhandensein eines den Ultraschall absorbierenden Körpers, der die akustische Energie in Wärme umwandelt (s. Bild 7). Vor dem Hintergrund der gewonnenen Erkenntnisse lassen sich nun Maßnahmen formulieren, die den sicheren Betrieb von Ultraschallanlagen in explosionsgefährdeten Bereichen ermöglichen.

Aufgrund der Ergebnisse wird eine Überarbeitung des bestehenden Regelwerkes vorgeschlagen. Insbesondere wird eine Differenzierung des Grenzwertes für Ultraschall bei Einkopplung in gasförmige Medien und in Flüssigkeiten nahegelegt. Im ersten Fall erscheint es zudem zweckmäßig, einen Grenzwert als Schalldruckpegel in Höhe von 170 dB (re. $20 \mu\text{Pa}$) anstelle des bisherigen Intensitätsgrenzwertes einzuführen. Im zweiten Fall lässt sich der Grenzwert weiterhin als Intensität ausdrücken, wobei er örtlich und zeitlich gemittelt spezifiziert wird und sich von 1 mW/mm^2 auf 400 mW/mm^2 anheben lässt. Neben dieser Minderung des Grenzwertes um mehr als zwei Größenordnungen zeigte sich außerdem, dass alle aktuell bekannten Ultraschallanwendungen entweder unkritisch sind oder sich durch einfache Maßnahmen, die meist aus technischen Gründen ohnehin gegeben sind, sicher gestalten lassen.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

DFG fördert Nanobiotechnologie im Fachbereich 3.1

Die Forschung in diesem Bereich ist Teil des neuen Graduiertenkollegs „Metrology for Complex Nanosystems“ der Technischen Universität Braunschweig und der PTB. (B. Güttler, FB 3.1, bernd.guettler@ptb.de)

Fortschritte bei der weiteren Verringerung der Messunsicherheit der molaren Masse des isotopisch angereicherten Siliziums für das Avogadroprojekt

Durch die experimentelle und mathematische Erweiterung des Kalibrierschemas im Rahmen der Bestimmung der Isotopenverhältnisse sowie durch den Umstieg von wässrigen Natriumhydroxid- auf Tetramethylammoniumhydroxid-Lösungen wurde die relative kombinierte Messunsicherheit der molaren Masse weiter abgesenkt. (A. Pramann, O. Rienitz, FB 3.1, axel.pramann@ptb.de, olaf.rienitz@ptb.de)

Massenspektrometrie zur Aufklärung der Wirkungsweise antimikrobieller Peptide

In einem von der PTB koordinierten gemeinsamen Projekt europäischer Metrologieinstitute (EMRP, HLT10, BiOrigin)¹ wurde die Massenspektrometrie erstmals verwendet, um die Wechselwirkung von Peptiden mit Membranmodellen zu charakterisieren. In Verbindung mit komplementären biophysikalischen Methoden der anderen Projektpartner ist dies ein Beitrag zu einer metrologischen Infrastruktur, mit der Struktur-Wirkungs-Beziehungen antimikrobieller Peptide systematisch untersucht werden können. Das Verständnis solcher Zusammenhänge dient der Entwicklung neuer Pharmaka, wie etwa Antibiotika. [¹ http://www.euramet.org/index.php?id=emrp_call_2011] (B. Reisinger, FB 3.1, bernd.reisinger@ptb.de)

Diagnose Wachstumshormonmangel: Zuverlässiger mit Massenspektrometrie?

Wachstumshormonmangel erfordert eine aufwendige und kostenintensive Therapie. Unbehandelte Patienten erleiden eine erhebliche Einschränkung in ihrer Lebensqualität. Dementsprechend ist die Zuverlässigkeit der Messungen hier von besonderer Bedeutung. Mit einem in der PTB ent-

wickelten massenspektrometrischen Verfahren wurden in Zusammenarbeit mit der Kinderklinik der Universität Leipzig anhand von Patientenproben neue diagnostische Grenzwerte für das Hormon bestimmt.¹ Neben verbesserter Zuverlässigkeit verspricht das Verfahren eine selektive Erfassung verschiedener Unterformen (Isoformen) des Hormons, die mit herkömmlichen Methoden nicht sicher unterschieden werden können. [¹ Wagner et al.: Eur J Endocrinol 2014, 171, 389–397] (C. Arsene, FB 3.1, christian.arsene@ptb.de)

Wichtigste Fremdatome in Avogadro-Silizium bestimmt

Mithilfe erweiterter infrarotspektrometrischer Methoden können nun an der PTB sowohl die Konzentrationen der dominanten Verunreinigungen Sauerstoff und Kohlenstoff als auch Stickstoff sowie Elemente der dritten und fünften Hauptgruppe im isotopisch hochreinen „Si28“-Einkristall quantifiziert werden. (S. Zakel, R. Stosch, FB 3.1, rainer.stosch@ptb.de)

Neuer Ansatz zur quantitativen Bestimmung von Hämoglobin in Humanserum

In der PTB wurde im Rahmen des EMRP-Projekts HLT05 „Metrology for metalloproteins“ eine neue, SI-rückführbare Methode zur Bestimmung von Hämoglobin in humanem Blut mittels Isotopenverdünnungs-Ramanspektrometrie entwickelt. Diese ermöglicht eine zuverlässige und rückführbare Quantifizierung in realen Proben. (C. Frank, R. Stosch, FB 3.1, rainer.stosch@ptb.de)

Erster internationaler Ringvergleich zur Raman-Tiefenprofilierung durchgeführt

Die konfokale Ramanspektrometrie ermöglicht die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung einer Probe als Funktion der Eindringtiefe des Anregungslasers. Anwendungsgebiete dieses nicht-invasiven optischen Verfahrens sind z. B. die Untersuchung von Gewebestrukturen bis hin zu einzelnen Zellen. Um die Effekte, die zu einer Verzerrung der Tiefenauflösung führen, besser abschätzen und ggf. korrigieren zu können, wurde im Rahmen des EMRP-Projekts NEW02 „Metrology for Raman Spectroscopy“ unter Federführung der PTB erstmals ein internationaler Ringvergleich (PTB, NPL, INRiM, Inmetro) zur Raman-Tiefenprofilierung durchgeführt. Dazu wurden Referenzproben aus verschie-

denen Raman-aktiven Polymerschichten in der PTB präpariert und ihre Schichtdicken durch topografische Messverfahren auf die SI-Einheit der Länge rückgeführt. (R. Stosch, FB 3.1, rainer.stosch@ptb.de)

Rückführbare und vergleichbare Ergebnisse für die Metallproteine Transferrin und Superoxid-dismutase in Humanproben

Die Isotopenverdünnungsmassenspektrometrie ist eine Methode, die zu vergleichbaren und auf das SI rückführbaren Ergebnissen führt, was besonders in der klinischen Diagnostik von enormer Bedeutung ist. Die dazu erforderlichen isotopenangereicherten intakten Metallproteine Transferrin und Superoxid-dismutase konnten jetzt hergestellt, charakterisiert und eine Referenzmethode für diese Proteine validiert werden. (C. Swart, FB 3.1, claudia.swart@ptb.de)

Neues 1,5-GPa-Transferdrucknormal

Drucknormale von industriellen Kalibrierlaboratorien für Drücke oberhalb von 500 MPa sind meist schwere, fest installierte Messvorrichtungen, die nicht zur PTB geschickt werden können und deshalb vor Ort kalibriert werden müssen. Die Rückführbarkeit solcher Drucknormale kann jetzt mithilfe eines neuen TransferNormals realisiert werden, welches auf Präzisions-Hochdruckaufnehmern unterschiedlicher Bauart basiert und im Rahmen eines europäischen Projektes untersucht wurde. Im Druckbereich bis 1 GPa konnte für die besten Druckaufnehmer des TransferNormals die Stabilität von besser als $3 \cdot 10^{-4}$ relativ nachgewiesen werden, was für die Rückführung von industriellen Referenzdrucknormalen völlig ausreichend ist. (W. Sabuga, FB 3.3, wladimir.sabuga@ptb.de)

Neue Arbeitsgruppe 3.34 Reaktive Strömungen

Reaktive Strömungen, wie sie z. B. bei chemischen Energieumwandlungen, Reaktionen in der Atmosphäre oder der Katalyse auftreten, gehören zu den komplexesten Feldern der analytischen und physikalischen Chemie. Die neugegründete Arbeitsgruppe 3.34 verfolgt das Ziel, Messungen in reaktiven Strömungen auf solide metrologische Grundlagen zu stellen. (A. Lucassen, FB 3.3, arnas.lucassen@ptb.de)

Metrologie für die Bestimmung der Salinität und der Übersäuerung der Ozeane – EMRP-Projekt ENV05 – erfolgreich abgeschlossen

Forschungsaufgabe des 2014 erfolgreich beendeten Projektes ENV05 OCEAN war es, mit zwölf europäischen Partnern für wesentliche ozeanographische

Parameter wie Salinität, Temperatur, Dichte, Leitfähigkeit, pH-Wert, Sauerstoffkonzentration und -zusammensetzung eine metrologische Basis zu schaffen. Hervorzuheben ist hierbei auch die sehr gute Kooperation zwischen den innerhalb der PTB beteiligten Fachbereichen 3.4 *Physikalische Chemie*, 3.3 *Thermophysikalische Größen* und 7.4 *Temperatur*. In interdisziplinärer Zusammenarbeit wurden neue SI-rückgeführte Messverfahren für Salinität, Dichte und Schallgeschwindigkeit bei hohem Druck entwickelt. Die damit erreichte Langzeitvergleichbarkeit von Messergebnissen ist die Voraussetzung für zuverlässige Klimaprognosen. (P. Spitzer, S. Seitz, FB 3.4, petra.spitzer@ptb.de, steffen.seitz@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Beendigung des ASA-Kooperationsprojektes „Partikeldiagnostik“

Ende 2013 wurde erfolgreich das ASA-Projekt abgeschlossen, das auf eine Validierung neuer Streulichtmessverfahren für den Rußnachweis abzielte und für $k < 1,5 \text{ m}^{-1}$ sehr gute Korrelationen mit dem Referenzopazimeter der PTB demonstrierte, was einen wichtigen Schritt für den Einsatz der Streulichtmesstechnik bei der Diesel-AU darstellt. (A. Nowak, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

Entwicklung von Referenzflüssigkeiten und Sensoren zur Charakterisierung der Transporteigenschaften von Schmierstoffen für Tiefbohrungen

In der PTB werden für die Mineralölindustrie im Rahmen des EMRP-Projektes ENG59 NNL Referenzflüssigkeiten mit nicht-newtonschem Verhalten entwickelt. Diese Flüssigkeiten sollen zur Kalibrierung von Rheometern dienen, die zur Prozesskontrolle im Kühl-/Schmier-Kreislauf bei Tiefbohrungen eingesetzt werden. (R. Pagel, FB 3.3, ronald.pagel@ptb.de)

LNG – Energieträger und Versorgungssicherheit

Für eine sichere und umweltschonendere Energieversorgung Europas gilt Liquefied Natural Gas (LNG) als strategisch wichtige Alternative zu Erdgas aus z. B. russischen Quellen. Im Rahmen des EMRP-Projektes LNG II entwickelt der Fachbereich die metrologischen Grundlagen zur Darstellung der Methanzahl (vergl. Oktanzahl für erdölbasierte Kraftstoffe) über kinetische Modelle. Außerdem wird die Rückführbarkeit des berechneten Energieinhalts von LNG untersucht. (A. Lucassen, AG 3.34, arnas.lucassen@ptb.de, J. Rauch, FB 3.3, juergen.rauch@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Erfolgreicher Abschluss des EMRP-Projektes ENV07 MeteoMet „Metrology for pressure, temperature, humidity and airspeed in the atmosphere“

Eins der größten EMRP-Projekte mit 21 beteiligten Instituten und zwei REG's und mit einem Gesamtvolumen von über 440 000 € ist erfolgreich nach 36-monatiger Laufzeit im September 2014 abgeschlossen worden. Die AG 3.21 hatte die Leitung des Workpackage „Upper air measurements: sensors and techniques“, in dem entscheidende neue Ergebnisse für die Messung des Wassergehalts in der Atmosphäre bis auf stratosphärentypische Werte erzielt wurden. (N. Böse, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

Neue EMRP-Projekte ENV58 „MeteoMet2“ und ENG54 „Biogas“ eingeworben und gestartet.

Beim Call 2013 in den Bereichen Environment und Energy hat die PTB mit den AG's 3.21 und 3.22 erhebliche Anteile in den Projekten ENV58 „MeteoMet2“ (Folgeprojekt von ENV07 „MeteoMet“) und ENG54 „Biogas“ eingeworben. Neben der Weiterführung der erfolgreichen Arbeiten in „MeteoMet“ zur Bestimmung von Klimavariablen wird in „ENG54“ das nicht minder aktuelle Thema einer Verbesserung der Feuchte-Messtechnik für Biogas behandelt. (A. Klein, N. Böse, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

Abschluss des EMRP-Projektes MACPoll (ENV01) „Metrology for Chemical Pollutants in Air“

Ende Mai 2014 wurde das EMRP-Projekt MACPoll abgeschlossen. Die AG 3.22 hat für dieses Projekt ein laserspektrometrisches Verfahren entwickelt, das für zukünftige Zertifizierungen von sogenannten „Nullgasen“ von Spezialgasherstellern eingesetzt werden kann, um Verunreinigungen durch CO₂ und H₂O zu quantifizieren. Es ist dabei so flexibel, dass es auch auf andere Verunreinigungen ausgedehnt werden kann. Das Messverfahren und die Messung notwendiger molekularer Spektralparameter wurden publiziert und in zahlreichen Konferenzen vorgestellt. (O. Werhahn, A. Pogány, V. Ebert, FB 3.2, olav.werhahn@ptb.de)

Metrologie für die Umwelt – Start neuer EMRP-Projekte mit Beträgen von AG 3.22

Die AG 3.22 hat 2014 die Arbeit an vier neuen EMRP-Projekten aus dem Umwelt-Call (<http://www.emrponline.eu>) aufgenommen. In dieser hohen Erfolgsquote der EMRP-Drittmittelanträge spie-

gelt sich auch die erfolgreiche Zusammenarbeit der letzten Jahre mit europäischen Partnern im Bereich der Metrologie für die Umwelt wider, an der die AG 3.22 beteiligt war. Das zentrale Element dieser Beteiligungen von AG 3.22 ist dabei immer die Anwendung von IR-spektroskopischen Methoden zur Gasanalytik. (O. Werhahn, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

Internationaler Workshop zur Rückführung von molekularen Spektralparametern

Als Koordinator des im November 2014 abgeschlossenen EMRP-Projektes „EUMETRISPEC“ (ENV06) organisierte die AG 3.22 im Oktober einen internationalen Workshop über molekulare Spektralparameter, zu dem mehr als 50 externe Spektroskopieexperten Vorträge, Poster und Fachgespräche beisteuerten. Die AG 3.22 hat maßgeblich an der Durchführung des EMRP-Projektes „EUMETRISPEC“ gearbeitet und dabei eine Infrastruktur an der PTB aufgebaut, die zukünftig eine Messung rückgeführter Spektralparameter mit Messunsicherheiten deutlich unterhalb 1 % erlauben soll. (O. Werhahn, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

Erfolgreicher Abschluss des EMRP-Projektes ENV02 „PartEmission“

Mitte Mai 2014 konnte erfolgreich das EMRP Projekt ENV02 abgeschlossen werden, das sich insbesondere mit der Rückführung der für die Messung der Partikelanzahl nach Euro 5b und Euro 6 eingesetzten Kondensationspartikelzähler (CPC) befasst. Hierfür wurden erfolgreich Ruß- und Silberpartikel eingesetzt und u. a. zwei EURAMET-Aerosol-Vergleiche für Elektrometer (EURAMET 1244, publiziert Juni 2014) sowie für CPC-Kondensationspartikelzähler (EURAMET 1282, review Juli 2014) durchgeführt. (A. Nowak, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

Ulrich Johannsmeyer mit dem IEC 1906 Award ausgezeichnet

Die internationale Normungsorganisation IEC (International Electrotechnical Commission) hat Dr. Ulrich Johannsmeyer für seine herausragenden Leitungstätigkeiten in der internationalen Normung und sein Expertenwissen in unterschiedlichen Arbeitsgruppen mit dem IEC 1906 Award 2014 ausgezeichnet. Dr. Johannsmeyer war u. a. mehr als 10 Jahre als Chairman des IEC SC 31G Subcommittees „Intrinsically Safe Apparatus“ tätig. (U. Johannsmeyer, FB 3.6, ulrich.johannsmeyer@ptb.de)

Referenz-Mess- und Prüfplatz für die Beurteilung der Zündfähigkeit explosionsfähiger Gemische durch optische Strahlung

Bei der Bewertung der Zündgefahren durch optische Strahlung im Explosionsschutz ist die Messung der optischen Leistung und Bestrahlungsstärke unterschiedlicher Strahlungsquellen mittels optischer Messaufnehmer (Halbleitersensoren oder thermophile Aufnehmer) eine sehr wichtige Aufgabe. Da die Investition eines derartigen Messplatzes für kleinere Prüfinstitute im Explosionsschutz nicht wirtschaftlich ist, hat die PTB Abkommen mit mehreren Prüfinstituten abgeschlossen, um derartige Messungen und Prüfungen zu übernehmen. Die Einrichtungen der PTB wurden kürzlich modernisiert und sind auf dem aktuellen Stand. (M. Graube, FB 3.6, mario.graube@ptb.de)

Kooperation bei Explosionsschutzmaßnahmen an Brennstoffzellen zur unabhängigen Stromversorgung im Behördenfunk mit der Technischen Hochschule Wildau

Gemeinsam mit dem Kooperationspartner TH Wildau wurden wissenschaftliche Untersuchungen im Rahmen des „Nationalen Investitionsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ (NIP) der Bundesregierung an unabhängigen Stromversorgungssystemen für den Behördenfunk durchgeführt. Die PTB hat drei von verschiedenen Anbietern im Land Brandenburg errichtete Musteranlagen sicherheitstechnisch bewertet und Verbesserungsvorschläge hinsichtlich des Explosionsschutzes erarbeitet. Die Anlagen dienen zur Sicherstellung des Behördenfunks für Sicherheitsaufgaben auch in Ausnahmesituationen. (T. Horn, FB 3.6, thomas.horn@ptb.de)

Vermeidung von Explosionen bei der Reparatur von Gas-Rohrleitungen

Zum vorübergehenden Absperren von Gasleitungen bei Reparaturen und Neuanschlüssen werden in der Regel Absperrblasen eingesetzt. Es wurde beobachtet, dass beim Rutschen einer solchen Blase in einer Gasleitung aus Kunststoff zündwirksame elektrostatische Entladungen auftreten. Im Rahmen eines BG-EITEM/PTB-Forschungsprojektes wurden die Beobachtungen experimentell verifiziert und Schutzmaßnahmen für ein sicheres Arbeiten entwickelt und eingeführt. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)

Explosionsfähigkeit organisch lösemittelfreier UV-Lacke in feinversprühtem Zustand

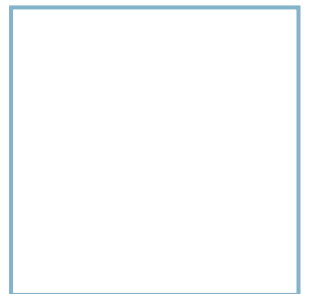
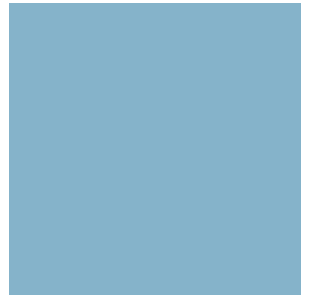
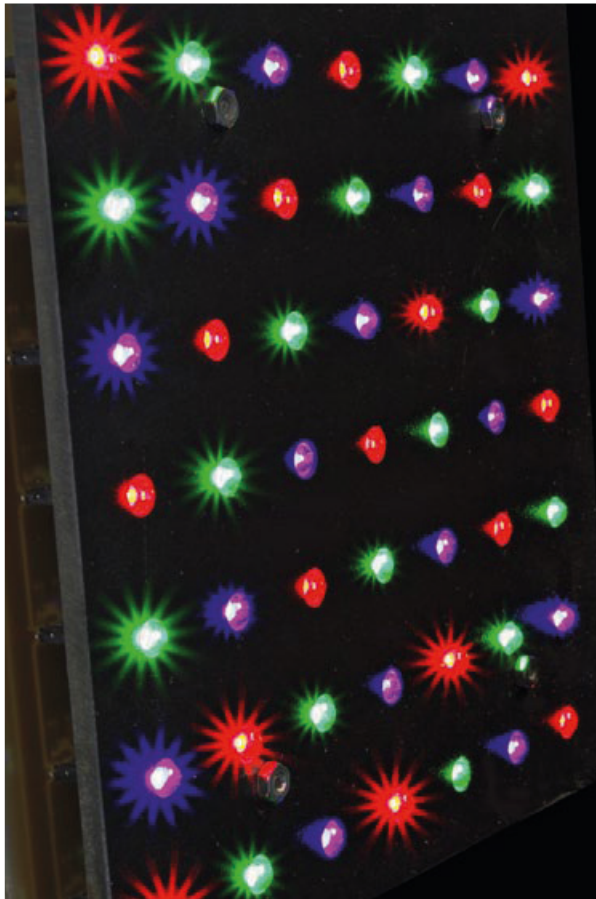
Untersucht wurde die Entzündbarkeit von Spritznebeln nicht-brennbarer UV-Lacke und deren Korrelation bezüglich der PTB-Formel zur Berechnung der Entzündbarkeit von Wasserlacken. (D. Möckel, FB 3.7, dieter.moeckel@ptb.de)

Abschluss des Forschungsvorhabens zu normativen Anforderungen der sicherheitsgerechten Konstruktion explosionsgeschützter mechanischer Geräte (NAMEX)

Im NAMEX-Forschungsvorhaben wurden die bei metallischer Reibung auftretenden Zündquellen „heiße Oberfläche“ und „mechanische Funken“ neu bewertet. Dazu wurden Untersuchungen zur Zündquellenentstehung und zur Zündwirksamkeit in ausgewählten Gas- und Dampf-Luft-Gemischen durchgeführt. Weiterführend wurden die in der Modellanordnung gewonnenen Erkenntnisse auf reale Anordnungen übertragen und daraus ein Bewertungsschema entwickelt. Das Forschungsvorhaben konnte damit erfolgreich abgeschlossen werden. (L. Meyer, FB 3.7, lennart.meyer@ptb.de)

Abteilung 4

Optik



Die Abteilung *Optik* sorgt im Rahmen des Auftrags der PTB vordringlich für die Einheitlichkeit, Verlässlichkeit und den Fortschritt im optischen Messwesen. Dabei realisiert sie die optischen Einheiten und gibt sie mit angemessenen Unsicherheiten weiter, wie die Candela als Basiseinheit der Lichtstärke und die davon abgeleiteten Einheiten sowie die Sekunde und den Meter. Die Abteilung *Optik* bearbeitet aber auch Bereiche, in denen schon jetzt oder zukünftig vordringlich optische Methoden ausgenutzt werden. Dazu gehören metrologische Forschungs-, Entwicklungs- und Dienstleistungsaufgaben in den Themenbereichen *Länge und dimensionelle Metrologie, Radiometrie und Photometrie* sowie *Zeit und Frequenz*. Die Abteilung bearbeitet diese Themenbereiche in den vier Fachbereichen *Photometrie und angewandte Radiometrie, Bild- und Wellenoptik, Längeneinheit und Quantenoptik* sowie *Zeit und Frequenz*. In der metrologischen Vorlaufsforschung kooperiert die Abteilung *Optik* mit Metrologieinstituten weltweit, aber besonders eng auch mit der Leibniz Universität Hannover (LUH) und der Technischen Universität Braunschweig (TU-BS). Aus der Kooperation mit der LUH ist im Rahmen des Exzellenzclusters *Center for Quantum Engineering and Space-Time Research (QUEST)* das *QUEST-Institut an der PTB* hervorgegangen. Die Zusammenarbeit der PTB mit der TU-BS im Rahmen der Metrologie-Initiative Braunschweig hat zum jüngst genehmigten *Laboratory for Emerging Nanometrology (LENA)* geführt. Wichtige Ergebnisse und besondere Entwicklungen des vergangenen Jahres in den vier Fachbereichen der Abteilung *Optik* und dem *QUEST-Institut an der PTB* werden im Folgenden vorgestellt.

Radiometrie und Photometrie

Der Themenbereich *Radiometrie und Photometrie* wird in der PTB in den beiden Abteilungen *Optik* und *Temperatur und Synchrotronstrahlung* bearbeitet. In der Abteilung *Optik* teilen sich die Fachbereiche *Photometrie und angewandte Radiometrie* und *Bild- und Wellenoptik* die Aufgabe. Eine wichtige Herausforderung an die heutige Metrologie in diesem Bereich ergibt sich z. B. aus der quantitativen Bestimmung des anthropogenen Anteils des Klimawandels. Insbesondere der von der Sonne kommende UV-Anteil der Bestrahlungsstärke an der Erdoberfläche müsste mit einer relativen Unsi-

cherheit von besser als 2 % über Jahrzehnte bekannt sein. Um dieses Ziel zu erreichen, haben sich im Rahmen des jetzt abgeschlossenen Projektes ENV03 im Europäischen Metrologie-Forschungsprogramm (EMRP) mehrere Nationale Metrologie-Institute (NMI) zusammengeschlossen, um die Rückführung der weltweiten Messungen auf das Internationale Einheitensystem (SI) mit kleineren Unsicherheiten zu erreichen sowie zuverlässigere Messungen in den einzelnen Messstationen sicherzustellen. Dazu hat die PTB Charakterisierungs- und Korrekturmethode für spektral aufgelöstes Streulicht und Nichtlinearitäten in Array-Spektrometern entwickelt, die als kompakte Messgeräte in einer Feldkampagne eingesetzt wurden (s. Bild 1).

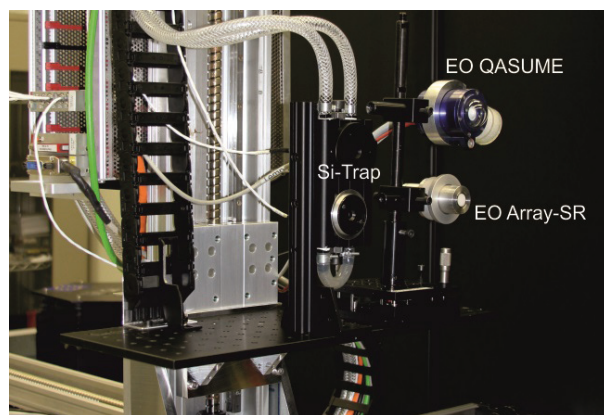


Bild 1: Verschiedene Detektoren werden am Photometrie-Messplatz mit durchstimmbaren Lasern charakterisiert und kalibriert: Si-Trap: Silizium-Trap-Detektor; EO Array-SR: Fasergekoppelte Eingangsoptik zum Array-Spektrometer; EO QASUME: Eingangsoptik des mobilen Referenzspektrometersystem für die Quality Assurance of Spectral UV Measurements in Europe

Die optische Informationsübertragung ist das technische Rückgrat unserer Informationsgesellschaft, in der der sicheren Weitergabe von Daten eine ganz besondere Bedeutung zukommt. Absolute Sicherheit ist prinzipiell durch die Quantenkryptografie, d. h. die Anwendung quantenmechanischer Prinzipien, möglich. Dabei liegt der Schutz einer quantenkryptografisch chiffrierten Nachricht nicht in der Abhörsicherheit, sondern darin, dass ein nichtautorisierter Mithörer unweigerlich entdeckt würde und damit die Schlüsselübertragung beendet werden kann. Es gibt kommerziell erhältliche Hardware, um quantenkryptografische Nachrichten mittels Photonen über Fasern oder im Freistrahl zu versenden. Dabei kommen derzeit hauptsächlich stark abgeschwächte gepulste Laser zum Einsatz, da mehr als ein Photon pro Laserimpuls das Abhören erlauben würde. Ideale Transmitter wären effiziente Einzelphotonenquellen. Diese werden im Rahmen eines EMRP-Projektes in Zusammen-

Titelbild:

Leuchtdioden werden bis zu tausend Stunden gealtert, bevor sie zur Herstellung eines Transferrnormals genutzt werden.

arbeit mit ausgewiesenen Universitätsinstituten und Forschungseinrichtungen entwickelt und an der PTB charakterisiert. Die PTB untersucht daher Einzelphotonen- und photonenzahlauflösende Detektoren für diese Zwecke. Im Berichtszeitraum wurden Detektoren im infraroten Spektralbereich untersucht, da hier durch die Telekommunikation die Entwicklung der Komponenten am weitesten gediehen ist. Im Rahmen des europäischen EMRP-Forschungsprojekts *Metrology for the Industrial Quantum Communications* wurde die Detektionseffizienz eines neuartigen Detektorbaumes aus vier InGaAs-Detektoren bestimmt. Mit ihm kann jetzt die mittlere Photonenzahl pro emittiertem Laserimpuls mit einer Unsicherheit von unter 2,5 % gemessen werden, die den derzeitigen Anforderungen an Quantenkryptografie-Systeme Rechnung trägt. Die Anordnung ermöglicht ebenfalls die Rekonstruktion der Photonenzahlverteilung (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Die satellitengestützte Fernerkundung ist eines der wichtigsten Standbeine für die Erdwissenschaften. Damit sie verlässliche Eingangsdaten z. B. für Klimamodelle liefern kann, ist auch hier die metrologische Rückführung auf das SI erforderlich. Zur regelmäßigen Kalibrierung der Sensoren während der Satellitenmission werden stabile Reflexions- und Transmissionsstandards als Referenzen benötigt. Neuentwickelte Transmissionsmaterialien versprechen mit einer reduzierten Abhängigkeit von Polarisierung und Kohärenz des Lichtes kleinere Unsicherheiten. Die PTB hat daher an ihrem Gonioreflektometermessplatz erste Messungen der bidirektionalen Transmissionsverteilungsfunktion (BTDF) durchgeführt. An speziellen Quarzglasproben, die als optische Streuzentren homogen verteilte Gasbläschen mit Durchmessern im μm -Bereich enthalten, konnte ein verbessertes Lambert'sches Verhalten nachgewiesen werden, was die Erwartungen in die neuen Materialien rechtfertigt.

Länge und dimensionelle Metrologie

Im Themenbereich *Länge und dimensionelle Metrologie* teilt sich die Abteilung *Optik* die Aufgaben mit der Abteilung *Fertigungsmesstechnik*. Im Fachbereich *Längeneinheit und Quantenoptik* werden beispielsweise Längenmessungen für und mit Röntgenstrahlen durchgeführt und die damit assoziierte Technologie weiterentwickelt. Dazu gehört beispielsweise die Entwicklung neuer Methoden zum Polieren von Einkristallen aus Silizium und Saphir, bei denen die polierten Oberflächen möglichst parallel zu den einzelnen Atomlagen liegen. Ebenso

müssen für die Bestimmung der Avogadro-Konstanten auf dem Weg zum neuen Internationalen Einheitensystem (SI) Röntgeninterferometer hergestellt werden, bei denen zwei Teile eines Interferometerkristalls mechanisch über einige Millimeter so verschoben werden können, dass die Positionen der Kristallebenen immer noch mit atomarer Genauigkeit übereinstimmen (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Im Fachbereich *Bild und Wellenoptik* werden optische und elektronenoptische Methoden entwickelt und angewendet, die von der Charakterisierung ausgehender optischer Komponenten bis zu dimensionellen Messungen in der Nanotechnologie reichen. Eine dauerhafte Herausforderung ist die optische Auflösung von Strukturen, die deutlich kleiner sind als die Wellenlänge des verwendeten Lichts. Praktische Lösungen zu dieser Herausforderung in chemisch-biologischen Anwendungen wurden durch den Nobelpreis für Chemie 2014 honoriert. In der PTB wurde jetzt ein Verfahren entwickelt, bei dem durch Kombination verschiedener Messkonfigurationen auch Gitterstrukturen charakterisiert werden können, deren Strukturbreiten eine Größenordnung kleiner sind als die zur Beleuchtung benutzte Wellenlänge. Gitterstrukturen mit Breiten von 50 nm und 25 nm, die vom Helmholtzzentrum Berlin hergestellt und elektronenoptisch charakterisiert wurden, wurden im Scatterometer der PTB sowohl parallel als auch senkrecht zu den Gitterlinien mit jeweils senkrecht und parallel polarisiertem Licht der Wellenlänge 266 nm beleuchtet. Das in nullter Ordnung reflektierte Strahlungsfeld wird mit einem berechneten Strukturmodell verglichen, das auf einem trapezförmigen Grundkörper, Kantenabrundungen und einer das Silizium umgebenden Oxidschicht basiert. Das neue Verfahren gibt ausgezeich-

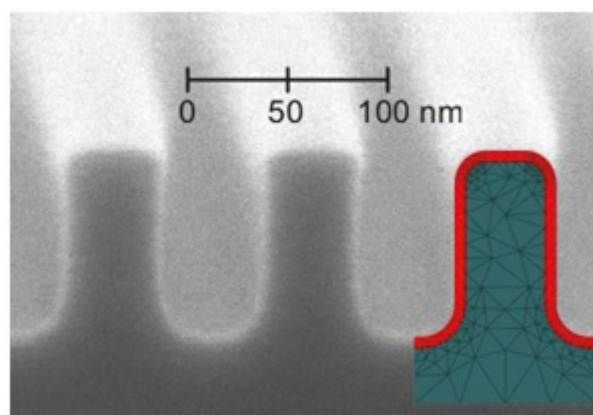


Bild 2: Elektronenoptische Aufnahme einer Siliziumgitterstruktur im Vergleich mit der aus scatterometrischen Messungen ermittelten Rekonstruktion

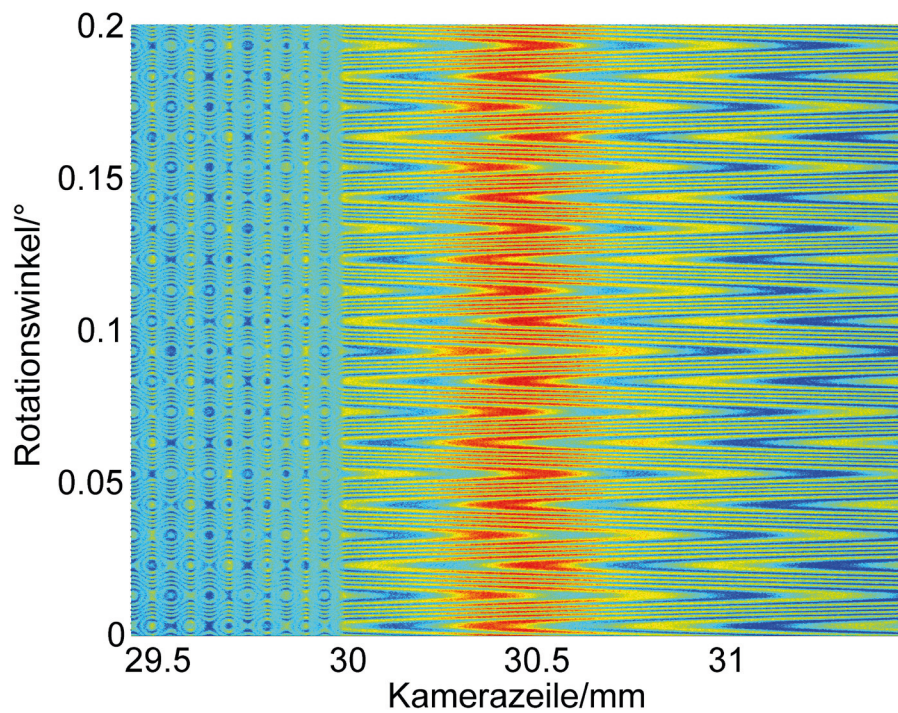


Bild 3: Interferogramm einer Testoberfläche, bestehend aus einer diamantgedrehten sinusförmig modulierten Oberfläche mit einer Periode von 100 µm und einer Amplitude von ca. 250 nm (links) und einer ebenen Fläche (rechts). Während der Probenbewegung (im Bild in senkrechter Richtung) schwingt der Referenzspiegel bei dem hier verwendeten Messgerät (410 Hz, Amplitude ca. 1 µm) und das Interferogramm wird mit einer Zeilenkamera (waagrecht) aufgenommen.

nete Übereinstimmung mit der elektronenoptisch gemessenen Struktur.

Die neuen Möglichkeiten, asphärische optische Komponenten zu berechnen und herzustellen, sind äußerst herausfordernd für die verfügbare optische Messtechnik. Zur besseren Charakterisierung der Messgeräte entwickelt die PTB Normale, die sich von typischen Asphären unterscheiden und bei denen gewisse Formanteile so genau bekannt sind, dass sich damit wichtige Eigenschaften der Messgeräte einzeln bestimmen lassen. Auf einer sphärischen Basisfunktion werden zusätzliche Formanteile aufgebracht, wie z. B. unterschiedliche Kugelradien. Die Normale können rotationssymmetrisch sein oder auch nicht-rotationssymmetrische Anteile besitzen und dadurch zu Freiformflächen werden (s. Nachrichten aus der Abteilung). Unterschiedliche Testflächen werden im wissenschaftlichen Gerätebau der PTB hergestellt und in der Abteilung *Optik* interferometrisch charakterisiert (s. Bild 3).

Zeit und Frequenz

Bekanntlich ist die Basiseinheit der Zeit im SI, die Sekunde, durch eine definierte Anzahl von Schwingungen eines Hyperfeinstrukturübergangs im Cesiumatom 133 festgelegt. Die darauf basierende beste Cesiumfontänenuhr der PTB hat eine abgeschätzte relative Unsicherheit von wenigen 10^{-16} . Optische Atomuhren, bei denen statt eines Mikrowellenoszillators frequenzstabilisierte Laser dazu benutzt werden, einen geeigneten Übergang in einem Ion oder in einem Atomensemble abzufragen, können

prinzipiell sehr viel kleinere Unsicherheiten als die besten Caesiumatomuhren erreichen. Die PTB erforscht daher die erfolgversprechendsten Ansätze für optische Atomuhren, die später einmal zu einer neuen Definition der Basiseinheit Sekunde führen sollen. Gleichzeitig entwickelt sie – oft in Kooperationen – die erforderlichen neuen Technologien, um z. B. die komplexen experimentellen Apparaturen alltagstauglich zu machen (s. Bild 4 und Nachrichten aus der Abteilung).

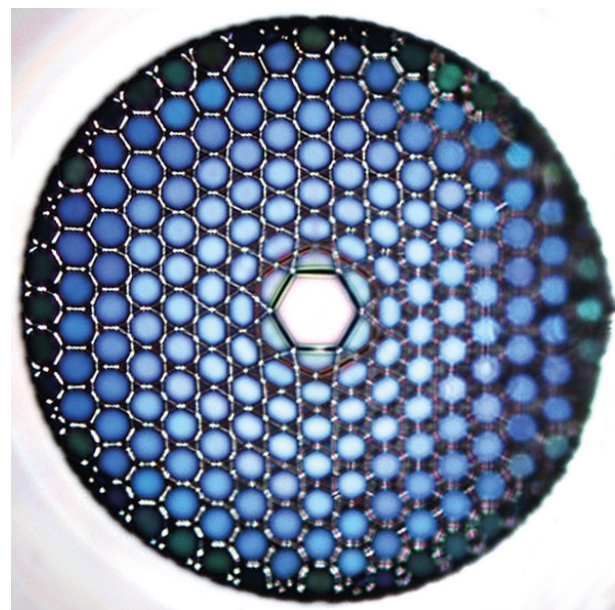


Bild 4: Elektronenoptische Aufnahme einer neuen Hohlkernfaser, die für die langzeitlich stabile Übertragung von UV-Strahlung bei 280 nm benötigt wird. Die mikrostrukturierte photonische Kristallfaser wurde in einer Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts (MPL) in Erlangen hergestellt und untersucht. (Abb. MPL)

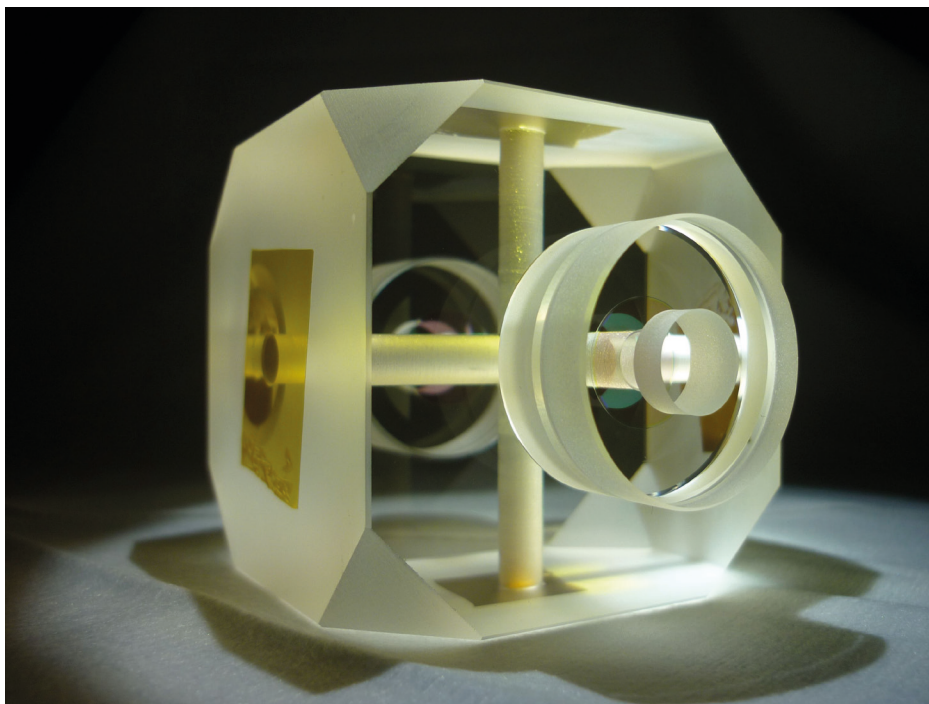


Bild 5: Kompakter optischer Resonator mit 5 cm Kantenlänge für Frequenznormale im rauen industriellen Umfeld. Das spezielle, am NPL entwickelte und patentierte Design des Resonators mit der Halterung an vier Würfecken und den temperaturkompensierten, optisch kontaktierten Spiegeln (patentiert durch PTB) erlaubt einen Betrieb, bei dem der Abstand zwischen den Spiegeln (und damit die Frequenz) in hohem Maße unabhängig von Erschütterungen und Temperaturschwankungen wird.

In einen gemeinsamen EMRP-Projekt zwischen dem britischen metrologischen Staatsinstitut NPL, dem italienischen Staatsinstitut INRIM und der PTB wurde ein kompakter, robuster, resonatorstabilisierter Laser für optische Frequenznormale entwickelt, bei dem die Frequenz eines fasergekoppelten Diodenlasers bei einer Wellenlänge von $1,54 \mu\text{m}$ auf eine geeignete Eigenfrequenz eines Resonators (s. Bild 5) stabilisiert wird. Die relative Frequenzinstabilität lag dabei für Mittelungszeiten zwischen 0,3 s und 30 s unter $5 \cdot 10^{-15}$. Damit werden hochpräzise Messungen auch in einem industriellen Umfeld möglich.

In allen Atomuhren wird die Frequenz des Uhrenübergangs durch die Temperaturstrahlung der Umgebung etwas verschoben. Daher kommt der Bestimmung und Korrektur dieses Effektes abhängig von der benutzten Atom- oder Ionensorte hohe Bedeutung zu. In der PTB wurde daher dieser Einfluss auf den Oktupolübergang der Yb^+ -Einzelionenuhr untersucht. Nach dieser Untersuchung kann jetzt der bisher dominierende Effekt soweit reduziert werden, dass für die Yb^+ -Einzelionenuhr eine relative Messunsicherheit von $3,3 \cdot 10^{-18}$ abgeschätzt werden kann, was gegenwärtig der kleinsten Messunsicherheit für alle optischen Uhren entspricht. Zur Erreichung der kleinen Messunsicherheit ist allerdings auch die genaue Kenntnis der Temperaturumgebung der gespeicherten Ionen erforderlich. Messungen und Simulationen der Temperaturverteilung wurden sowohl für die Radiofrequenzfalle der Yb^+ -Uhr als auch für eine neuentwickelte Multi-Ionenfalle (s. Bild 6) im Rahmen eines EMRP-Projektes am na-

tionalen tschechischen Metrologie Institut (CMI) durchgeführt. Im *QUEST-Institut an der PTB* wurde eine neue Art der Laserkühlung entwickelt, mit der die Bewegung der Al^+ -Ionen in der Ionenfalle so weit reduziert werden kann, dass auch Verschiebungen durch die relativistische Zeitdilatation in die Größenordnung unter 10^{-18} kommen können (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Mit der erreichten hohen Genauigkeit und zeitlichen Stabilität der unterschiedlichen Atomuhren besteht die Möglichkeit, zu grundlegenden Fragenstellungen der modernen Physik beizutragen. Die meisten theoretischen Vorschläge für eine vereinheitlichte The-

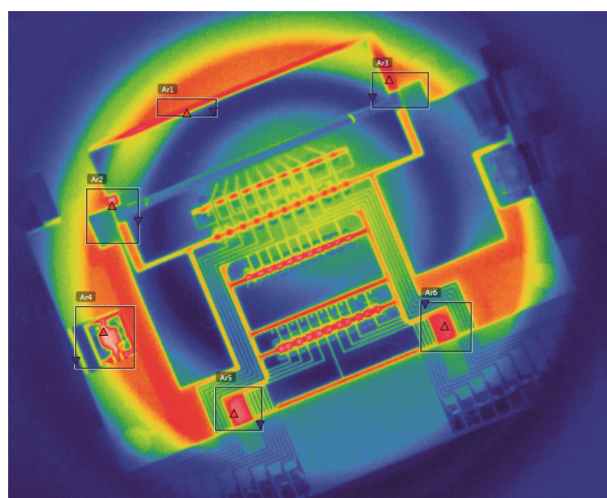
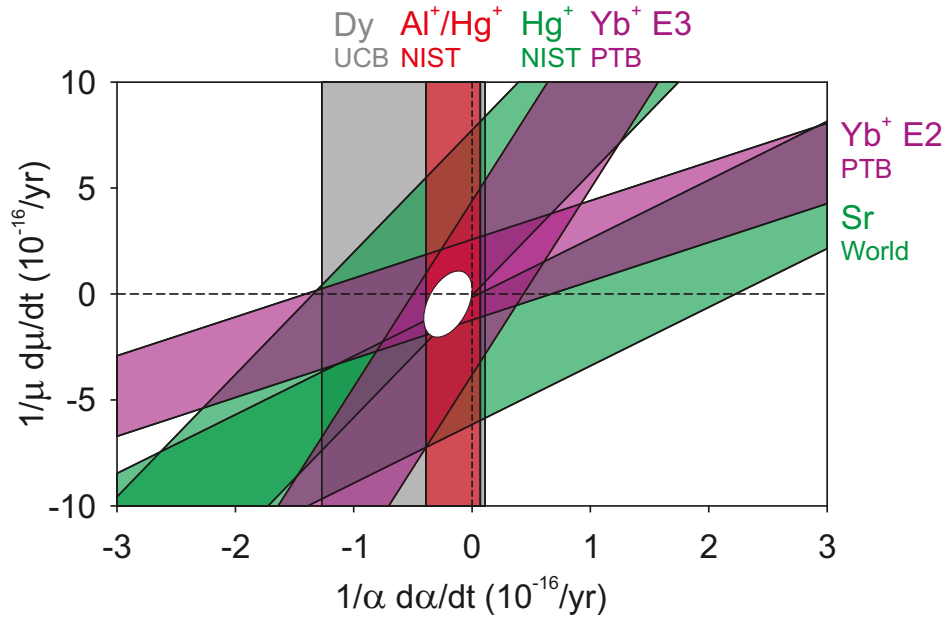


Bild 6: Falschfarbendarstellung der mit einer kalibrierten Infrarotkamera bestimmten Temperaturverteilung einer neuen skalierbaren Chipfalle für Multi-Ionen-Uhren, die in Zusammenarbeit mit dem wissenschaftlichen Gerätebau der PTB entwickelt wurde

Bild 7: Der Vergleich der Frequenzverhältnisse unterschiedlicher Uhren liefert eine obere Grenze (Ellipse) für die zeitliche Änderung des Massenverhältnis von Proton und Elektron m_p/m_e und die Feinstrukturkonstante α . Benutzt wurden das Weltmittel aller Strontium-Gitteruhren (Sr world), die Al⁺- und Hg⁺-Ionenuhren des NIST, die Yb⁺-Uhren der PTB mit dem Oktupol- (E3) und Quadrupolübergang (E2) und ein Übergang im Dy an der University of California, Berkeley (UCB).



orie, die neben dem Standardmodell der Elementarteilchen mit der schwachen, elektromagnetischen und starken Wechselwirkung auch die Gravitationswechselwirkung einschließt, sagen eine zeitliche Änderung verschiedener Kombinationen von Naturkonstanten voraus. Insbesondere etwaige Driften der dimensionslosen Feinstrukturkonstanten α oder des Massenverhältnisses zwischen Proton und Elektron m_p/m_e können prinzipiell durch genaue Messungen des Frequenzverhältnisses verschiedener Uhren entdeckt werden. Mit jüngsten Messungen in der PTB und Vergleichen mit anderen Uhren konnte jetzt gezeigt werden, dass eine etwaige Änderung von $\mu = m_p/m_e$ (und von α) nicht größer als etwa 10^{-16} pro Jahr (bzw. wenige 10^{-17} pro Jahr) sein kann (s. Nachrichten des Jahres und Bild 7).

Mit der Entwicklung immer besserer Atomuhren muss auch die Genauigkeit, mit der diese weltweit

verteilten Uhren z. B. im Rahmen der Erstellung der koordinierten Weltzeitskala miteinander verglichen werden können, verbessert werden. Im Berichtszeitraum wurden mit der Methode der Zweiweg-Satelliten-Zeit- und Frequenzübertragung internationale Zeitvergleiche durchgeführt, die Unsicherheiten im Sub-Nanosekunden-Bereich nachwiesen und auch die Weitergabe optischer Frequenzen über transkontinentale Entfernungen erlaubten (s. Nachrichten aus der Abteilung). Ein aufstrebendes Forschungs- und Entwicklungsfeld ist die Weitergabe optischer Frequenzen über das Glasfasernetz der optischen Telekommunikation. Die PTB leitet dazu ein EMRP-Projekt (NEAT-FT), an dem sich neun europäische Partner beteiligen (s. Bild 8), dem von unabhängigen Gutachtern in der eben erfolgten Zwischenevaluation eine ausgezeichnete technologische Position und höchste Bedeutung bescheinigt wurde.



Bild 8: Teilnehmer am Arbeitstreffen des internationalen Projektes NEAT-FT in Paris

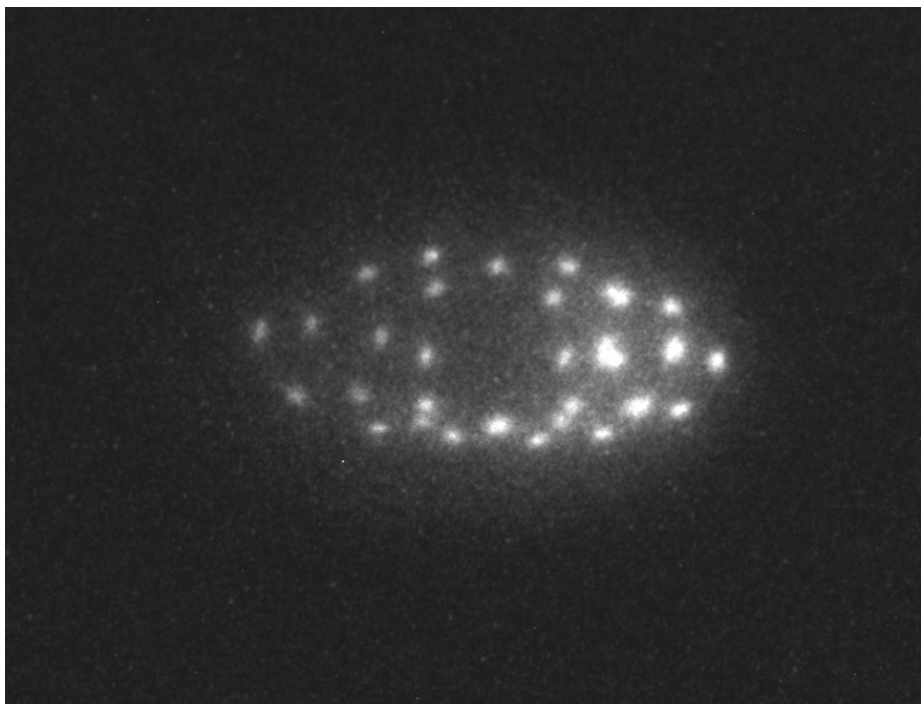


Bild 9: Kühlung eines dreizehnfach geladenen Argon-Ions in einer Paul-falle (dunkel) im Zentrum der kühlenden Beryllium-Ionen

Zwischen dem SYRTE in Paris und der PTB in Braunschweig ist gegenwärtig eine optische Langstreckenfaserverbindung im Aufbau. Damit wird es zukünftig möglich, die höchstpräzisen optischen Uhren der beiden Staatsinstitute direkt zu vergleichen. Jüngst wurde das letzte Teilstück der Glasfaser zwischen Braunschweig und der Übergabestelle in Straßburg verbunden und erstmalig Licht von der PTB in Braunschweig über Straßburg wieder in der PTB detektiert. Für diese Strecke wurden erstmals weitgehend autonome Brillouin-Verstärker – eine Eigenentwicklung der PTB – eingesetzt, bei der die Faser selbst als Verstärkungsmedium dient. Die Gesamtstrecke wird jetzt metrologisch charakterisiert. Für die Nutzung der höchststabilen Frequenzen an Zwischenabzweigen wurde inzwischen ein Verfahren patentiert (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Im *QUEST-Institut an der PTB* wird in einer Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Kernphysik (Heidelberg) eine Apparatur entwickelt, in der hochgeladene Ionen gespeichert und indirekt lasergekühlt werden können. Hochgeladene Ionen besitzen Übergänge, die sich besonders gut für optische Uhren, Tests der Quantenelektrodynamik und einer möglichen Änderung von Naturkonstanten eignen. Es ist jetzt gelungen, ein dreizehnfach geladenes Argon-Ion mithilfe von Beryllium-Ionen in den Millikelvinbereich abzukühlen (s. Bild 9)

Die Stellung der PTB im Bereich Zeit und Frequenz wird weltweit gewürdigt, wie beispielsweise aus der Verleihung der I. I. Rabi Awards 2014 des Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) an Dr.

Harald Telle ersichtlich ist (s. Bild 10). Er erhielt den Preis „*for most significant contributions to high precision frequency control and measurements, in particular to optical frequency chains, the invention of the phase-coherent optical frequency interval division technique and early groundwork and demonstration of optical frequency combs and their use for frequency synthesis*“ und ist nach 2003 und 2011 schon der dritte Preisträger aus der PTB für diese prestigeträchtige Auszeichnung.



Bild 10: Übergabe des I. I. Rabi Awards an Dr. Harald Telle

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Internationale Zeitvergleiche mit Sub-Nanosekunden Unsicherheit

Im Jahr 2014 wurde in mehreren Messkampagnen die Grundlage dafür gelegt, dass internationale Zeitvergleiche zwischen Zeitinstituten in Europa und auch weltweit mit Unsicherheiten unter oder nahe einer Nanosekunde durchgeführt werden können. Diese sind Voraussetzung für die Realisierung der Koordinierten Weltzeit durch das Internationale Büro für Maß und Gewicht BIPM und auch für die Realisierung der Systemzeit des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo. (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

Strontium-Gitteruhren der PTB und des japanischen NICT verglichen

Optische Frequenznormale werden als zukünftige Nachfolger der Caesium-Atomuhren diskutiert. Ein u. a. in der PTB und dem japanischen Institute of Information and Communications Technology (NICT) verfolgter Ansatz sind Strontium-Gitteruhren, in denen Laser auf einen atomaren Strontium-Übergang stabilisiert werden. Die Frequenz dieser Laser wurde durch Zweiweg-Frequenzvergleiche über Satellit unter Ausnutzung der Trägerphase verglichen. Beide optische Uhren stimmen im Rahmen der Gesamtunsicherheit von $1,6 \cdot 10^{-15}$ überein. Gleichzeitig gab die PTB-Gitteruhr ihre bekannte Frequenz an das NICT weiter und ermöglichte es, die Frequenz der NICT-Gitteruhr jetzt deutlich genauer anzugeben. (Ch. Lisdat FB 4.3, christian.lisdat@ptb.de)

Frequenzverteilung an viele Orte

Interferometrisch stabilisierte Glasfaserverbindungen erlauben eine hochpräzise Frequenzübertragung mit einer relativen Unsicherheit unter 10^{-18} . Ein neues, inzwischen patentiertes Verfahren ermöglicht es nun, an zusätzlichen Orten entlang der bestehenden Verbindung ebenfalls ein hochpräzises Frequenz- (oder Zeit-) signal zur Verfügung zu stellen. Das Verfahren wird bereits international eingesetzt und weiterentwickelt. (G. Grosche, FB 4.3, gesine.grosche@ptb.de)

Erfolgreiche Zwischenevaluation für das EMRP-Projekt SIB-02 NEAT-FT

Ziel des 2012 begonnenen internationalen Projektes NEAT-FT ist die Entwicklung von Methoden und Geräten für Frequenz- und Zeitvergleiche mit Hilfe optischer Glasfaserverbindungen. Zur Halbzeit wurde diesem Projekt, an dem sich neun europäische Partner unter Führung der PTB beteiligen, von unabhängigen Gutachtern eine ausgezeichnete technologische Position und höchste Bedeutung bescheinigt. (H. Schnatz, FB 4.3, harald.hchnatz@ptb.de)

Neuartige Verstärker für die Faser Verbindung Braunschweig-Paris

Für die schnelle Realisierung des mehr als 700 km langen deutschen Teils der metrologischen Glasfaserverbindung Braunschweig-Paris wurden erstmals weitgehend autonome Brillouin-Verstärker eingesetzt. In dieser Eigenentwicklung der PTB wird die Faser selbst als Verstärkungsmedium genutzt. Die Richtungsabhängigkeit und die extreme Schmalbandigkeit der Verstärkung erlaubt eine um drei Größenordnungen höhere Verstärkung als bei den bisher gebräuchlichen Erbium-dotierten Faserverstärkern. (S. M. F. Raupach, FB 4.3, sebastian.raupach@ptb.de)

Kryogener optischer Siliziumresonator zeigt geringste Frequenzdrift

Die Stabilität der Eigenfrequenz eines Siliziumresonators wurde bei 124 K über einen längeren Zeitraum untersucht. Mit einer mittleren Drift von $2 \cdot 10^{-11}$ pro Jahr zeigt der optische Resonator eine der geringsten bisher gemessenen alterungsbedingten Frequenzdriften. (Th. Legero, FB 4.3, thomas.legero@ptb.de)

Präzise Bestimmung der Wechselwirkung zwischen ultrakalten Calciumatomen

Sehr genaue Potenziale für die Wechselwirkung zwischen Calciumatomen im Grundzustand 1S_0 und im angeregten metastabilen Zustand 3P_1 bei großen Abständen konnten durch Photoassoziations-Spektroskopie mit kHz-Genauigkeit bestimmt werden. Mit dieser Analyse sind jetzt genauere Vorhersagen zur möglichen Manipulation der Streueigenschaften der kalten Atome mittels Laserlicht über sogenannte optische Feshbach-Resonanzen möglich. (U. Sterr, FB 4.3, uwe.sterr@ptb.de)

Hochpräzise Linearführung zur Messung des Gitterparameters von Silizium

Die Messung des Gitterparameters von Silizium mit Röntgeninterferometern verlangt die extrem präzise Relativbewegung von zwei Teilen eines Interferometerkristalls mit Winkelfehlern bis zu 0,001 arcsec im Vakuum ruckfrei über einige Millimeter. Als Teil der Kombination einer hochpräzisen Linearführung mit einer geregelten Winkelfeinverstellung wurde ein kinematisch beschränkter Translationsmechanismus mit Kreuzgelenkfedern entwickelt und ein Prototyp hergestellt. Diese Neuentwicklung soll zur Gitterparametermessung von Silizium benutzt werden und erschließt auch für andere Anwendungen im Vakuum den Führungsfehlerbereich unterhalb der Kugel- und Rollenlager mit einer Qualität, die Luftlagern vergleichbar sein wird. (U. Kuetgens, FB 4.3, ulrich.kuetgens@ptb.de)

Netzebenenparalleles chemisch-mechanisches Polieren von Einkristallen

Zur gezielten Fertigung spannungsfreier Einkristalloberflächen, die als Laserspiegel in kombinierten optischen und Röntgeninterferometern dienen, wurde ein geschlossener Bearbeitungskreislauf entwickelt. Einmal auf den Polierkopf montiert, wird das Werkstück in dieser Einheit in die Schleif-/Poliermaschine, den Ebenheitsprüfer und das Orientierungsdiffraktometer eingebracht. Netzebenenabweichungen von wenigen Winkelsekunden und Ebenheiten bis zu $\lambda/10$ machen diese Technik auch für prismatische Siliziumkörper, deren Dimension in Vielfachen des Gitterparameters bestimmt werden soll, geeignet. (U. Kuetgens, FB 4.3, ulrich.kuetgens@ptb.de)

Vektorielle Beugung in nicht-paraxialen optischen Systemen

Für die Abschätzung der Messunsicherheit von Laser-Interferometern wurde eine Methode weiterentwickelt, die unter Ausnutzung von gezielter, geometrischer differentieller Strahlverfolgung in optischen Systemen, Feldtransformation an Grenzflächen und Matrix-Optik auf rigoroser vektorieller Beugungstheorie aufbaut. Die Methode stimmt in guter Näherung mit einer schrittweisen Grenzfläche-zu-Grenzfläche-Propagation, welche auf vektoriellen Beugungsintegralen basiert, überein, wenn die Aperturen der Grenzflächen groß gegen die Wellenlänge sind. (B. Andreas, FB 4.33, Birk.Andreas@ptb.de)

Schwarzkörperstrahlung im Yb⁺-Oktupol-Frequenznormal

Für ein optisches Frequenznormal, das einen stark verbotenen Oktupolübergang in einem gespeicherten Yb⁺-Ion als Referenzübergang nutzt, wurde die Frequenzverschiebung durch die Schwarzkörperstrahlung der Umgebung mit einer Relativunsicherheit unter $2 \cdot 10^{-18}$ bestimmt. (Chr. Tamm, FB 4.4, christian.tamm@ptb.de)

Erste Beryllium-Ionen in planarer Mikro-Ionenfalle

In der Arbeitsgruppe von C. Ospelkaus (QUEST-Institut an der PTB und LUH) wurden ⁹Be⁺-Ionen in einer im Reinraumzentrum der PTB hergestellten Mikro-Ionenfalle gespeichert. Von der neuartigen Ionenfalle mit integrierter Mikrowellenmanipulation verspricht man sich eine wesentlich höhere Qualität quantenlogischer Operationen. Als nächste Schritte stehen nun die Realisierung eines Quanten-Bits oder Qubits auf Basis der Beryllium-Atome sowie die Charakterisierung der Mikrowellenmanipulation an. (M. Wahnschaffe, Amado Bautista-Salvador und M. Kohnen, QUEST, martina.carsjens@ptb.de, bautista@iqo.uni-hannover.de, matthias.kohnen@ptb.de)

Neue Kühltechnik für die Aluminium-Uhr

Die größte systematische Unsicherheit in Aluminium-Ionenuhren ist die relativistische Zeitdilatation aufgrund der Restbewegung des Ions in der Falle. Forscher am QUEST-Institut an der PTB haben eine neue Kühltechnik demonstriert, die es erlaubt, signifikant schneller als herkömmliche Kühltechniken in den Bewegungsgrundzustand zu kühlen. Diese neue Technik wird es ermöglichen, den größten Beitrag im Unsicherheitsbudget der Aluminium-Uhr signifikant zu reduzieren. (I. D. Leroux, QUEST, idleroux@quantummetrology.de)

Verbesserte Frequenzstabilität der Fontänenuhren

Mit den Fontänenuhren CSF1 und CSF2 der PTB konnten erstmals Beiträge zur Steuerung der Internationalen Atomzeit erbracht werden, deren statistische Unsicherheit durch die Verwendung eines optisch stabilisierten Mikrowellensignals reduziert war. Die kontinuierlichen Messungen über 10 Tage haben gezeigt, dass die Frequenzen von CSF1 und CSF2 innerhalb der reduzierten relativen statistischen Messunsicherheit von $2,1 \cdot 10^{-16}$ übereinstimmen. (S. Weyers, FB 4.4, stefan.weyers@ptb.de)

Hochgeladene Ionen eiskalt

Hochgeladene Ionen besitzen Übergänge, die sich besonders gut für optische Uhren, Tests der Quantenelektrodynamik und die Untersuchung einer möglichen Änderung von Naturkonstanten eignen. Bislang konnten sie jedoch nur bei extrem hohen Temperaturen im Megakelvin-Bereich untersucht werden. Forschern des Max-Planck-Instituts für Kernphysik (Heidelberg) und der PTB ist es nun erstmals gelungen, hochgeladene Ionen in einer Paulfalle mithilfe von lasergekühlten Beryllium-Ionen um mehr als sechs Größenordnungen in den sub-mK-Bereich abzukühlen. (L. Schmöger, QUEST, lisa.schmoeger@mpi-hd.mpg.de)

Spektroskopische Charakterisierung von Ionen-Coulomb-Kristallen für eine optische Multi-Ionen-Uhr

Am QUEST-Institut an der PTB wurde ein Aufbau zur orts aufgelösten Seitenbandspektroskopie an Coulomb-Kristallen entwickelt. Die zunächst mit einem einzelnen Ion durchgeführten Tests erlaubten die gleichzeitige Messung von Temperaturen mehrerer Moden im Bereich einiger Millikelvin. Mittels Grundzustandskühlen der radialen Moden konnte gezeigt werden, dass die Heizraten im derzeit verwendeten Fallenprototyp geringer als zwei Schwingungsquanten pro Sekunde sind. (J. Keller und T. E. Mehlstäubler, QUEST, jonas.keller@ptb.de, tanja.mehlstaebler@ptb.de)

Untersuchung einer ersten Test-Falle für Multi-Ionen-Uhren

In Zusammenarbeit mit dem wissenschaftlichen Gerätebau der PTB wird ein Prozess entwickelt, um hochgenaue, skalierbare Ionenfallen für Multi-Ionen-Uhren auf der Basis von goldbeschichteten AlN-Keramik-Substraten herzustellen. Erste laserstrukturierte und beschichtete Test-Chips wurden erfolgreich zu einer Fallenstruktur zusammengesetzt und kontaktiert. Diese befindet sich nun im Testbetrieb am tschechischen Metrologieinstitut (CMI) in Prag, wo die Erwärmung der Falle im Rahmen eines EMRP-Projektes untersucht wird. (T. Burgermeister und T. E. Mehlstäubler, QUEST, tobias.burgermeister@ptb.de, tanja.mehlstaebler@ptb.de)

Einmodige UV-Hohlkernfasern

In Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts ist es Forschern am QUEST-Institut an der PTB erstmals gelungen, eine einmodige Glasfaser für Strahlung im ultravioletten Spektralbereich zu demonstrieren. Die Faser basiert auf einer Kagomé-Struktur, bei der die

Strahlung in einem Hohlkern außerhalb des absorbierenden Glases geführt wird. Solche Fasern finden breite Anwendung in der Präzisionsspektroskopie, Biologie und Chemie. (F. Gebert, QUEST, florian.gebert@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Photonenzahl-auflösender Detektor für die Quantenkryptografie

In der Quantenkryptografie werden zurzeit abgeschwächte gepulste Laser als Lichtquellen verwendet. Die mittlere Photonenzahl eines Laserpulses ist für die Bewertung der Sicherheit des gesamten Kryptografiesystems von entscheidender Bedeutung. Diese wurde im Rahmen des EMRP-Projekts „Metrology for the industrial quantum communications“ (MICQ) mittels eines Photonenzahl-auflösenden Detektors (PNRD) gemessen. Der Detektor bestand aus vier InGaAs-Einzelphotonendetektoren, die zu einem sogenannten Detektorbaum zusammengeschaltet waren. Damit wurde die mittlere Photonenzahl pro emittiertem Laserpuls mit einer Standardmessunsicherheit von unter 5,0 % gemessen und genügt damit den bisherigen Anforderungen für Quantenkryptografiesysteme. Der Detektor wurde ebenfalls zur Tomografie der Photonenzahlverteilung eingesetzt. Die Rekonstruktion für mittlere Photonenzahlen $N \leq 40$ ergab eine sehr gute Übereinstimmung mit der theoretisch zu erwartenden Poisson-Verteilung, die mittlere quadratische Abweichung war kleiner als 1,7 %. (M. López, FB 4.1, marco.lopez@ptb.de)

Charakterisierung von Solarsimulatoren für die Photovoltaik

In Kooperation mit dem Photovoltaik-Messtechnikhersteller h.a.l.m. elektronik GmbH wurde in einem Transfer-Projekt aus dem Programm Messen, Normen, Prüfen und Qualitätssicherung (MNPQ) die Messmittelfähigkeit eines gepulsten Solarsimulators analysiert. Mit Array-Spektroradiometern wurde die Bestrahlungsstärkeverteilung auf einer Fläche von $(200 \times 200) \text{ mm}^2$ charakterisiert. Hierbei wurden spektrale, laterale und zeitliche Abhängigkeiten sowie Winkelabhängigkeiten und Reflexionen zwischen Solarzelle und Optik des Solarsimulators berücksichtigt. Aus der Messunsicherheitsanalyse resultiert eine erweiterte Messunsicherheit von 1,6 % für sekundäre Kalibrierungen von großflächigen kristallinen Silizium-Solarzellen. (F. Plag, FB 4.1, fabian.plag@ptb.de)

In-situ-Lebensdauermessungen an OLEDs der 2. Generation

Aufgrund der herausragenden Ergebnisse, die von der PTB im Rahmen des OLED100.eu-Projektes beigesteuert werden konnten, und durch die rasante Weiterentwicklung organischer Leuchtdioden (OLED) wurde die PTB für das BMBF-Projekt „OLYMP“ mit einer weiterführenden Untersuchung des Alterungsverhaltens von OLEDs beauftragt. Aktuell werden nun OLEDs der 2. Generation untersucht, die über eine Fläche von 144 cm² und eine Lichtausbeute von 40 lm/W bei einer Leuchtdichte von 2000 cd/m² verfügen. Der Messplatz ermöglicht die In-situ-Überwachung sämtlicher für OLEDs relevanten optischen, thermischen und elektrischen Größen. z. B. aktive Steuerung der OLED-Stack-Temperatur, welche bei beschleunigten Alterungsbedingungen eine besondere Relevanz besitzt. (T. Gerloff, FB 4.1, thorsten.gerloff@ptb.de)

Normale für die Charakterisierung von Asphären-Messgeräten

Zur Charakterisierung optischer und taktile Asphären-Messgeräte sind Referenzflächen mit bekannten Eigenschaften notwendig. Spezielle, auf die metrologische Rückführung ausgelegte Asphären und Freiformflächen werden aktuell entwickelt und charakterisiert. (G. Blobel, FB 4.2, gernot.blobel@ptb.de)

Verbesserung der Subapertur-Interferometrie durch absolute Abstandsmessung

In einem Projekt mit externen Partnern (ETALON AG und TEM Messtechnik GmbH) ist ein absolut messender Lasertracer entwickelt worden, der mehrere Abstände im Raum nacheinander hochgenau und absolut messen kann. Damit können speziell Subapertur-Interferometer verbessert werden, da jetzt Lage und Verkippung des Sensorkopfes exakt bestimmt werden können. (M. Schulz, FB 4.2, michael.schulz@ptb.de)

Scatterometrische Vermessung von Subwellenlängen-Gitterstrukturen

Die genaue dimensionale Charakterisierung von Gitterstrukturen mit Perioden unter 100 nm ist für die Metrologie eine große Herausforderung. Mit dem Deep-UV-Scatterometer konnten nun erstmals auch solche Gitter mit Linienbreiten von nur noch einem Zehntel der verwendeten Beleuchtungswellenlänge ($\lambda = 266$ nm) vermessen werden. (M. Wurm, FB 4.2, matthias.wurm@ptb.de)

2. Internationaler Workshop Scatterometry and Ellipsometry on Structured Surfaces

Vom 18.–19. September 2014 fand in Berlin-Adlershof der von der PTB organisierte 2. International Workshop *Scatterometry and Ellipsometry on Structured Surfaces*, als Teil des *Annual Meeting of the European Optical Society EOSAM2014* statt. Schwerpunktthemen waren Entwicklungen scatterometrischer Verfahren für aktuelle und künftige Anforderungen in der Halbleiterindustrie. Insbesondere wurden Ergebnisse des EMRP-Projektes JRP IND17 „Scatterometry“ vorgestellt. (B. Bodermann, FB 4.2, bernd.bodermann@ptb.de)

Messungen in kombinierten diffusen Reflexions- und Transmissionsgeometrien

Für Anwendungen in der radiometrischen Rückführung von Fernerkundungssatelliten ergibt sich derzeit eine steigende Nachfrage von kombinierten Messungen in gerichteten diffusen Reflexions- und Transmissionsgeometrien. Mit dem roboterbasierten Gonioreflektometer der PTB wurde die winkelaufgelöste Reflexions-/Transmissionsindikatix an einer Opalglasscheibe bei Wellenlängen im Bereich zwischen 270 nm und 700 nm durchgeführt. Damit werden jetzt für neuentwickelte Materialien der Mic-Volumenstreuer die Einflüsse der Eingangspolarisation wesentlich reduziert und eine verbesserte metrologische Rückführung ermöglicht. (A. Höpe, FB 4.2, andreas.hoepe@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Rückführung für solare UV-Messungen

Um langfristige Änderungen der terrestrischen solaren UV-Strahlung zu quantifizieren, sind rückführbare Messungen der globalen solaren UV-Bestrahlungsstärke mit Unsicherheiten von dauerhaft weniger als 2 % erforderlich. Im Rahmen des kürzlich abgeschlossenen EMRP-Projektes „Traceability for surface spectral solar ultraviolet radiation“ konnte unter Federführung der PTB die Rückführung des Referenzspektroradiometersystems QASUME, das europaweit zur Qualitätssicherung der Messnetze für solare UV-Strahlung eingesetzt wird, optimiert und die Messunsicherheiten der Kalibrierung verringert werden. (S. Nevas, FB 4.1, saulius.nevas@ptb.de)

Ein robuster transportabler ultrastabiler Laser für industrielle Anwendungen

Im EMRP-Projekt „Frequenznormale für die Industrie“ wurde in Zusammenarbeit mit Kollegen aus dem britischen und italienischen Metrologieinstitut ein kompakter und robuster resonatorstabilisierter

Laser aufgebaut, der auch unter nicht-idealen Umgebungsbedingungen relative Frequenzinstabilitäten unter 10^{-14} liefern kann. (U. Sterr, FB 4.3, uwe.sterr@ptb.de)

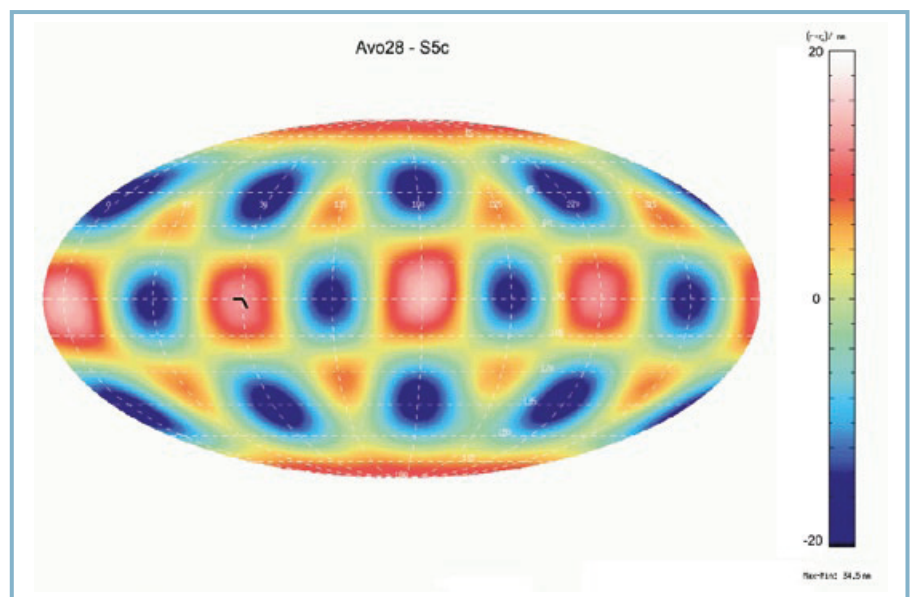
Internationale Angelegenheiten

Treffpunkt Straßburg für internationalen Glasfaserlink zwischen Paris und Braunschweig

In einem internationalen Kooperationsprojekt ist eine metrologische Glasfaserverbindung zwischen dem SYRTE in Paris und der PTB in Braunschweig im Aufbau, die im Treffpunkt Straßburg zusammengeführt wird. Damit wird es zukünftig möglich, die höchstpräzisen optischen Uhren der beiden Staatseinstitute zu vergleichen. Jüngst wurde das letzte Teilstück der Glasfaser zwischen Braunschweig und Straßburg verbunden und erstmalig Licht von der PTB in BS über Straßburg wieder in der PTB detektiert. Die Gesamtstrecke wird jetzt metrologisch charakterisiert. (G. Grosche, FB 4.3, gesine.grosche@ptb.de)

Abteilung 5

Fertigungsmesstechnik



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

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

Die Grundlage aller dimensionellen Messungen bildet die SI-Definition der Längeneinheit Meter, die zuletzt 1983 neu definiert wurde. Nachdem seit 1889 ein verkörpertes Längennormal – der sogenannte Meter-Prototyp aus einer Pt-Ir-Legierung mit X-förmigem Querschnitt und aufgetragenen Strichmarkierungen – zur Definition der Längeneinheit verwendet wurde, erfolgte ab 1960 die Definition über die Wellenlänge der orangenen Spektrallinie des ⁸⁶Krypton-Isotops bei 606 nm. 1983 schließlich wurde die Länge eines Meters als diejenige Strecke definiert, die Licht im Vakuum innerhalb des Zeitintervalls von 1/299 792 458 Sekunden durchläuft. Hiermit wurde zugleich der numerische Wert einer Naturkonstanten – der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 – festgelegt. Es ist wichtig zu beto-

nen, dass die praktische Weitergabe der Längeneinheit die genaue Berücksichtigung unterschiedlicher Einflüsse erfordert, wie z. B. den Einfluss der Temperatur oder anderer Umgebungsbedingungen auf interferometrische Längenmessungen und auf die Messobjekte.

Dieses 1983 erstmals für die Längeneinheit realisierte Vorgehen der Definition einer SI-Einheit durch die Festlegung einer Konstanten, idealerweise einer Naturkonstanten, bildet auch die Grundlage der geplanten Neu-Definition des SI (*Système international d'unités*)-Einheitensystems, welche für das Jahr 2018 angestrebt wird. Dabei werden zum Zeitpunkt der Neu-Definition Festlegungen auf die dann bestbekannten numerischen Werte (CODATA-Werte) der folgenden Naturkonstanten vorgeschlagen: für die Einheit der Masse (Kilogramm) die Planck-Konstante h , für die Einheit der Stoffmenge (Mol) die Avogadro-Konstante N_A , für die Einheit der Stromstärke (Ampere) die Elementarladung e und für die Einheit der Temperatur (Kelvin) die Boltzmann-Konstante k . Um die Neu-Definition in Kraft zu setzen, sind allerdings höchste Anforderungen an die Konsistenz von Messergebnissen, insbesondere für die Planck-Konstante h (angestrebte Messunsicherheit: $2 \cdot 10^{-8}$) und die Boltzmann-Konstante k (angestrebte Messunsicherheit: $1 \cdot 10^{-6}$) gestellt, die noch erfüllt werden müssen. Zur Sicherstellung der Kontinuität der Einheiten und deren Weitergabe sind auch noch praktische Erprobungen der Weitergabe der Einheiten durchzuführen. Die Aktivitäten in den Metrologieinstituten weltweit sind zurzeit darauf ausgerichtet, die im Vorfeld der geplanten Neu-Definition noch erforderlichen Arbeiten koordiniert durchzuführen.

Es ist bemerkenswert, dass sowohl die fertigungstechnischen als auch die messtechnischen Möglichkeiten der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* bei den durchzuführenden Arbeiten im Vorfeld der geplanten Neu-Definition des Kilogramm, des Mol und des Kelvin in besonderer Weise gefragt sind. Der Schwerpunkt des Berichtes der Abteilung liegt deshalb in diesem Jahr auf der Darstellung der Beiträge der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* für die geplante Neu-Definition des SI-Einheitensystems. Auch in diesem Jahr wird somit die enge Verknüpfung von Präzisionsfertigung einerseits und dimensioneller Messtechnik andererseits aufgezeigt. Fortschritte in einem Gebiet befruchten jeweils das andere Fachgebiet, dies gilt auch für den Bereich der Grundlagen der Metrologie, wie bereits bei der Neu-Definition der Längeneinheit 1983 gezeigt.

Titelbild:

Gemessene Topografie der überarbeiteten Si-Kugel Avo28-S5c

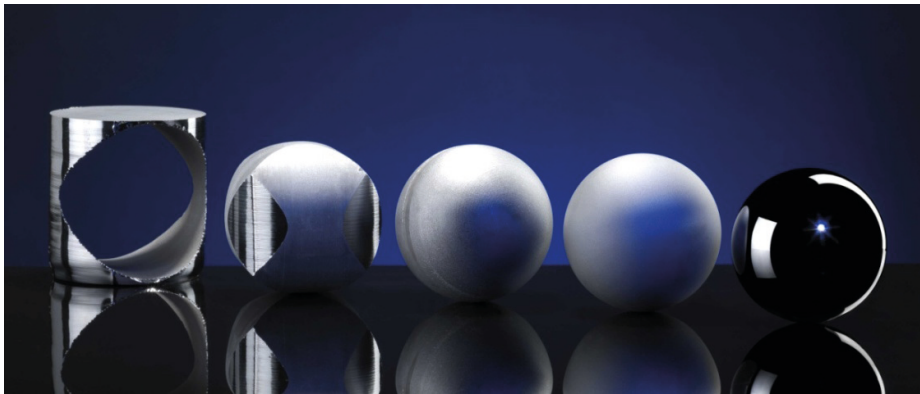


Bild 1: Veranschaulichung der komplexen Fertigungskette zur Herstellung von Si-Kugeln: von links nach rechts: Si-Zylinder-Rohling, ausgeschnittene Kugel, gedrehte Kugel, grob geläppte Kugel und ultrafein polierte Kugel.

NEUDEFINITION DES KG UND DES MOL

Bestimmung der Avogadro-Konstanten

Der Wert der sogenannten molaren Planck-Konstante, d. h. das Produkt $N_A \cdot h$, ist aus spektroskopischen Messungen mit einer relativen Standardmessunsicherheit von $7 \cdot 10^{-10}$ bekannt (CODATA-Wert von 2010). Dies bedeutet, dass Präzisionsmessungen der Avogadro-Konstanten N_A mit angestrebten Messunsicherheiten von $2 \cdot 10^{-8}$ zugleich auch Messwerte für die Planck-Konstante h auf diesem Unsicherheitsniveau ergeben. Dabei werden zwei Wege verfolgt: zum einen über Wattwaagen, die an verschiedenen Metrologieinstituten aufgebaut werden und mit denen sich mittels spezieller Präzisionswaagen die elektrische Leistung mit der mechanischen Leistung vergleichen lässt, wodurch sich Messwerte für die Planck-Konstante h ermitteln lassen. Der andere Weg verfolgt eine genauere Bestimmung der Avogadro-Konstanten N_A , der von der PTB im Rahmen des Internationalen Avogadro-Konsortiums (IAC) verfolgt wird.

Ausgangspunkt für die Präzisions-Bestimmung von N_A – als der verbindenden Konstante zwischen der makroskopischen und der atomaren Welt – ist der Gedanke, in einem perfekten makroskopischen Einkristall die Anzahl der Atome mit der geforderten Unsicherheit bestimmen zu können. Für die Realisierung des benötigten makroskopischen Einkristalls von ca. 1 kg Masse wird hochreines und isotonenangereichertes ^{28}Si als Material in Form einer Kugel verwendet, da diese sowohl gut zu fertigen als auch zu charakterisieren ist.

Gemäß folgender Beziehung:

$$N_A = \frac{V_{\text{Kugel}} / V_{\text{Atom}} \cdot M_{\text{mol}} / m_{\text{Kugel}}}{(V_{\text{Kugel}} \cdot M_{\text{mol}}) / (m_{\text{Kugel}} \cdot \sqrt{8} \cdot d_{220}^3)}$$

sind an der Si-Kugel deren makroskopisches Volumen V_{Kugel} und Masse m_{Kugel} sowie deren molare Masse M_{mol} und der Kristallgitterabstand d_{220} mit hoher Genauigkeit zu bestimmen (der Faktor $\sqrt{8}$ ergibt sich durch die

Anzahl der Atome in der Einheitszelle des Si-Kristallgitters).

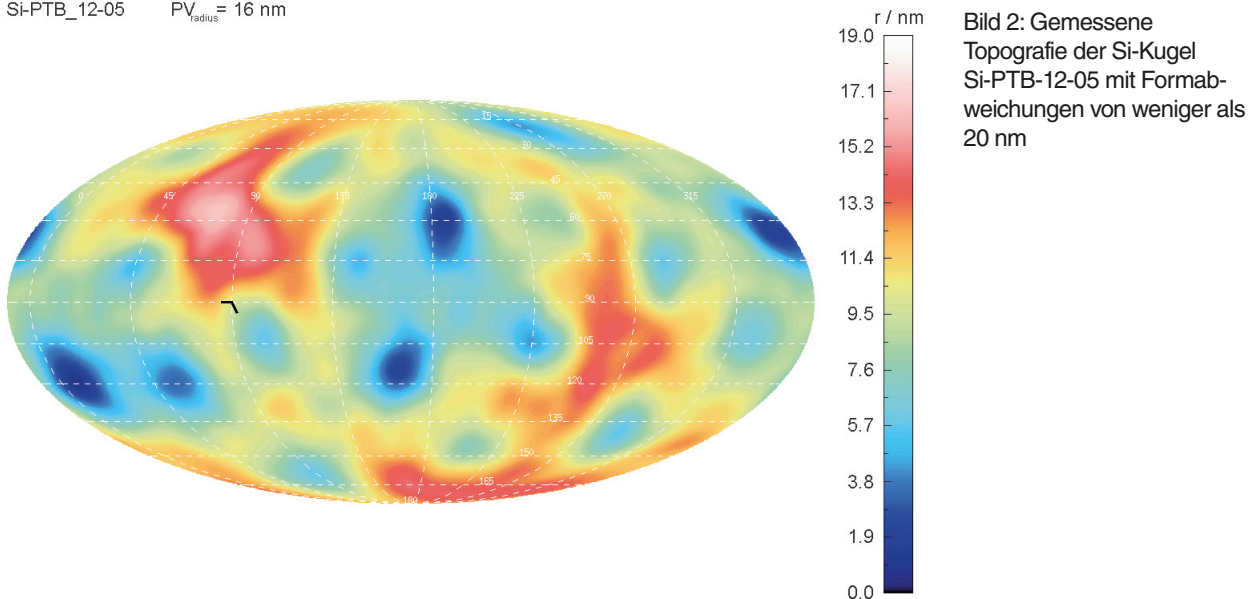
Fertigungskette für die Herstellung von Si-Kugeln

In der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* erfolgt die Bearbeitung des isotonenangereicherten Silizium-Materials vom einkristallinen Zylinder-Rohling bis zur fertig bearbeiteten Kugel mit extrem hohen Anforderungen bezüglich der Fertigungsqualität. Darüber hinaus werden aus dem Rohling verschiedene Proben für Materialanalysen präpariert sowie die erforderlichen Komponenten für die Bestimmung des Si-Gitterabstands in einem kombinierten Röntgen- und optischen Interferometer gefertigt. Bild 1 zeigt die für die Kugelfertigung realisierte komplexe Fertigungskette.

Hierbei wird zunächst ein Kugelrohling aus dem Si-Zylinder (Ingot) mittels Diamant-Hohlbohren ausgeschnitten. Anschließend wird der Kugelrohling in einem zweistufigen Prozess gedreht, mit resultierenden Formabweichungen von kleiner 1 mm. Hieran schließt sich eine Folge von Läppprozessen mit unterschiedlich feinem Aluminiumoxid-Korn an. Aus diesen Läpp-Prozessschritten resultieren schließlich Formabweichungen der Kugel von weniger als $0,1 \mu\text{m}$. Für die Endbearbeitung der geläpften Kugel wird in mehreren aufeinanderfolgenden Polierschritten mit Polier-Pech gearbeitet, wobei zunächst kolloidales Aluminiumoxid und bei den finalen Bearbeitungsschritten Titanoxid verwendet wird.

Als Ergebnis der komplexen Fertigungskette stehen Si-Kugeln zur Verfügung, deren Oberflächen frei von Kontaminationen, Kristallschädigungen und Oberflächendefekten sind sowie sehr geringe Formabweichungen und Rauheiten im Sub-nm-Bereich aufweisen. Im Titelbild zum diesjährigen Abteilungsleiterbericht ist eine Si-Kugel gezeigt, die in Australien (ACPO (Australian Centre for Precision Optics)) erstbearbeitet wurde. Hierbei wurde allerdings die Oberflächenschicht kontaminiert. Das Bild zeigt die

SI-PTB_12-05 $PV_{\text{radius}} = 16 \text{ nm}$



nach Entfernung der kontaminierten Oberflächenschicht durch Ätzen und anschließende Bearbeitung in der PTB erzielten Formabweichungen der Si-Kugel (Avo28-S5c). Man erkennt eine insgesamt geringe Formabweichung (ca. 35 nm) sowie eine sehr gute Symmetrie der gemessenen Formabweichungen, die auf die unterschiedlichen mechanischen Parameter in den Kristallrichtungen des Si-Einkristalls zurückzuführen ist. Bild 2 zeigt Messergebnisse einer im Berichtsjahr bearbeiteten Si-Kugel (Si-PTB-12-05), bei der bereits Formabweichungen von weniger als 20 nm erzielt werden konnten (Radienvariation (max-min): 16,3 nm). Man erkennt, dass die weitere Verringerung der Formabweichung mit einer Reduktion der Symmetrie einhergeht.

Rundheit der Si-Kugeln auf einem Formmessgerät mit optischer Antastung. Hier werden jeweils mindestens 3 Messungen in unterschiedlichen Winkellagen am Äquator der Kugel aufgenommen, um Abweichungen von der Rundheit (Radienvariation) von größer 30 nm zuverlässig detektieren zu können.

Die erzielten Oberflächenrauheiten des Bearbeitungsprozesses werden mit einem interferenzoptischen Messmikroskop untersucht. Bild 4 zeigt ein typisches Ergebnis der Rauheitsanalysen an den endbearbeiteten Oberflächen der Si-Kugeln.

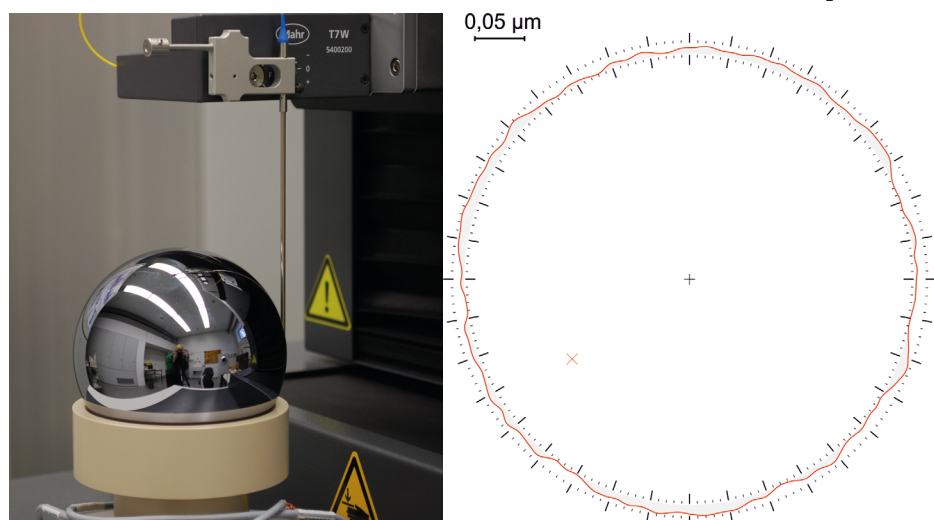
Prozessbegleitende Messungen

Während der gesamten Fertigungskette sind prozessbegleitende Messungen zur genauen Steuerung der einzelnen Bearbeitungsschritte erforderlich. Bild 3 zeigt prozessbegleitende Charakterisierungen der

Charakterisierung der Oxidschichtdicken-Topografie

Auf der Oberfläche der Si-Kugeln wächst eine Oxidschicht (SiO_2), deren Eigenschaften genau zu untersuchen sind, um den Einfluss der Oxidschicht auf die Wägung der Si-Kugel einerseits sowie auf die interferometrische Durchmesser- und Volumenmessung der Si-Kugel (Phasenkorrektur durch SiO_2 -Schicht)

Bild 3: Foto des Aufbaus zur Rundheitsmessung der Si-Kugeln mit optischer Antastung auf einem Formmessgerät sowie Ergebnis der Rundheitsmessung an einer Si-Kugel (RONt [LSCI @ 50 UPR] = 0,013 μm).



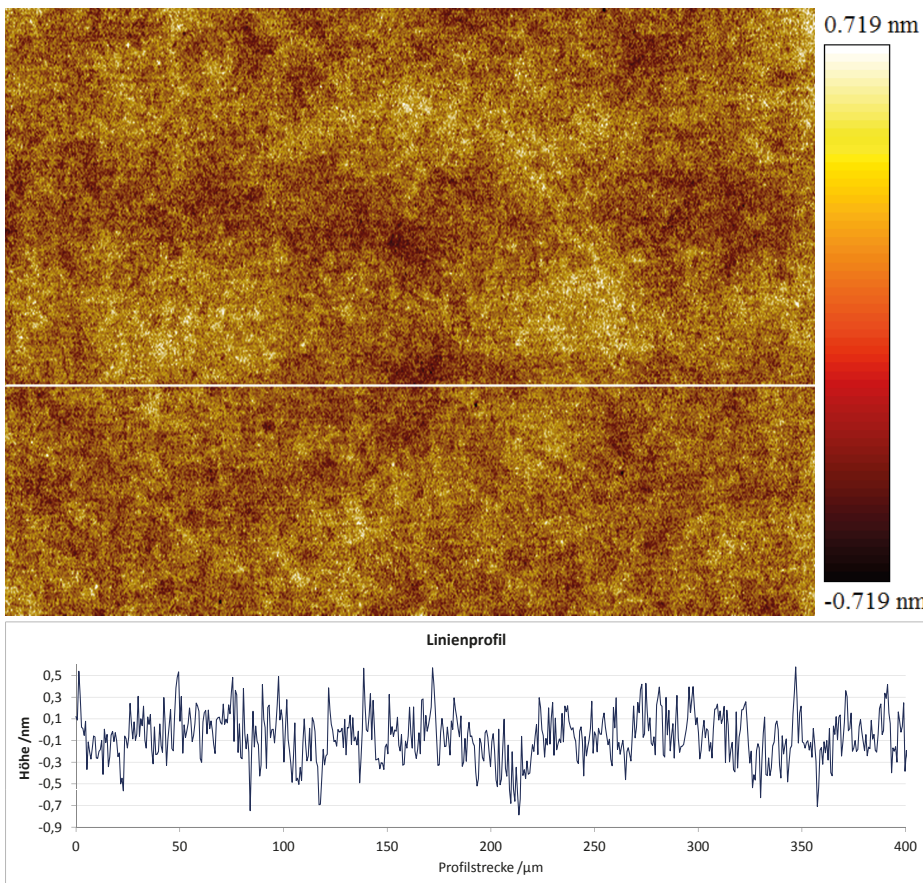


Bild 4: Typische Oberflächentopografie und ein daraus extrahiertes Linienprofil an einer gefertigten Si-Kugel mit ermittelten R_a -Werten von kleiner 0,2 nm.

Messunsicherheiten von 0,1 nm bestimmt wurden. Das verwendete Spektrellipsometer (Bild 5) erlaubt das Mapping der Schichtdickenvariation über die gesamte Kugeloberfläche in einem dichten Netz von typischerweise etwa 5500 Messpunkten. Für die untersuchte Kugel AVO28-S8c zeigen die ellipsometrischen Messungen eine homogene Schichtdickenverteilung mit einem Mittelwert von $d_{OL,SE,MW} = 2,71$ nm und einer Standardabweichung von

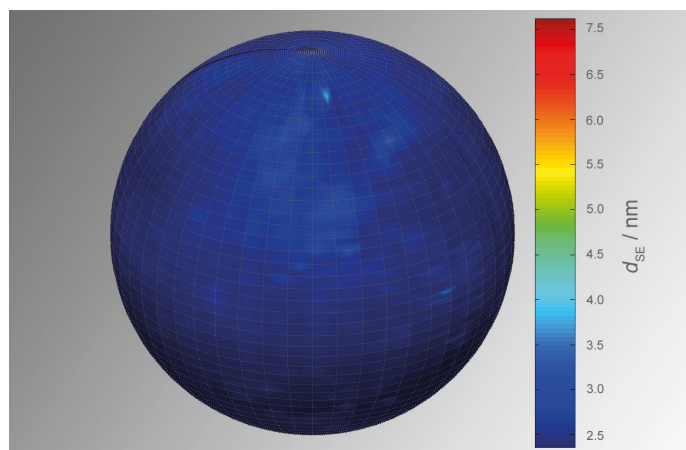
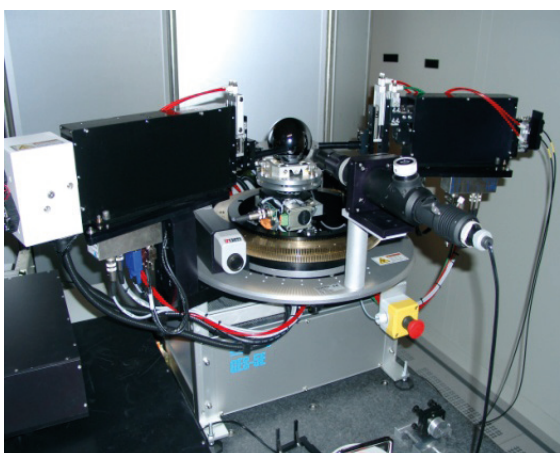
andererseits erfassen und korrigieren zu können. Die Charakterisierung der Oxidschicht erfolgt dabei mit verschiedenen Untersuchungsmethoden, um neben der Bestimmung der Schichtdicke auch Aussagen zur Reinheit und Stöchiometrie der Oxidschicht treffen zu können. In der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* wird dabei die Methode der spektroskopischen Ellipsometrie angewandt, um die Verteilung der Oxidschichtdicke über die gesamte Kugeloberfläche zu bestimmen. Dabei stützt sich die Spektrellipsometrie auf Referenz-Messergebnisse für die Oxidschichtdicke mittels kombinierter Röntgenreflektometrie und Röntgenfluoreszenzanalyse mit Synchrotronstrahlung (BESSY II) ab, die an wenigen identifizierbaren Bezugspunkten auf der zu untersuchenden Kugel mit

0,16 nm (Minimum: $d_{OL,SE,Min} = 2,30$ nm, Maximum: $d_{OL,SE,Max} = 7,43$ nm). Nach dem erfolgten Anschluss an die Referenz-Messergebnisse resultiert ein Mittelwert für die SiO_2 -Schichtdicke von $d_{OL} = 1,17$ nm mit einer Standardmessunsicherheit von $u(d_{OL}) = 0,13$ nm.

Durchmesser und Volumen-Bestimmung der Si-Kugeln

Für die präzise Bestimmung des mittleren Durchmessers der Si-Kugeln wurde ein Kugelinterferometer

Bild 5: Foto des Aufbaus einer Si-Kugel im Ellipsometer sowie Beispiel einer hiermit bestimmten Topografie der Oxidschichtdicke an der ^{28}Si -Kugel mit der Bezeichnung AVO28-S8c



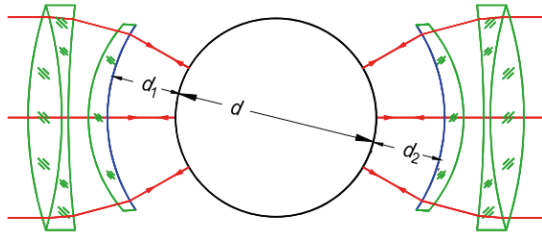
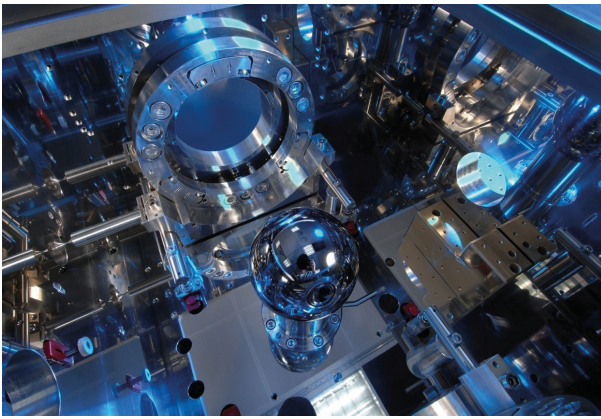
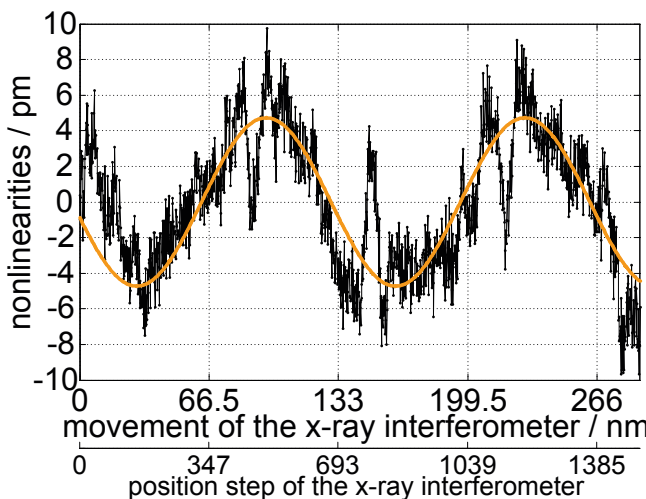


Bild 6: Foto des Aufbaus des neuen Kugelinterferometers (KIF II) sowie Prinzipbild der verwendeten sphärischen Fizeau-Interferometrie

realisiert, welches auf der Fizeau-Interferometrie mit sphärischen Wellenfronten basiert und somit optimal auf die Prüflingsgeometrie angepasst ist, siehe Bild 6. Es lassen sich so in einer Orientierung der Kugel über einen Aperturwinkel von 60° gleichzeitig ca. 10 000 Durchmesserwerte aus den gemessenen Interferogrammen ermitteln, wobei für die phasenschiebende Interferometrie im Vakuum die Wellenlänge der verwendeten stabilisierten Diodenlaser durchgestimmt wird. Eine vollständige Kugelmessung erfordert zusätzlich die Drehung der Kugel um 2 Positionierachsen zwi-

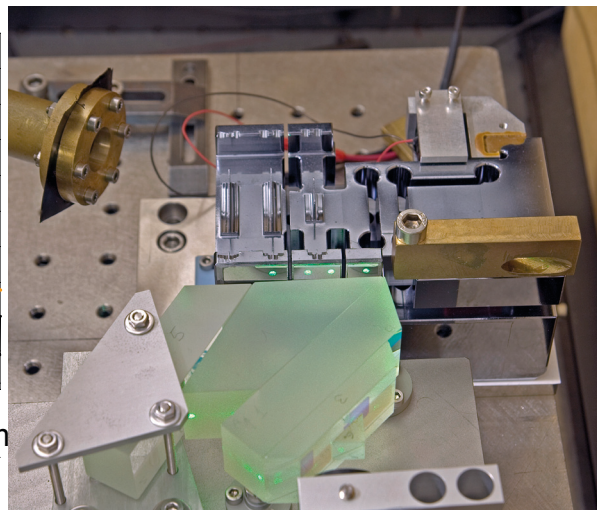
Bild 7: Foto des Vergleichs-Aufbaus aus einem Röntgen- und einem optischen Verschiebeinterferometer am NPL sowie gemessene Nichtlinearitäten des in der PTB entwickelten optischen Interferometers



schen der Aufnahme der jeweiligen Interferogramme. Bislang trägt die für das gemessene Kugelvolumen abgeschätzte Messunsicherheit den relativ größten Beitrag (ca. 66 %) für die Gesamtmessunsicherheit der Avogadro-Konstanten von $3 \cdot 10^{-8}$ bei. In der Messunsicherheitsbilanz wesentliche Einflussgrößen sind dabei u. a. die Bestimmung der Temperatur der Si-Kugeln sowie die Charakterisierung der im optischen System des Interferometers relevanten Aberrationen. Um diese systematischen Einflüsse besser erfassen zu können, wurde ein zweites Kugelinterferometer (KIF II) mit modifizierten Designparametern und neuer Fizeauoptik aufgebaut. Die Spezifikationen für die Aberrationen der neuen Interferometeroptik ($\lambda/100$) waren für den Hersteller in besonderer Weise herausfordernd. Bild 6 zeigt eine Ansicht der geöffneten Probenkammer des neuen Kugelinterferometers sowie das verwendete Messprinzip zur Kugelinterferometrie. Zurzeit wird das neue Kugelinterferometer KIF II sukzessive in Betrieb genommen, und seine Ergebnisse werden fortlaufend mit dem etablierten KIF I verglichen. Zudem werden unterstützende Simulationen zu den Einflüssen des optischen Beleuchtungssystems sowie der Rest-Aberrationen der Interferometerkomponenten auf die erzielbare Messunsicherheit für die Kugeldurchmesser durchgeführt.

Bestimmung des d_{220} -Gitterabstands im ^{28}Si -Einkristall

Für die rückgeführte Messung des Netzebenenabstands des einkristallinen Si-Materials wird ein gekoppeltes Verschiebeinterferometer, bestehend aus einem Röntgeninterferometer und einem hochauflösenden optischen Interferometer, verwendet. Für das Avogadro-Projekt besteht dabei die Anforderung, den Netzebenenabstand mit einer relativen Standardmessunsicherheit von besser als $3 \cdot 10^{-9}$ zu bestimmen. Aus dieser Bedingung ergeben sich hohe Anforderungen



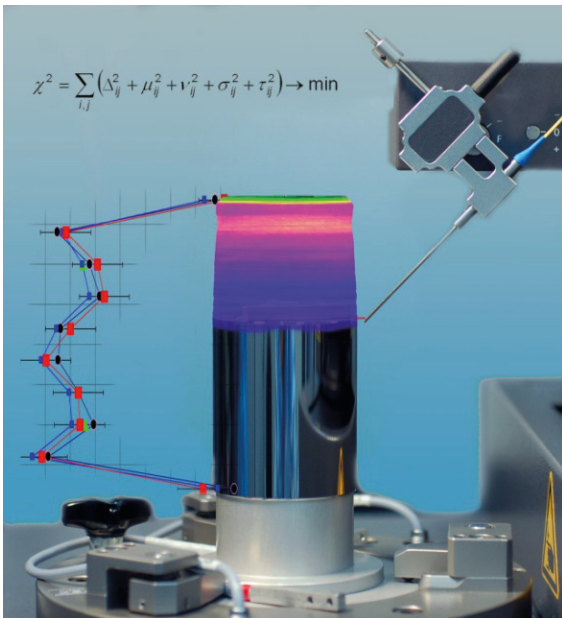


Bild 8: Kolben-Zylinder-Paar als Bestandteil eines Druckmesssystems sowie eine Veranschaulichung des Prozesses der Datenfusion von Durchmesser und Formmessdaten

an die Komponenten des Messaufbaus, u. a. bezüglich der Temperaturstabilität und -messung, der verwendeten Führungen zur Erzeugung der Relativbewegung im Verschiebeinterferometer, der Schwingungsdämpfung, der für die optische Interferometrie notwendigen Vakuum-Umgebung sowie der synchronen Datenerfassung und -auswertung der Interferometersignale. In der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* wurde bereits ein spezielles optisches Heterodyn-Interferometer entwickelt und gegen ein Röntgeninterferometer am britischen Metrologieinstitut NPL eingehend untersucht, insbesondere bezüglich der erreichbaren Nichtlinearitäten. Bild 7 zeigt ein Foto des am NPL verwend-

ten Vergleichs-Aufbaus aus Röntgen- und optischem Interferometer sowie die gemessene Linearitätsabweichung des optischen Interferometers in Referenz zu der vom Röntgeninterferometer gemessenen Verschiebung.

Die durch die Untersuchungen am NPL dokumentierte Leistungsfähigkeit des optischen Interferometers mit Restlinearitätsabweichungen kleiner ± 5 pm bildet die Grundlage für die Fertigung eines für Vakuumumgebung weiter optimierten Interferometerdesigns. Es ist vorgesehen, dieses adaptierte optische Interferometer im nächsten Jahr in den Gesamtaufbau des kombinierten Röntgen- und optischen Interferometers in der PTB zu integrieren und erste Messungen des Netzebenenabstands am ^{28}Si -Material durchzuführen.

Neudefinition des Kelvin

Bestimmung der Boltzmann-Konstanten mittels DCGT

Die Abteilung *Fertigungsmesstechnik* ist auch in die PTB-Arbeiten zur Präzisions-Bestimmung der Boltzmann-Konstanten k involviert. In der PTB wird hierzu die Methode der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie (DCGT) verfolgt. Hierbei wird die Dielektrizitätskonstante eines Edelgases bei unterschiedlichen Drücken bei der Referenztemperatur des Wassertripelpunkts hochgenau bestimmt. Die Druckmessungen basieren auf Kolben-Zylinder-Druckmesssystemen. Die Abteilung *Fertigungsmesstechnik* kalibriert die einzelnen Komponenten dieser Messsysteme bezüglich ihrer relevanten geometrischen Merkmale, d. h. Durchmesser und Form von Kolben und Zylinder. Um die geforderten relativen Messunsicherheiten von $1 \cdot 10^{-6}$ für die effektive Querschnittsfläche des Kolben-Zylinder-Paars zu erreichen, werden die Messergebnisse der auf verschiedenen Messgeräten realisierten Durchmesser- und Formbestimmung mit Methoden der Datenfusion geeignet kombiniert. Bild 8 zeigt ein Kolben-Zylinder-Paar als Bestandteil eines Druckmesssystems sowie eine Veranschaulichung des Prozesses der Datenfusion von Durchmesser und Formmessdaten.

Schlussbemerkung

Im diesjährigen Bericht der Abteilung wurden deren Beiträge für die geplante Neu-Definition der SI-Einheiten im Überblick dargestellt. Sowohl bei der Präzisionsfertigung als auch bei der dimensionellen Präzisionsmesstechnik liefert die Abteilung *Fertigungsmesstechnik* wichtige Beiträge für die Arbeiten zur Neu-Definition des SI-Einheitensystems und trägt so zu den Grundlagen der Metrologie mit bei.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Ellipsometrische Messungen zur Charakterisierung des Initialzustandes der Schichtdickentopografie an der Oberfläche von Siliziumkugeln

In Vorbereitung auf die Zeit nach einer Neudefinition des Kilogramms werden bereits jetzt Untersuchungen durchgeführt, die für das Monitoring von Masse-Gebrauchsnormalen auf Basis von Siliziumkugeln erforderlich sind. Mit spektralellipsometrischen Messungen werden dazu die Schichtdickentopografien verschiedener in der PTB hergestellten Siliziumkugeln erfasst und miteinander verglichen, um den Initialzustand für das Monitoring zu dokumentieren. (I. Busch, FB 5.1, ingo.busch@ptb.de)

Alternative Oberflächen für Siliziumkugeln – Pilotprojekt zur Anwendung der Atomic Layer Deposition (ALD)

Den natürlich oxidierten Oberflächen der Siliziumkugeln im Avogadro-Projekt kommt eine besondere Bedeutung zu – während der Messungen, der Lagerung und des Transports der Kugeln. Als eine mögliche Alternative wurde in einem Pilotprojekt, zusammen mit dem Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST), die Atomic Layer Deposition (ALD) untersucht. (I. Busch, FB 5.1, ingo.busch@ptb.de)

Statistische Unsicherheit der Heydemann-Korrektur

Für die Unsicherheitsanalyse höchstauflösender Interferometrie wurde der Beitrag des hochfrequenten Amplitudenrauschens zur Heydemann-Korrektur erstmalig unter Berücksichtigung aller Korrelationen bestimmt. Für den Fall einer hohen Anzahl von Messpunkten ergibt sich eine einfache analytische Formel, die eine untere Grenze der erreichbaren Messunsicherheit darstellt und für homodyne und heterodyne Interferometer gilt. (R. Köning, FB 5.2, rainer.koenig@ptb.de)

Virtuelles Transmissionselektronenmikroskop für die Nanometrologie

In Kooperation mit der Universität Münster wurde eine Methode zur Simulation von TEM-Bildern dünner Querschnitte von Nano-Referenzstrukturen, eingebettet in eine Schutzschicht aus z. B. Platin, entwickelt. Durch Vergleich simulierter (Multislice Methode) und gemessener TEM-Bilder kann die Position der Grenzflächen (z. B. Pt – SiO₂

und SiO₂ – Si) im Bild und damit die Breite einer Si-Nanostruktur genau bestimmt werden. (C. G. Frase, FB 5.2, carl.g.frase@ptb.de)

Interferometrische Absolutlängenmessung mit In-situ-Rückführung über hochauflösende Spektroskopie demonstriert

Interferometrische Absolutmessungen mit Reichweiten über mehrere zehn Meter sind für Steuerungsaufgaben in der Präzisionsfertigung großer Bauteile von hohem Interesse. Im Rahmen eines Forschungsprojektes konnte mit hochauflösender Spektroskopie ein Gaszellennormal im sichtbaren Wellenlängenbereich erfolgreich zur Rückführung einer solchen Messung demonstriert werden. (G. Prellinger, FB 5.4, guenther.prellinger@ptb.de)

Mehrwellenlängeninterferometrie mit einer relativ einfachen optischen Quelle

Einem breiteren Einsatz interferometrischer Verfahren in der industriellen Messtechnik steht heute meist die Komplexität und der Preis geeigneter optischer Quellen im Weg. Mithilfe von Resonatorgekapselten elektrooptischen Generatoren ist es gelungen, ein interferometrisches Messschema zu realisieren, das mit Unsicherheiten kleiner 15 µm absolute Längen bis zu 10 m bestimmen kann und sich dabei durch einen relativ geringen apparativen Aufwand für die optische Quelle und die Datenerfassung auszeichnet. (F. Pollinger, FB 5.4, florian.pollinger@ptb.de)

Thermische Ausdehnung von Siliziumeinkristallen von 7 K bis 293 K

Am Ultrapräzisionsinterferometer wurde die thermische Ausdehnung von Siliziumeinkristallen mit exzellenter Reproduzierbarkeit ($< 1 \cdot 10^{-9}/K$) und Unsicherheiten $< 2,5 \cdot 10^{-9}/K$ gemessen. Zum ersten Mal wird zur Bestimmung der thermischen Ausdehnung basierend auf Längenmessungen ein physikalisch motiviertes Fitmodell verwendet, was die Genauigkeit der Ergebnisse entscheidend verbessert. (T. Middelman, FB 5.4, thomas.middelmann@ptb.de)

Interferometrische Messung der piezoelektrisch induzierten Längenänderung von funktionellen Materialien bei hohen Temperaturen

Im Rahmen des europäischen Projektes METCO wird die elektro-thermo-mechanische Kopplung in funktionellen Materialien, wie z. B. Piezokeramiken,

bei hohen Temperaturen untersucht. Hierzu wurden interferometrische Längenmessungen an Piezokeramiken für Temperaturen bis 200 °C durchgeführt, wobei erstmals die Topografie der Längenänderung über einen Probenquerschnitt gemessen werden konnte. (T. Quast, FB 5.4, tatjana.quast@ptb.de)

Fertigung hochpräziser Lamellen aus Silizium zum Einsatz im Röntgeninterferometer

Es wurden Fertigungsstrategien für filigrane Lamellen aus Silizium entwickelt. Insbesondere die hohe mechanische Empfindlichkeit der sehr dünnen freistehenden Strukturen und die erforderliche geringe Schädigungen des Kristalls stellten hierbei besondere Herausforderungen dar. (R. Meeß, FB 5.5, rudolf.meess@ptb.de)

Konstruktion und Fertigung eines Magnetisierungs-Messplatzes

Zur Untersuchung der spinabhängigen Transportphänomene steht eine Reihe von Messmethoden zur Verfügung, wie z. B. die ferromagnetische Resonanz (FMR) oder statische Magnetotransportmessungen. Grundlage all dieser Messmethoden ist ein in der Amplitude und Richtung frei variables, externes Magnetfeld. Es wurde ein Messplatz konstruiert und gefertigt, welcher zur Charakterisierung von magnetischen Dünnschichten, Multilagungen und Nanostrukturen dient. (M. Müller, FB 5.5, michael.mueller@ptb.de)

Probenumgebung für interferometrische Untersuchungen an piezokeramischen Werkstoffen im Temperaturbereich von 20 °C bis 200 °C

Um die Verformung durch piezoelektrische Effekte an Keramikscheiben bei Temperaturen bis zu 200 °C interferometrisch zu messen, wurde eine Probenumgebung für den Einsatz unter Vakuumbedingungen entwickelt und gefertigt. (F. Pilarski, FB 5.5, frank.pilarski@ptb.de)

Konstruktion und Fertigung einer TCAP-Streukammer

Zur Bestimmung der Fluenz monoenergetischer Neutronen (Time correlated associated particles, TCAP) wurde eine massearme Streukammer entwickelt und gefertigt. Diese soll an der Ionen-Beschleunigeranlage PIAF der PTB betrieben werden. (H. Drösemeyer, FB 5.5, holger.droesemeyer@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Dynamisches Verfahren zur Bestimmung der Biegesteifigkeit von Rasterkraftmikroskop-Cantilevern mit MEMS

Im Rahmen des EMRP-Projektes MechProNO wurde ein neues Referenzfederungsverfahren basierend auf einem MEMS-Nanokraftwandler zur Kalibrierung der Biegesteifigkeit von AFM-Cantilevern entwickelt. Mittels einer Auflösungsverstärkungstechnik können nun auch sehr weiche Cantilever mit einer Steifigkeit bis zu 0,001 N/m gemessen werden. (S. Gao, FB 5.1, gao.sai@ptb.de)

Prototypen eines topografiefreien Normals für iXPS

Zur Charakterisierung der lateralen Auflösung von Imaging-XPS-Geräten werden Strukturen genutzt, deren Oberfläche aus verschiedenen Materialien besteht. Zur Vermeidung von Beugungseffekten müssen die Übergänge zwischen den Materialien absolut topographiefrei sein. Mithilfe eines neuartigen Herstellungsprozesses wurden Prototypen eines topographiefreien Normals hergestellt und erfolgreich getestet. (S. Bütefisch, FB 5.1, sebastian.buetefisch@ptb.de)

Umstellung der Referenzsoftware für Rauheitsmesstechnik RPTB auf das neue WEB-Design

Die Software zur Bestimmung der Rauheitskenngrößen nach den Normen EN ISO 4287, EN 10049 und der Materialanteilkennwerten nach ISO 13565 wurde aktualisiert. Die Benutzerschnittstelle wurde modernisiert und die Berechnung einzelner Kennwerte gemäß der Aktualisierung in den Normen geändert. (D. Hüser-Espig, L. Jung-Albrecht, FB 5.1, lena.jung-albrecht@ptb.de)

Stabilität des Nullpunktes von Thermoelementen bei Raumtemperatur

Thermoelemente sind aufgrund ihrer physikalischen Funktionsweise und der kleinen Bauform gut geeignet für die Bestimmung der Temperaturdifferenz zu einem Platin-Referenzthermometer und der Homogenität der Temperaturverteilung z. B. an Strichmaßstäben oder Endmaßen. Um zu klären, ob eine Kalibrierung der individuellen Thermoelemente notwendig ist, wurden 32 Exemplare über 6 Monate in einem stabilen Ölbad beobachtet. (J. Flügge, FB 5.2, jens.fluegge@ptb.de)

Charakterisierung von Nanostrukturen auf EUV-Masken mit CD-AFM und AFM mit geneigtem Messkopf

Für Messungen der Breite und des Kantenwinkels von unterschiedlich breiten Linienstrukturen auf EUV-Masken wurden rückgeführte CD-AFM-Messungen und Messungen mit geneigtem AFM-Messkopf durchgeführt und mit Messergebnissen der EUV-Scatterometrie verglichen. Die gemessenen mittleren Strukturbreiten differieren um 3 nm, für die Kantenwinkel ergeben sich übereinstimmende Werte innerhalb von 2°. (G. Dai, FB 5.2, gaoliang.dai@ptb.de)

Industrieller Ringvergleich am Großverzahnungsnorm

Ein von der PTB im Jahr 2012 initiiertes nationaler Vergleich an dem Großverzahnungsnorm konnte jetzt erfolgreich abgeschlossen werden. Die Teilnehmer waren neun Partner, darunter Messgerätehersteller, Großtriebekomponenten-Hersteller sowie Kalibrierlaboratorien. (K. Kniel, FB 5.3, karin.kniel@ptb.de)

Weiterentwicklung des 3D-Fasertasters

In einem MNPQ-Projekt wurden neue Designs für den taktil-optischen 3D-Mikrotaster (3D-Fasertaster) entwickelt sowie die zugehörigen Einmessverfahren optimiert. Dabei wurden Bi-Kugel-Taster, Taster mit L-förmigem Design sowie Ein-Kugel-Taster mit Tastelementdurchmessern von 25 µm realisiert und erfolgreich getestet. (U. Neuschaefer-Rube, FB 5.3, ulrich.neuschaefer-rube@ptb.de)

Standardisierte Bildung von Bezügen und Bezugssystemen

Die Bezugsbildung ist ein wesentlicher Bestandteil der Messung mit 3D-Koordinatenmessgeräten. Es wurde eine einheitliche Vorgehensweise bei der Erfassung und Auswertung von Bezügen entwickelt. Die wirtschaftliche und anwendungsorientierte Umsetzung der entwickelten Vorgehensweise wird durch interaktive Softwaremodule und ein Unsicherheitskonzept sichergestellt. (F. Keller/K. Wendt FB 5.3, klaus.wendt@ptb.de)

Internetbasierte Rückführung von Auswertearithmen für die Metrologie

In der PTB wird eine neue technische Infrastruktur zur Online-Validierung von Auswertearithmen aufgebaut. Registrierte Nutzer können für ausgewählte Algorithmen ihre Berechnungsergebnisse durch Vergleich mit Referenzdaten prüfen. Derzeit stehen Referenzdaten aus dem Bereich der Koordinatenmesstechnik für die Validierung zur

Verfügung. Das System ist ausbaufähig für andere Metrologiebereiche, wurde aber bereits von einem Hersteller von KMG-Auswertesoftware genutzt. (K. Wendt/F. Härtig, FB 5.3, Abt. 1, klaus.wendt@ptb.de)

Formmessungen auf Koordinatenmessgeräten

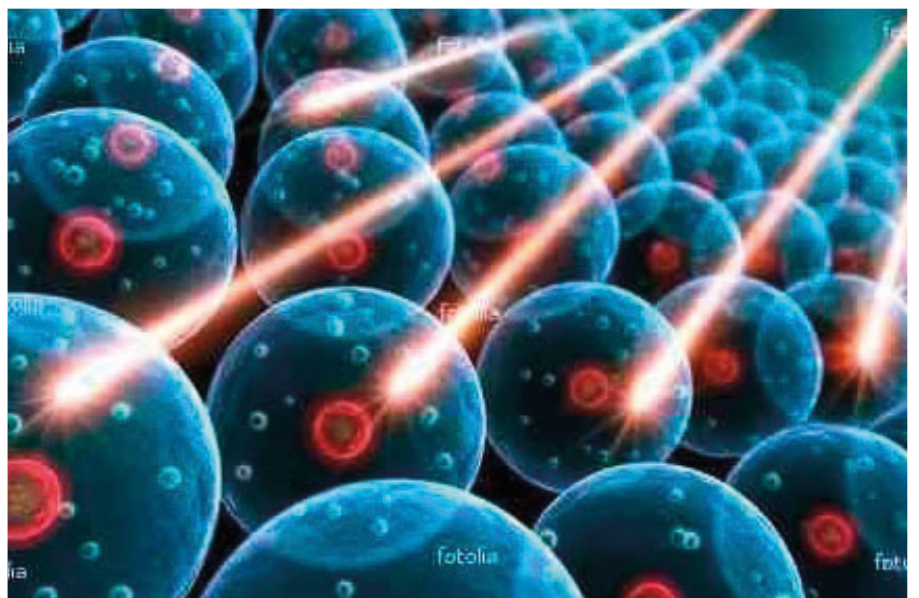
Im Rahmen des bilateralen Projekts „Formmessungen auf Koordinatenmessgeräten mit Drehtisch (FoKoDre)“ zwischen Zeiss IMT und der PTB wird der Stand der Technik der Formmesstechnik auf 3D-Koordinatenmessgeräten mit Drehtisch untersucht. Die gewonnenen Daten dienen auch zur Aktualisierung bestehender sowie zur Erstellung neuer Normen auf diesem Gebiet. (O. Jusko, FB 5.3, otto.jusko@ptb.de)

Untersuchungen zur dimensionellen und thermischen Stabilität von Verbindungstechniken

Techniken wie Schrauben oder Kleben werden auch beim Bau von Ultra-Präzisions-Instrumenten häufig eingesetzt. Die dimensionelle und thermische Stabilität solcher Verbindungen wurde erstmalig über einen längeren Zeitraum und über einen Temperaturbereich von 10 °C bis 40 °C mit Genauigkeiten untersucht, wie sie sonst nur für Parallelendmaße erreicht werden. (H. Lorenz, FB 5.4, hagen.lorenz@ptb.de)

Abteilung 6

Ionisierende Strahlung



Die großen Arbeitsgebiete der Abteilung liegen in den Bereichen Gesundheit des Menschen und Schutz der Umwelt. Dabei geht es nicht nur um die direkte metrologische Unterstützung medizinischer Anwendungen wie zum Beispiel die Dosimetrie bei der Computertomografie und in der Strahlentherapie oder Aktivitätsbestimmungen für neue, in der Nuklearmedizin eingesetzte Radiopharmazeutika, sondern auch um Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der Wirkmechanismen ionisierender Strahlung in biologischen Geweben, um Fragen des Strahlenschutzes für Personal und Patienten sowie die sichere Überwachung unserer Umwelt zum Schutz der Bürger vor den Gefahren radioaktiver Stoffe. Unsere messtechnische Begleitung wichtiger Umweltthemen trägt zum Erhalt und der Verbesserung der Lebensbedingungen bei. Mit der Entwicklung moderner Techniken für die Messung ionisierender Strahlung – seien es geladene Teilchen, Photonen oder Neutronen – engagieren wir uns in Projekten der wissenschaftlichen Grundlagenforschung. Einige Beispiele aus dem Berichtszeitraum werden im Folgenden vorgestellt. Ausführliche Berichte zu den einzelnen Themen finden sich auch auf den Internet-Seiten der PTB.

Hängt die Zerfallsrate von Radionukliden vom Abstand zwischen Erde und Sonne ab?

Eine Gruppe US-amerikanischer Wissenschaftler veröffentlichte kürzlich am Ohio State University Research Reactor (OSURR) gewonnene Messdaten des radioaktiven Isotops Chlor-36, die jahreszeitliche Schwankungen zeigen, welche die Forscher mit entsprechenden Änderungen der Zerfallsrate des Nuklids erklären. Nach Interpretation der Gruppe hängen die Zerfallsraten von Chlor-36 wie auch die einiger anderer Isotope vom Abstand zwischen Erde und Sonne ab. Mit diesem Abstand ändert sich auch die Fluenzrate solarer Neutrinos auf der Erdoberfläche, was nach Meinung der Wissenschaftler die Zerfallsraten beeinflusst.

Zuvor hatte die Gruppe Daten von Langzeitmessungen anderer Radionuklide, welche unter anderem aus der PTB stammen, verwendet, um diese Theorie zu belegen. Messungen der Zerfallsraten von langlebigen Radionukliden werden oft über viele Jahre vorgenommen. Bei den Langzeitmessungen treten, je nach Detektortyp, deutliche Schwankungen auf, die in einigen Fällen mit der

Jahreszeit korreliert zu sein scheinen. Die Wissenschaftler um Ephraim Fischbach und Jere Jenkins interpretieren die Korrelation als Beleg für eine Abhängigkeit der Zerfallsraten vom Abstand zwischen Erde und Sonne. Die Tatsache, dass die Extrema der Schwankungen zeitlich nicht mit Perihel und Aphel zusammenfallen, führen sie auf Effekte innerhalb der Sonne zurück, welche ebenfalls Änderungen der Neutrino-Fluenzrate verursachen. Die Theorie stützt sich auf experimentelle Daten, die mit Detektortypen gewonnen wurden, die für ihre Empfindlichkeit auf Umweltparameter bekannt sind. Die Ergebnisse der Autoren sind daher äußerst umstritten. Einige Forscher untersuchten andere Isotope und fanden keine jahreszeitliche Abhängigkeit. Dies hält die amerikanische Gruppe aber nicht davon ab, an ihrer Theorie festzuhalten.

In der PTB wurde Chlor-36 ebenfalls gemessen, um eine mögliche jahreszeitliche Abhängigkeit der Messdaten zu untersuchen. Als Detektor wurde in der PTB jedoch ein Flüssigszintillationszähler verwendet. Mit dem dabei angewendeten Messverfahren (triple-to-double-coincidence ratio – TDCR) kann die Nachweiswahrscheinlichkeit des Systems ohne zusätzliche Referenzquelle bestimmt werden. Damit werden Schwankungen der Nachweiswahrscheinlichkeit durch Änderungen der Quellen- oder Detektoreigenschaften sowie durch Umwelteinflüsse weitgehend kompensiert. Die Ergebnisse der PTB sind im Bild 1 zusammen mit den OSURR-Resultaten dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die TDCR-LSC-Ergebnisse deutlich weniger schwanken. Einen Hinweis auf eine jahreszeitliche Abhängigkeit gibt es nicht. Sofern ein Einfluss solarer Neutrinos auf die Zerfallsrate vorliegt, sollte dieser durch die PTB-Messungen nachgewiesen werden können. Da dies nicht gegeben ist, ist der Beweis erbracht, dass die beobachteten Schwankungen andere Ursachen haben müssen. Naheliegend sind Einflüsse von Parametern wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck auf das empfindliche Detektor-Quellen-System.

Radium-223 für die Nuklearmedizin

Radium-223 wird neuerdings zur Behandlung von Patienten mit Knochenmetastasen genutzt. Für die dabei eingesetzten Injektionslösungen erhielt ein namhafter Arzneimittel-Hersteller Ende 2013 die entsprechende EU-Marktzulassung. Die PTB hat mithilfe solcher Lösungen zeitnah geeignete Messverfahren für Aktivitätsbestimmungen entwickelt und Radionukliddaten bestimmt. Radium-223 ist ein Alphastrahler. Er befindet sich schon nach kur-

Titelbild:
Strahlung trifft auf Zellen

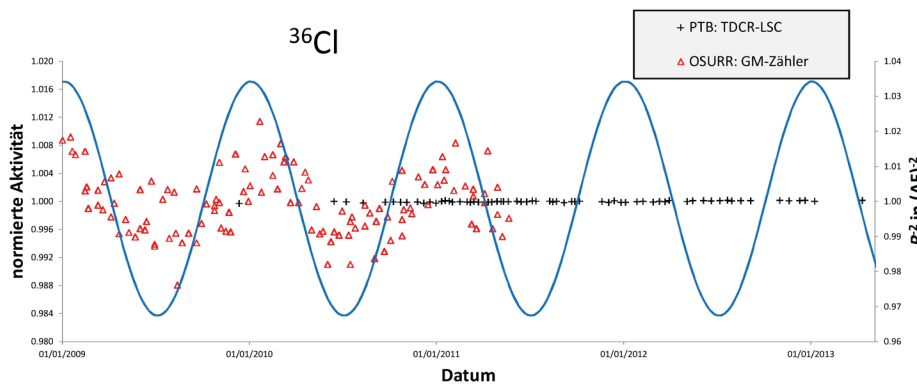


Bild 1: Die normierte Aktivität als Funktion der Zeit zeigt bei den PTB-Daten keine jahreszeitliche Abhängigkeit wie bei den am Ohio State University Research Reactor (OSURR) gewonnenen Daten. Die blaue Kurve stellt das reziproke Quadrat des Abstands zwischen Sonne und Erde in der astronomischen Einheit (AE) dar.

zer Zeit im radioaktiven Gleichgewicht mit seinen recht kurzlebigen Folgeprodukten, zu denen überwiegend Alphastrahler, aber auch einige Betastrahler zählen. Für die Messungen in der PTB wurden Flüssigszintillationszähler – unter anderem mit dem schon im vorigen Abschnitt erwähnten TDCR-Verfahren – eingesetzt, in denen sich Radium-223 und seine Folgeprodukte sehr gut nachweisen lassen. Die erzielten relativen Standardmessunsicherheiten liegen unter 0,3 %. Einige der Radium-223-Quellen wurden auch mit Halbleiterspektrometern gemessen. Die aus den Messergebnissen gewonnenen Photonemissionswahrscheinlichkeiten zeigen zum Teil deutliche Diskrepanzen zu älteren, in der Fachliteratur publizierten Werten.

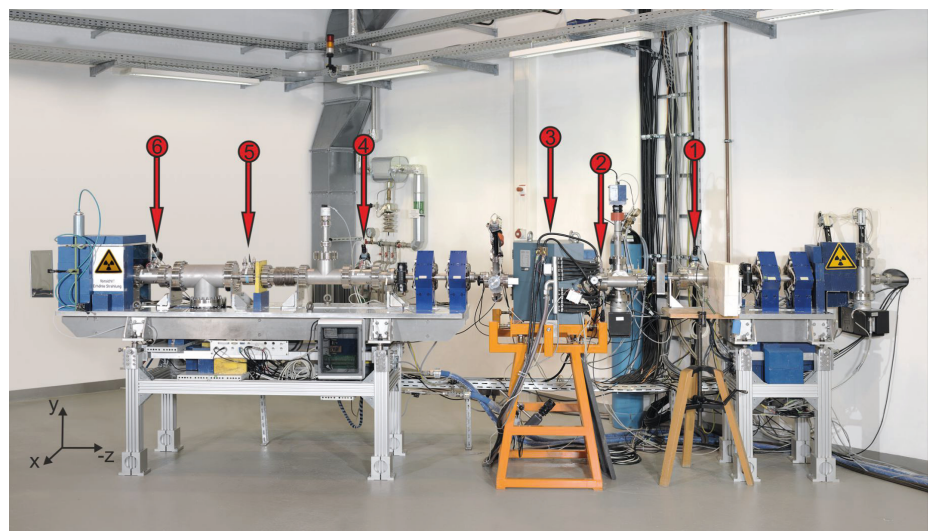
Verifikation von Strahlungstransportrechnungen für die Dosimetrie in der Strahlentherapie

Monte-Carlo-Simulationen gelten als das genaueste Lösungsverfahren für komplexe Fragestellungen im Bereich der Dosimetrie und des Strahlungstransports. In der externen Strahlentherapie werden sie in zunehmendem Maße bei der Bestrahlungsplanung für die Berechnung von Dosisverteilungen im Patienten angewendet. Im Vergleich zu anderen

Methoden haben Monte-Carlo-Simulationen ein großes Potenzial, die Genauigkeit der Dosisberechnungen zu erhöhen. Allerdings besteht ein Mangel an Informationen darüber, wie korrekt die mittels Monte-Carlo-Simulation berechneten Dosisverteilungen im absoluten Sinne sind. Eine praxisnahe Überprüfung der Resultate von Monte-Carlo-Rechnungen konnte durch einen direkten Vergleich mit den Ergebnissen eines Benchmark-Experiments erfolgen, das in der PTB geplant und realisiert wurde.

Für den absoluten Vergleich der Ergebnisse von Experiment und Monte-Carlo-Simulation müssen die Eigenschaften der Strahlungsquelle sehr genau bekannt sein. Gewöhnlich stehen aber wichtige, vom Anwender experimentell nicht erfassbare Informationen über die Strahlungsquelle nicht zur Verfügung. Daher werden Monte-Carlo-Rechnungen und Messungen in den meisten Fällen nur relativ miteinander verglichen. Mit dem Forschungs-Elektronenbeschleuniger der PTB steht uns jedoch eine einzigartige Strahlungsquelle zur Verfügung, deren Elektronenstrahl genau charakterisiert werden kann. Mit verschiedenen Geräten für die Strahldiagnose können der geometrische Querschnitt, die Pulsladung und die spektrale Fluenz des Elektronenstrahls bestimmt werden (Bild 2).

Bild 2: Im dargestellten Teil der Strahlführung, der sich an die Beschleunigungsstrecke für die Elektronen (hinter der Wand rechts) anschließt, sind folgende Geräte für die Strahldiagnose eingebaut: Strahlprofilmonitore: #1, #4, #6; Strahlstrommonitore: #2 und #5; Magnetspektrometer: #3.



Das Benchmark-Experiment wurde für hochenergetische Photonenstrahlung konzipiert. Zur Umwandlung der primären Elektronenstrahlung in Photonenstrahlung wurde ein Bremsstrahlungstarget eingesetzt. Die Eigenschaften des Targets, wie die Zusammensetzung und Dichte des Materials, sowie die Dicke des Targets, die Einfluss auf die Höhe der Dosis nehmen können, wurden ebenfalls genau ermittelt.

Die Erfassung der Energiedosis erfolgte mit zwei Ionisationskammern verschiedenen Typs, die zentral in einem Phantom aus wasseräquivalentem Kunststoff in rund 2 m Abstand zum Bremsstrahlungstarget platziert wurden. Bei den Kammern handelt es sich um Graphit-Hohlraumkammern, die eigentlich zur Ermittlung der Luftkerma in Gammastrahlungsfeldern eingesetzt werden. Die Kammern wurden als Dosisdetektoren gewählt, da deren Aufbau und Volumen sehr genau bekannt sind.

Für die Strahlungstransportrechnungen wurde das in der Dosimetrie und Strahlentherapie etablierte Monte-Carlo-Programm EGSnrc verwendet. Das experimentelle Ergebnis und das Resultat der Simulation wurden für beide Ionisationskammern absolut verglichen. Unter Berücksichtigung der jeweiligen relativen Unsicherheit, die für das Benchmark-Experiment ca. 0,7 % und für die Monte-Carlo-Simulation ca. 1,0 % beträgt, stimmen die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation und des Experiments in beiden Fällen überein.

Kann die Messung der elektrischen Leitfähigkeit der DNS zur Entwicklung biologisch relevanter Strahlungsmessgrößen dienen?

Die biologische Wirkung ionisierender Strahlung wird heutzutage über mehr oder weniger komplizierte Messverfahren und Modelle ermittelt. Das DNS-Dosimeter-Projekt erforscht, inwieweit sich DNS-Stränge als Dosimeter eignen, um auf direkte Weise Aussagen über die biologische Strahlenwirkung treffen zu können.

Das Prinzip der Messung beruht darauf, dass sich bei einer strahleninduzierten Veränderung oder Zerstörung der DNS ihre elektrische Leitfähigkeit ändert. Ein mögliches Dosimeter wäre eine Parallelschaltung sehr vieler DNS-Stränge, sodass anstelle der absorbierten Energiedosis eine Änderung der Gesamtleitfähigkeit gemessen wird, die im Verhältnis zur Anzahl der durch die Bestrahlung hervorgerufenen Strangbrüche der DNS steht. Idealerweise wäre somit ein Messsystem verfügbar, das einen direkteren Bezug der biologischen Wirkung ionisierender Strahlung auf lebende Organismen hätte als konventionelle Messgeräte.

Bisher wurden mehr als 20 DNS-Proben bezüglich ihres Impedanz- und Phasenverhaltens bei Frequenzen zwischen etwa 10 Hz und 120 kHz untersucht. Die Proben bestehen aus Mikrochips, auf denen je ein DNS-Molekül zwischen zwei Mikroelektroden mit einem Abstand von ca. 12 Mikrometern aufgehängt ist. Ein solcher Mikrochip ist in Bild 3 gezeigt. Die Länge des DNS-Moleküls entspricht einer Anzahl von circa 50 000 Basenpaaren. Die Messung erfolgte unter Zuhilfenahme

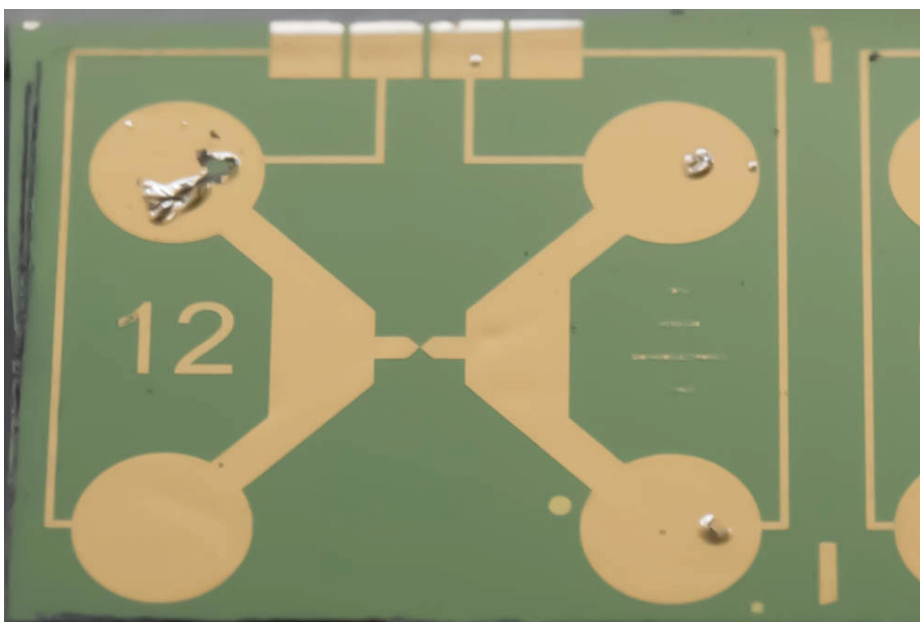


Bild 3: Foto eines DNS-Mikrochips. Die DNS befindet sich zwischen den beiden Spitzen in der Mitte des Mikrochips.

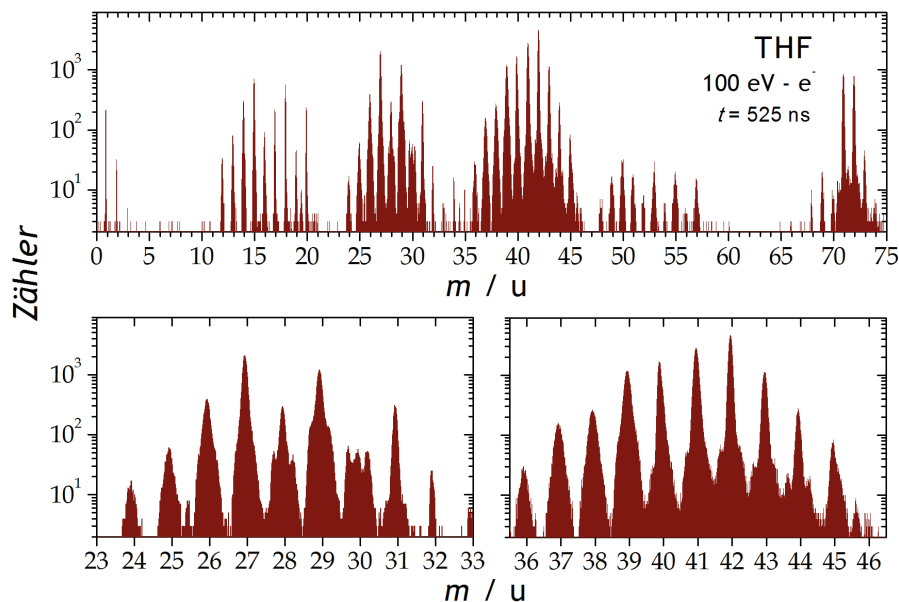


Bild 4: Im oberen Diagramm ist das Massenspektrum von THF unter 100-eV-Elektronenbeschuss zu erkennen. In den darunter liegenden Diagrammen sind Massenbereiche ausgewählt, bei denen mit den Strukturen auf den Fragmentlinien bei den Massen 28 u, 29 u und 30 u im linken sowie 41 u, 42 u, 43 u und 44 u im rechten Diagramm mehrere Fragmentierungskanäle zur Erzeugung dieses Fragments identifiziert werden können.

eines Frequenzgenerators, der eine definierte Spannung (typischerweise 1 V) mit bestimmter Frequenz der Probe anlegt. Die Stärke des dabei fließenden Stroms sowie die Phasenverschiebung zum Spannungssignal werden von einem Lock-In-Verstärker gemessen. Um den Einfluss der Messapparatur zu quantifizieren, wurde auch das Impedanz- und Phasenverhalten eines Mikrochips, auf den keine DNS aufgebracht wurde, gemessen.

Erste Ergebnisse zeigen, dass sich der Frequenzgang einer zunächst intakten DNS-Probe nach Zerstörung durch einen Hochspannungspuls jenem der Probe ohne DNS annähert. Insofern ist die gewählte Methode in der Lage, eine intakte von einer zerstörten DNS-Probe zu unterscheiden. Versuche, in denen die Proben definierten Bestrahlungen durch radioaktive Quellen ausgesetzt werden, sind derzeit in der Durchführungsphase.

Die Forschung wird durch die Europäische Union im Rahmen des European Metrology Research Programs (EMRP) gefördert.

Fragmentierungskanäle von DNS-Bausteinen

Spurstruktursimulationen bilden die Grundlage zur Bestimmung nanodosimetrischer Größen, z. B. der Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Ionisationen, welche durch ein energetisches Teilchen beim Durchdringen eines gegebenen Volumens erzeugt werden. Mehr als zwei Ionisationen in einem DNS-äquivalenten Volumen werden dabei bisher stets als ein Doppelstrangbruch gewertet.

Ob ein Strangbruch auftritt, hängt jedoch davon ab, ob in der molekularen Baugruppe der DNS

(Desoxyribonukleinsäure), in der die Ionisierung erfolgt, diese auch zur Fragmentierung des Targetmoleküls führt. Es wurde deshalb damit begonnen, die Wirkungsquerschnitte für die Fragmentierung von molekularen Bausteinen der DNS nach Ionisierung experimentell zu bestimmen. Die Fragmentierungskanäle, die einen Strangbruch zur Folge haben, können aus diesen Messungen anhand ihrer charakteristischen Aufbruchenergie identifiziert werden.

Zur Bestimmung dieser Reaktionskanäle wurden sowohl am neu aufgebauten Fragmentierungsexperiment an der PTB als auch am Impulsspektrometer der Universität Frankfurt/Main Messungen der Flugzeitverteilung von Fragmenten der Biomoleküle Pyrimidin und Tetrahydrofuran durchgeführt, ausgewertet und miteinander verglichen.

Die Messungen an Pyrimidin (Py) als DNS-Basensurrogat wurden an der PTB mit Elektronen der Energie 100 eV, in Frankfurt mit Protonen der Energie 300 keV durchgeführt. Die Analyse der Daten zeigt, dass das Mutterion $C_4H_nN_2^+$ ($n \leq 4$) mit einer Wahrscheinlichkeit von 15 % auftritt und die verbleibenden Kanäle in diesem Energiebereich als Folge von Einfachionisationen auftreten. Einige Kanäle, die zu den Fragmentmassen 28 u und 52 u führen, scheinen hingegen durch die Coulombexplosion zu entstehen, welche aus Zweifachionisation folgt.

Für Tetrahydrofuran (THF), Modellsubstanz für das Zuckermolekül des DNS-Rückgrates, stehen bisher ausschließlich die an der PTB gemessenen Daten zur Verfügung. Die Auswertung der Daten zeigt, dass nur 4 % aller Fragmentierungsereignisse in der

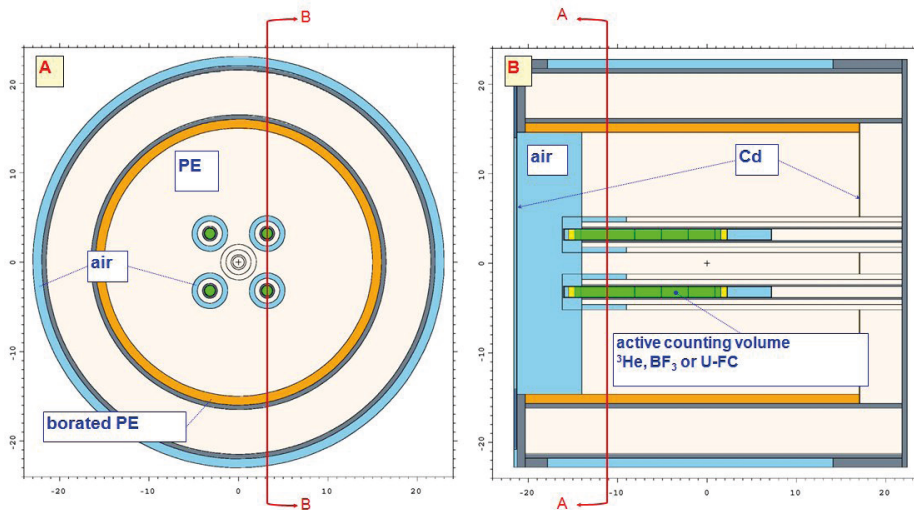


Bild 5: Quer- und Längsschnitt durch einen der Neutronenmonitore

Erzeugung des Mutterions münden, siehe Bild 4. Aus der Struktur des THF folgt, dass die meisten Fragmentierungskanäle einen Strangbruch verursachen.

Neutronenmonitore für das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X

Der Stellarator Wendelstein 7-X, der gegenwärtig im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Greifswald entsteht, soll die Eignung von Fusionsanlagen dieses Typs zur Energieerzeugung demonstrieren. Im Sommer 2015 soll in dieser Anlage das erste Plasma gezündet werden. Die PTB hat im Rahmen eines Kooperationsvertrages mit dem IPP ein Monitorsystem entwickelt, das die gesamte Neutronenstrahlung misst, die beim Betrieb der Maschine entsteht.

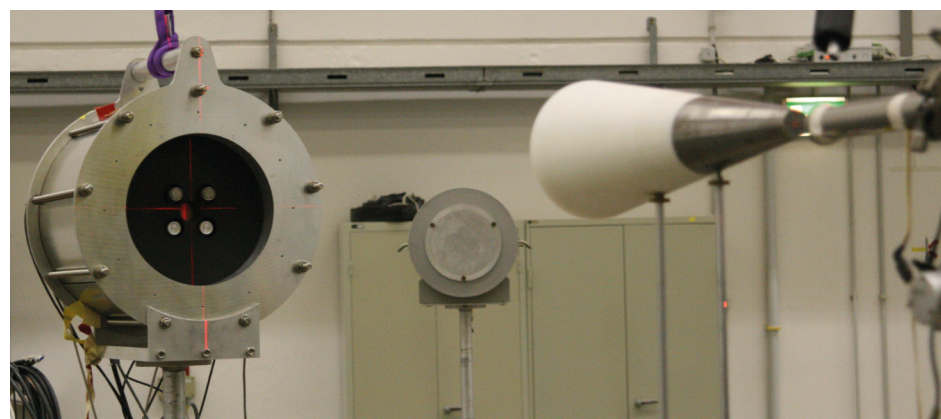
Die Neutronenmonitore haben die Aufgabe, die Erzeugung von Neutronenstrahlung beim Betrieb von Wendelstein 7-X (W7-X) zu überwachen und nachzuweisen, dass die nach der Betriebsgenehmigung erlaubte Jahresgrenze der Neutronenproduktion nicht überschritten wird. Außerdem wird die zeitaufgelöste Neutronen-Fluenzrate benötigt, um wichtige Erkenntnisse über physikalische Vorgänge

im Fusionsplasma zu erhalten. Die gemessene Neutronen-Fluenzrate ermöglicht – die entsprechende Kalibrierung der Neutronenmonitore vorausgesetzt – die Messung der Fusionsrate und der dabei erzeugten Energie. Darüber hinaus erlaubt dies Rückschlüsse auf die Iontemperatur im Plasma.

Aus Kostengründen wurde das ursprüngliche Konzept mit sechs Monitoren auf drei Monitore reduziert. Wesentliche Kriterien beim Design der Monitore waren eine möglichst geringe Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens und eine auf die Haupt-Einfallrichtung der Neutronen angepasste Richtungsabhängigkeit. Dadurch sollte der Einfluss der Streuung von Neutronen möglichst gering gehalten werden. Zusätzlich muss die Überwachung der Neutronenproduktionsrate über einen dynamischen Bereich von mindestens sechs Größenordnungen möglich sein. Diese Anforderungen wurden durch einen Aufbau realisiert, bei dem in einem Moderator aus Polyethylen mehrere Detektoren mit unterschiedlichem Ansprechvermögen eingebaut sind. Das konkrete Design wurde mit Neutronentransportrechnungen optimiert (Bild 5).

Die drei Monitore wurden in den Referenzstrahlungsfeldern der PTB kalibriert. Im Bild 6 ist rechts

Bild 6: Einer der Neutronenmonitore (links) bei der Kalibrierung mit monoenergetischen Neutronen.



vorne (unscharf) das Target zur Neutronenerzeugung zu sehen. Zwischen Target und Neutronenmonitor (links im Bild) befindet sich ein Schattenkegel, der die direkten Neutronen abschirmt. Damit wird der Beitrag von gestreuten Neutronen zum Messsignal bestimmt. Um die vier Zählrohre sichtbar zu machen, wurde für das Foto die vordere Abdeckung des Monitors entfernt.

Zusätzlich wurde mit dem hochintensiven Neutronenstrahl das Totzeitverhalten der verschiedenen Detektoren in den Monitoren untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Proportionalzählrohre vom Typ ^3He und BF_3 jeweils bis zu Zählraten von $2 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$, die Ionisationskammern mit Kathoden aus ^{235}U bis zu Zählraten von $1 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ benutzt werden können. Damit kann der geforderte dynamische Bereich der Neutronen-Fluenzrate von den Monitoren abgedeckt werden.

Radiologische Frühwarnsysteme in Europa

Der Reaktorunfall in Fukushima-Daiichi am 11. März 2011 infolge eines sehr schweren Erdbebens und eines damit einhergehenden Tsunamis hat auch in Europa die Diskussion über die friedliche Nutzung der Kernenergie und ihrer möglichen Risiken neu entfacht. Bereits als Folge der Havarie des Reaktorblocks IV in Tschernobyl im Jahr 1986 haben alle Mitgliedstaaten der Europäischen Union flächendeckende radiologische Frühwarnsysteme aufgebaut. Die radiologischen Daten der insgesamt etwa 5000 Frühwarnmessstationen in Europa werden an ein zentrales Datenverarbeitungssystem der Europäischen Kommission übermittelt.

Sowohl die mithilfe von Luftstaubsammlern gemessenen Aktivitätskonzentrationen als auch die gemessenen Ortsdosisleistungen weisen insbesondere über Ländergrenzen hinweg Inkonsistenzen auf, die auf unterschiedliche Mess- und Auswertemethoden in den verschiedenen Staaten zurückzuführen sind. Im Rahmen des EMRP-Vorhabens „Metrology for radiological early warning networks in Europe“ arbeiten seit Juni 2014 insgesamt 16 Institutionen in Europa an einer Harmonisierung der radiologischen Daten aus den heutigen Frühwarnsystemen, indem Standardverfahren und -methoden definiert werden sollen. Zudem ist geplant, neue Detektoren und Messsysteme zu entwickeln und zu erproben. Statt einfache Dosimetriesysteme zu betreiben, sollen zukünftig kompakte spektrometrische Instrumente installiert werden, die nicht nur eine zuverlässigere Messung der Ortsdosisleistung erlauben, sondern zusätzlich in Echtzeit Informationen über

die Radionuklid-Zusammensetzung liefern, was im Falle eines radiologischen Zwischenfalls von sehr großem Wert wäre. Für die Messung der luftgetragenen Radioaktivität werden Neuentwicklungen im Bereich der Luftstaubprobensammler, insbesondere zur Verkürzung der Messzyklen sowie zur technischen Verbesserung der Messsysteme und die Entwicklung schnellerer radiochemischer Methoden angestrebt.

10 Jahre Zwischenlager des FMRB

In den Vorschriften zum Betrieb des Zwischenlagers der radioaktiven Abfälle aus dem Rückbau des Forschungs- und Messreaktors Braunschweig (ZL FMRB) ist festgelegt, dass erstmalig 10 Jahre nach Inbetriebnahme des ZL FMRB und dann jeweils in weiteren 10-jährigen Abständen ein zusammenfassender Bericht über die durchgeführten regelmäßigen Kontrollen zu erstellen und an die Aufsichtsbehörde zu leiten ist. In diesem Bericht ist auch der Zustand des Lagergebäudes, der Ausrüstung und der für die Zwischenlagerung erforderlichen Komponenten darzustellen sowie eine Prognose über die weitere Lagerfähigkeit der Gebinde zu erstellen. Der Bericht wurde erstellt und an das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz übersandt.

Zusammenfassend wird dort dargestellt, dass der Sachverständige bei den jährlichen Prüfungen keine Mängel festgestellt hat. Gegen den Weiterbetrieb des Zwischenlagers bestehen aus sicherheitstechnischer Sicht keine Bedenken. Der Zustand des Lagergebäudes sowie der Ausrüstung und der für die Zwischenlagerung erforderlichen Komponenten ist unverändert gut. Weder durch die durch den Sachverständigen begleiteten jährlichen allseitigen Sichtprüfungen der Gebindeoberflächen der Referenzgebäude auf Beschädigung und ausgetretenes Material noch durch die regelmäßigen Sichtkontrollen der gestapelten Gebinde wurden Beschädigungen der Gebinde durch Korrosion oder andere Einwirkungen festgestellt. Die weitere Lagerfähigkeit der Gebinde ist aus heutiger Sicht für die Zeit bis zu ihrem Abtransport sichergestellt. Der Abtransport der Gebinde ist vor dem Hintergrund der berechneten Abklingzeit der Abklingabfälle derzeit frühestens für 2035 zu erwarten.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Genau Aktivitätsmessungen an ^{36}Cl -Proben widerlegen eine Abhängigkeit der Zerfallsrate vom Abstand zwischen Erde und Sonne

In der PTB wurde die Aktivität von Chlor-36 mittels der TDCR-Methode über einen Zeitraum von mehr als 3 Jahren gemessen, um mögliche jahreszeitliche Abhängigkeiten zu erkennen. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der Abstand zur Sonne keinen signifikanten Einfluss auf die Zerfallsrate hat. Veröffentlichungen anderer Autoren, die über eine solche Abhängigkeit berichten, werden damit widerlegt. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

Benchmark-Experiment zur Verifikation von Strahlungstransportrechnungen für die Dosimetrie in der Strahlentherapie abgeschlossen

Am Forschungsbeschleuniger der PTB wurde ein Benchmark-Experiment zur Verifikation von Monte-Carlo-Simulationsrechnungen zum Strahlungstransport durchgeführt. Dazu mussten grundlegende Eigenschaften des Elektronenstrahls des Beschleunigers ermittelt werden und das Experiment in der Monte-Carlo-Simulation präzise modelliert werden. Die Ergebnisse der Messung und der Monte-Carlo-Simulation stimmen im Rahmen einer Messunsicherheit von ca. 1,0 % überein. (F. Renner, FB 6.2, franziska.renner@ptb.de)

Nichtinvasive Bestimmung der Röntgenspektren und Formfilter in einem Computertomografen

Die PTB verfügt über einen eigenen medizinischen Computertomografen (CT) für Forschungs- und Entwicklungsaufgaben im Bereich der Dosimetrie in der CT. Im vorliegenden Bericht werden experimentelle Methoden und theoretische Berechnungen vorgestellt, mit deren Hilfe die Photonenfluenzspektren der integrierten Röntgenröhre und die Geometrie der Formfilter charakterisiert wurden. (B. Alikhani, FB 6.2, babak.alikhani@ptb.de)

Experimentelle Bestimmung von Massenschwächungskoeffizienten von Phantommaterialien für Photonenergien zwischen 7 keV und 30 keV

Massenschwächungskoeffizienten sind eine elementare physikalische Größe für die Absolut- und Referenzdosimetrie. Die Werte sind in verschiedenen semiempirischen und theoretischen Datenbasen tabelliert. Dabei existieren Abweichungen zwischen den Datenbasen, und eine de-

taillierte Untersuchung der Unsicherheiten in den verschiedenen Energiebereichen fehlt. Im Zusammenhang mit der Darstellung und Weitergabe der Einheit Wasserenergiedosis $D_{w,1\text{cm}}$ für niederenergetische I-125-Brachytherapiequellen und für Miniaturröntgenröhren wurde ein experimenteller Aufbau zur Messung von Massenschwächungskoeffizienten für Photonenergien zwischen 7 keV und 30 keV in der Dosimetrie für die Strahlentherapie gebräuchlichen Phantommaterialien realisiert. Neben der Untersuchung verschiedener Kunststoffe wurden auch Messungen an Wasser durchgeführt, um die Verhältnisse der Schwächungskoeffizienten direkt bestimmen zu können. (D. Radeck, FB 6.2, desiree.radeck@ptb.de, U. Ankerhold, FB 6.2, ulrike.ankerhold@ptb.de)

Konstruktion und Fertigung einer TCAP-Streukammer

Zur Bestimmung der Fluenz monoenergetischer Neutronen mit der time correlated associated particles Methode (TCAP) wurde eine massearme Streukammer entwickelt und gefertigt. Diese soll an der Ionen-Beschleunigeranlage PIAF der PTB betrieben werden. (H. Drösemeyer, FB 5.5, holger.droese-meyer@ptb.de; R. Nolte, FB 6.4, ralf.nolte@ptb.de)

PTB entwickelt Neutronenmonitore für das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X

Der Stellarator Wendelstein 7-X, der gegenwärtig im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Greifswald entsteht, soll die Eignung von Fusionsanlagen des Typs „Stellarator“ zur Energieerzeugung demonstrieren. Die PTB hat im Rahmen eines Kooperationsvertrages mit dem IPP ein Monitorsystem entwickelt, das die Neutronenstrahlung misst, die beim Betrieb der Maschine entsteht. Die Monitore wurden fertiggestellt und in den Referenzstrahlungsfeldern der PTB kalibriert. (H. Schuhmacher, FB 6.4, helmut.schuhmacher@ptb.de)

Entwicklung einer Bayes'schen Methode zur Bestimmung der Reponsematrix von einkristallinen Diamant-Detektoren

Detektoren aus künstlich hergestelltem einkristallinem Diamant bieten für die Neutronenspektrometrie einzigartige Möglichkeiten. Zur Bestimmung der Responsematrix dieser Detektoren wurde eine Bayes'sche Methode entwickelt, die eine Interpolation mit radialen Basisfunktionen mit Methoden der

Signal-Untergrundtrennung kombiniert und dabei Ergebnisse von Messungen und Simulationsrechnungen berücksichtigt. (M. Reginatto, FB 6.4, marcel.reginatto@ptb.de)

Stabilität der Antwortfunktion von Diamantdetektoren mit Neutronen und Ionen

Mit Detektoren aus künstlich hergestelltem ein-kristallinem Diamant wurden Experimente an der Ionenbeschleunigeranlage der PTB durchgeführt. Die Stabilität der Antwortfunktion der Detektoren, die entscheidend für eine zuverlässige Neutronenspektrometrie z. B. an Fusionsanlagen ist, wurde mit 14-MeV-Neutronen und mit verschiedenen Ionen-sorten am Mikro-Ionenstrahl der PTB untersucht. Damit konnten die Ladungssammelungsprozesse im Volumen und am Rand des Kristalls im Detail untersucht werden. (M. Zboril, FB 6.4, miroslav.zboril@ptb.de)

Bestimmung der Fragmentierungskanäle von DNS-Bausteinen aus Flugzeitmessungen

Aus der Berücksichtigung der chemischen Struktur bei der Auswertung von Flugzeitmessungen der Stoffe Pyrimidin und Tetrahydrofuran nach Einwirkung ionisierender Strahlung lassen sich Fragmentierungskanäle ermitteln. (A. Arndt, FB 6.6, alexander.arndt@ptb.de)

Elektronenwechselwirkungsquerschnitte von Stickstoff und Propan

Ionisierungs- und Elektronenstreuquerschnitte der gewebeäquivalenten Gase Stickstoff und Propan wurden gemessen. (W. Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

Elektronenstreuquerschnitte von Wasser und DNA-Molekülen

Auf Basis von gemessenen Daten wurden Streuquerschnitte für die Wechselwirkung von Elektronen mit den DNA-Modell-Molekülen Tetrahydrofuran, Trimethylphosphat und Pyrimidin entwickelt. Diese weisen signifikante Unterschiede zu denen von Wasser auf, das konventionell als biologisches Medium in Simulationsrechnungen verwendet wird. (M. Bug, FB 6.6, marion.bug@ptb.de)

Simulationen von Elektronenspuren in DNA-Medium

Spurstruktursimulationen niederenergetischer Elektronen in einem DNA-ähnlichen Medium wurden erstmalig mit auf experimentellen Daten basierenden Streuquerschnitten durchgeführt. (M. Bug, FB 6.6, marion.bug@ptb.de)

Neues Experiment zur Messung der Wirkungsquerschnitte für die Ionisierung von DNA-Bestandteilen durch leichte Ionen

Im Rahmen des EMRP-Projekts „BioQuaRT“ wurde Experiment aufgebaut, um Wirkungsquerschnitte für die Ionisierung von DNA-Bestandteilen durch Protonen und Heliumionen mit Energien im Bereich des jeweiligen Bragg Peaks zu messen. (T. Buhr, FB 6.6, ticia.buhr@ptb.de)

Spurstrukturen von Kohlenstoffionen in nanometrischen Volumina

Die Häufigkeitsverteilungen der Ionisationsclustergrößen für Kohlenstoffionenstrahlen verschiedener Energien in 1,2 mbar N₂ und 1,2 mbar C₃H₈ wurden in Abhängigkeit vom Abstand der Teilchenspur zur zentralen Achse des Zielvolumens gemessen. (G. Hilgers, FB 6.6, gerhard.hilgers@ptb.de)

Erste Abbildung der ortsabhängigen Nachweiswahrscheinlichkeit des PTB-Nanodosimeters

Die Häufigkeitsverteilungen von Ionisationsclustern in Abhängigkeit von der Teilchenspur in zwei Dimensionen wurden gemessen. Der Wert der mittlere Clustergröße $M_1(d, h)$ spiegelt die Größe der Nachweiswahrscheinlichkeit an der jeweiligen Position wider und bildet damit das Targetvolumen ab. (G. Hilgers, FB 6.6, gerhard.hilgers@ptb.de)

Kann die Messung der elektrischen Leitfähigkeit der DNS zur Entwicklung biologisch relevanter Strahlungsmessgrößen dienen?

Erste Messungen an Schaltungen aus DNS-Strängen von 50 000 Basenpaaren deuten auf eine messbare elektrische Leitfähigkeit hin. (S. Sellner, FB 6.6, stefan.sellner@ptb.de)

Implementierung von Elektronen-Streuquerschnitten für orientierte Wassermoleküle für die Berechnung der Spurstruktur

Die Auswirkung der Veränderung der Wassermolekülpolarisation auf die Elektronenstreuquerschnitte wurde mit Kovarianzmatrizen modelliert. (H. Szymanowski, FB 6.6, hanitra.szymanowski@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Ermittlung eines Strahlungsqualitäts-Korrektionsfaktors für Schacht-Ionisationskammern zur Bestimmung der Dosisleistung von Cobalt-60-Brachytherapie-Strahlungsquellen

Es wurde das Ansprechvermögen von Schacht-Ionisationskammern für Iridium-192- und Cobalt-60-HDR-Brachytherapie-Strahlungsquellen bestimmt. Aus deren Quotienten konnte ein kam-

mertypspezifischer Strahlungsqualitäts-Korrektionsfaktor ermittelt werden, der es erlaubt, die Dosisleistung von Cobalt-60-Quellen mit einer für Iridium-192 kalibrierten Schacht-Ionisationskammer zu bestimmen. (A. Schüller, FB 6.2, andreas.schueller@ptb.de)

Tomografie mit schnellen Neutronen an der PTB-Beschleunigeranlage PIAF

Bildgebende Durchleuchtungsverfahren mit Neutronen sind zu einem wichtigen Werkzeug in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung geworden. Schnelle Neutronen als Messsonde eröffnen gegenüber den üblichen thermischen Neutronen die Möglichkeit, auch größere Objekte zu durchdringen sowie kompaktere (und damit mobilere) Anlagen zu realisieren. In der PTB wurde eine Tomografieeinrichtung an der Beschleunigeranlage PIAF errichtet und experimentell demonstriert, dass Verteilungen von Objekten geringer Dichte hinter Abschirmungen aus schweren Metallen tomografisch dargestellt werden können. (V. Dangendorf, FB 6.4, volker.dangendorf@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Präzise Aktivitätsbestimmungen von Radium-223 für die Nuklearmedizin

Die PTB hat Aktivitätsbestimmungen von Radium-223 mittels der Flüssigszintillationszählung mit sehr kleinen Unsicherheiten realisiert. Damit kann die PTB nun Kalibriermessungen für Radium-223 anbieten, welches seit Ende 2013 für medizinische Anwendungen in der EU zugelassen ist. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

Nationaler Vergleich zur Aktivitätsbestimmung einer Yttrium-90-Lösung im Bereich der Nuklearmedizin

Bei einem nationalen Vergleich an Aliquoten einer Yttrium-90-Lösung haben sich 19 Teilnehmer aus nuklearmedizinischen Einrichtungen beteiligt. Die Abweichungen der einzelnen Messwerte zum PTB-Referenzwert waren in den meisten Fällen recht gering. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

Exposition von Spektrometern und Dosimetern zur Umgebungsüberwachung in der Radonnormal-Kammer (RNK) im Rahmen von Metro-ERM, ENV57 („Metrology for radiological early warning networks in Europe“) mit Rn-222 und seinen Folgeprodukten

Als größter Bestandteil der natürlichen Radioaktivität haben Radon und seine Folgeprodukte einen großen Einfluss auf die Umgebungs-dosis. Der

Einfluss sich ändernder Aktivitätskonzentrationen von Radon-222 und seinen Folgeprodukten auf verschiedene in der Umgebungsüberwachung eingesetzte Spektrometertypen in Luft wurden in der Radonnormal-Kammer der PTB (RNK) untersucht. (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de)

Messung der Aktivitätskonzentration von Rn-219 in der Atemluft von Patienten

Ausgehend von einer neuen Tumorthherapie mit Ra-223 wurde die Aktivitätskonzentration von Rn-219 in der Atemluft von Patienten untersucht, um ein Risiko für das behandelnde Personal einzuschätzen. Die Größenordnung der in der Atemluft gefundenen Aktivitätskonzentration von Rn-219 (Halbwertszeit 4 s) beträgt einige MBq/m³. Um ein geeignetes Messverfahren zu entwickeln, ist eine stabil emanierende Ra-223-Quelle Voraussetzung. Erste Messungen zeigten, dass eine solche Quelle bei relativen Luftfeuchtigkeiten unterhalb 10 % stabile Emanationsraten liefern kann. (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de)

Ansprechvermögen des Alanin/ESR-Dosimeters für ¹⁹²Ir-Brachytherapie-Strahler bestimmt

Das Ansprechvermögen des Alanin/ESR-Dosimeters bezogen auf die Wasser-Energiedosis D_w relativ zu ⁶⁰Co-Strahlung wurde für das in der Brachytherapie häufig verwendete Strahlungsfeld einer ¹⁹²Ir-Quelle bestimmt. Das relative Ansprechvermögen ändert sich aufgrund der niedrigeren Photonen-Energie der ¹⁹²Ir-Strahlung mit der Wassertiefe zwischen 0,976 im Abstand von 1 cm von der Quelle auf 0,956 bei 5 cm Abstand. Die Standard-Messunsicherheit (einschließlich Primärnormal) beträgt ca. 2 %. (T. Hackel, FB 6.2, thomas.hackel@ptb.de, M. Anton, FB 6.2, mathias.anton@ptb.de)

Kooperation mit dem Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum (HIT) auf dem Gebiet der Dosimetrie therapeutisch genutzter Kohlenstoffstrahlen

Bis heute hat die Dosimetrie von Ionenstrahlen mithilfe von Ionisationskammern noch nicht die gleiche Präzision erreicht wie die Dosimetrie von konventionellen, hoch-energetischen Photonenstrahlen. Dies liegt maßgeblich an der relativ großen Messunsicherheit des Π -Faktors, welcher das unterschiedliche Ansprechvermögen von Ionisationskammern auf die verwendete Strahlungsqualität Q (hier: ¹²C) im Vergleich zur Referenzstrahlungsqualität Q_0 (⁶⁰Co) berücksichtigt. Unter Verwendung des transportablen PTB Wasserkalorimeters zur Absolutbestimmung der Wasser-Energiedosis hat sich die PTB in Kooperation mit dem HIT seit

November 2013 zum Ziel gesetzt, den II-Faktor von Ionisationskammern im Kohlenstoffstrahl mit einer relativen Standardmessunsicherheit kleiner 1 % zu bestimmen. Dies würde die Messunsicherheit in der klinischen Dosimetrie von Ionenstrahlung um ungefähr den Faktor 3 reduzieren. (A. Krauss, FB 6.2, achim.krauss@ptb.de, J.-M. Osinga, FB 6.2, julia-maria.osinga@ptb.de)

Verbesserung des Strahlenschutzes durch aktualisierte Anforderungen an Schutzkleidungen und Abschirmungen in der Röntgendiagnostik und Nuklearmedizin

Im Mai 2014 ist die zweite Edition der internationalen Normenreihe IEC 61331 publiziert worden, die unter maßgeblicher Beteiligung und Federführung der PTB entstanden ist. Diese aus drei einzelnen Normen bestehende Reihe definiert Anforderungen, Prüfprozeduren und Kennzeichnungen für Strahlenschutzkleidungen und Abschirmungen. Neu ist, dass nun auch bleifreie Schutzmaterialien durch ein verbessertes Prüfverfahren adäquat berücksichtigt sind. Der Anwendungsbereich der Normen wurde auf Gammastrahlung von Radionukliden erweitert. Erstmals wurden auch Strahlenschutzbrillen mit einbezogen. Die Anwendung dieser Normen bedeutet eine erhebliche Verbesserung des Strahlenschutzes des Personals und der Patienten in der medizinischen Röntgendiagnostik und der Nuklearmedizin. (L. Büermann, FB 6.2, ludwig.bueermann@ptb.de)

274. PTB-Seminar erfolgreich durchgeführt

Am 18. und 19. November 2013 fand in der PTB Braunschweig das 274. PTB-Seminar „Strahlenschutzdosimetrie in gepulsten Strahlungsfeldern – Teil 2“ statt. Über 110 Teilnehmer kamen zusammen, um in 21 Vorträgen über die neusten Entwicklungen im Bereich Strahlenschutzmessungen in gepulsten Strahlungsfeldern und im Bereich Augenlinsendosimetrie zu diskutieren. Die Problematik der Messung derartiger gepulster Strahlung mit elektronischen Strahlenschutzdosimetern war bereits Thema des 234. PTB-Seminars (2007). In diesem Folge-Seminar wurde auf die Entwicklungen seit dieser Zeit eingegangen. (O. Hupe, FB 6.3, oliver.hupe@ptb.de)

INS-Vorhaben „Referenzstrahlungsfelder für gepulste Strahlung“ erfolgreich abgeschlossen

Im Rahmen des „Innovation mit Normen und Standards“-Programms wurde das geförderte INS-Vorhaben „Referenzstrahlungsfelder für gepulste Strahlung“ erfolgreich mit der Erarbeitung der ISO/TS 18090-1 „Radiological protection – Character-

istics of reference pulsed radiation – Part 1: Photon radiation“ abgeschlossen. Die Festlegung von Referenzfeldern ist sowohl für die Entwicklung, Prüfung und Kalibrierung von Strahlenschutz-Dosimetern als auch für die Weiterentwicklung von Strahlungsquellen für den Bereich gepulster Strahlung eine Grundvoraussetzung. (O. Hupe, FB 6.3, oliver.hupe@ptb.de)

Metrologie für radiologische Frühwarnsysteme in Europa

Im Rahmen eines EMRP-Vorhabens mit dem Titel „Metrology for radiological early warning networks in Europe“ (ENV57-MetroERM) arbeiten seit Juni 2014 insgesamt 16 Institutionen in Europa an einer Harmonisierung der radiologischen Daten aus den heutigen radiologischen Frühwarnsystemen, indem Standardverfahren und -methoden definiert werden sollen, um genauere Informationen aus den Messdaten ableiten zu können. Zudem ist geplant, neue Detektoren und Messsysteme zu entwickeln und zu erproben. Einzelheiten in englischer Sprache sind auf folgender Webseite zu finden: www.earlywarning-emrp.eu. (S. Neumaier, FB 6.3, stefan.neumaier@ptb.de)

Bestrahlung von primären Gewebezellen mit Neutronen für das Europäische Forschungsprojekt ANDANTE

Bei der Strahlentherapie mit Protonen oder Schwerionen, aber auch bei Bestrahlungen mit Gammastrahlung hoher Energie kann es im gesunden Gewebe außerhalb vom Tumervolumen zu zusätzlicher Strahlendosis durch Neutronen kommen. Das im 7. Rahmenprogramm der EU geförderte Forschungsprojekt ANDANTE untersucht das Krebsrisiko nach Exposition mit niedrigen Dosen von Neutronen. Die Bestrahlungen von primären Gewebezellen mit Neutronen mit verschiedenen Energien werden an der PTB Ion Accelerator Facility (PIAF) durchgeführt. (U. Giesen, FB 6.4, ulrich.giesen@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

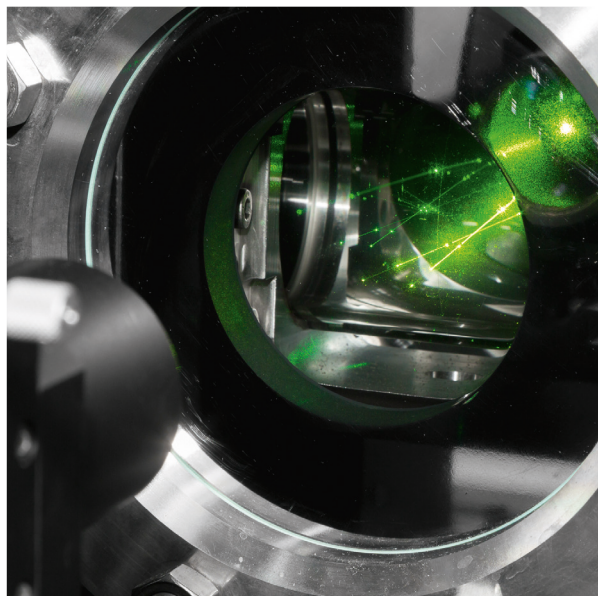
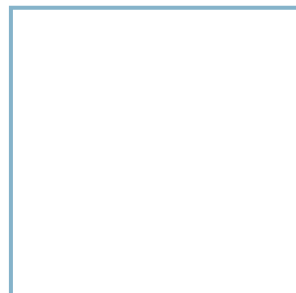
COOMET Project 445: Comparison of national measurement standards of air kerma for Cs-137 gamma radiation at protection level

A COOMET supplementary comparison of the national measurement standards of air kerma for Cs-137 gamma radiation at protection level (~10 mGy/h) was carried out between May 2011 and February 2013. Participants were VNIIM (Russia), BelGIM (Belarus), CPHR (Cuba), GEOSTM (Georgia), INSM (Moldova), NSC-„IM“ (Ukraine),

SMU (Slovakia), PTB (Germany), BIM (Bulgaria), VMT/FTMC (Lithuania) and the International Atomic Energy Agency (IAEA). The PTB acted as the pilot laboratory. (L. Büermann, FB 6.2, ludwig.bueermann@ptb.de)

Abteilung 7

Temperatur und Synchrotronstrahlung



Die Abteilung *Temperatur und Synchrotronstrahlung* konnte neben ihren vielfältigen Dienstleistungen auf den Gebieten *Thermometrie, Radiometrie, Messung thermischer Energie, Vakuum- und Nanometrologie* F&E-Arbeiten weiter erfolgreich ausbauen, meist im Rahmen von Kooperationen und Vorhaben. Für die Nanometrologie, die Radiometrie im kurzwelligen Spektralbereich und die (Mikro-)Spektrometrie wird die Synchrotronstrahlung der Elektronenspeicherringe BESSY II und Metrology Light Source (MLS) in Berlin-Adlershof genutzt.

Ein wichtiger Schritt zur Modernisierung des Campus Charlottenburg war die Entscheidung des Architekten Wettbewerbs für den Neubau eines Tieftemperaturzentrums im Januar 2014. Das neue Labor- und Bürogebäude wird nach dem ehemaligen Mitarbeiter der PTR und weltweit bekannten Physiker Walther Meißner benannt. Es wird optimale Arbeitsbedingungen liefern für die Arbeitsgruppen der Bereiche Kryophysik und Tieftemperaturmetrologie, die zurzeit im Warburgbau untergebracht sind, der nicht saniert werden kann. Baubeginn für den Walther-Meißner-Bau soll im März 2016 sein.

Metrologie mit Synchrotronstrahlung

Neben dem Aufbau einer Instrumentierung zur Oberflächenanalytik für das Avogadro-Projekt zur Neubestimmung der SI-Einheit Kilogramm (siehe Nachrichten des Jahres) konnten sowohl an der MLS als auch im PTB-Laboratorium bei BESSY II

eine Reihe von neuen Messmöglichkeiten geschaffen werden. Der neue Messplatz zur Kalibrierung von Strahlungsquellen an der MLS wurde im Spektralbereich von 7 nm bis 100 nm für Kooperationen im Bereich der Sonnenradiometrie umfassend charakterisiert. Das „Engineering“-Modell des Sonnen-Spektrografen SPICE der ESA-Mission *Solar Orbiter* war bereits im Sommer 2014 Gegenstand einer ersten Untersuchung mit breitbandiger berechenbarer Synchrotronstrahlung (Bild 1).

Am neuen EUV-Scattero-Ellipsometer bei BESSY II (Bild 2) lassen sich jetzt für Dienstleistungen und Forschungsk Kooperationen polarisationempfindliche Reflexionsmessungen mit höherer Dynamik und kleineren Unsicherheiten durchführen.

Umfangreiche Messungen im Rahmen der langjährigen Kooperationen zur EUV-Lithografie fanden im Jahr 2014 insbesondere an speziellen Photomaske statt, mit denen die weltweit führenden europäischen Hersteller von EUV-Belichtungsmaschinen Strukturgrößen auf Halbleiter-Wafern im Bereich von unter 10 nm erreichen wollen. In diesem Zusammenhang stehen auch experimentelle und theoretische Untersuchungen im Rahmen einer Doktorarbeit zur Bestimmung von Oberflächenrauigkeiten von Multilayer-Spiegeln über den Nachweis diffus gestreuter EUV-Strahlung.

Oberflächenuntersuchungen an organischen Schichten im Rahmen von EMRP-Vorhaben stan-

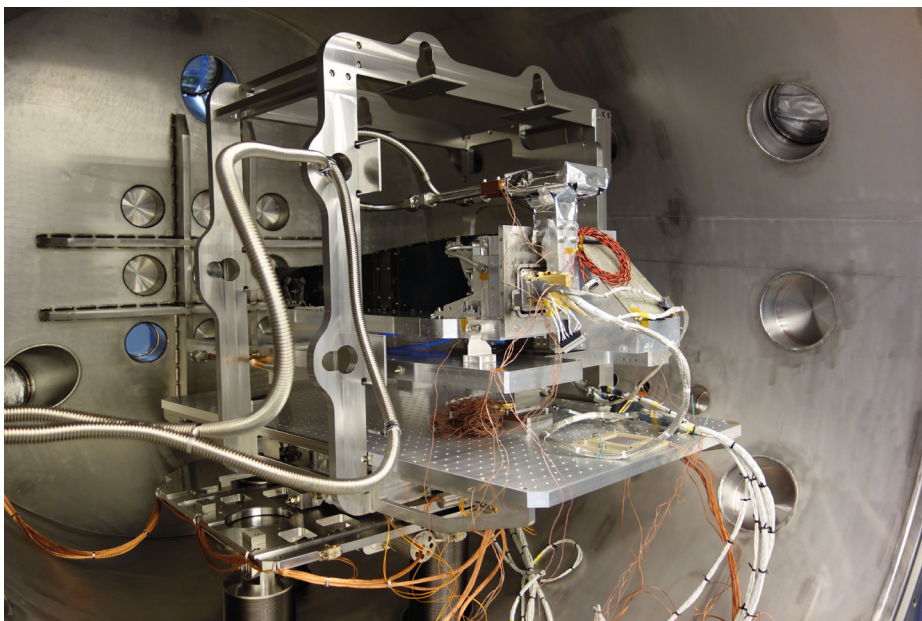


Bild 1: Das „Engineering“-Modell des Sonnen-Spektrografen SPICE im großen Vakuumtank an der MLS vor seiner Charakterisierung im Sommer 2014

Titelbild:

Blick in die Schauglasarmatur des laseroptischen Durchflusssensors an der Wärmehäufigkeitsprüfanlage

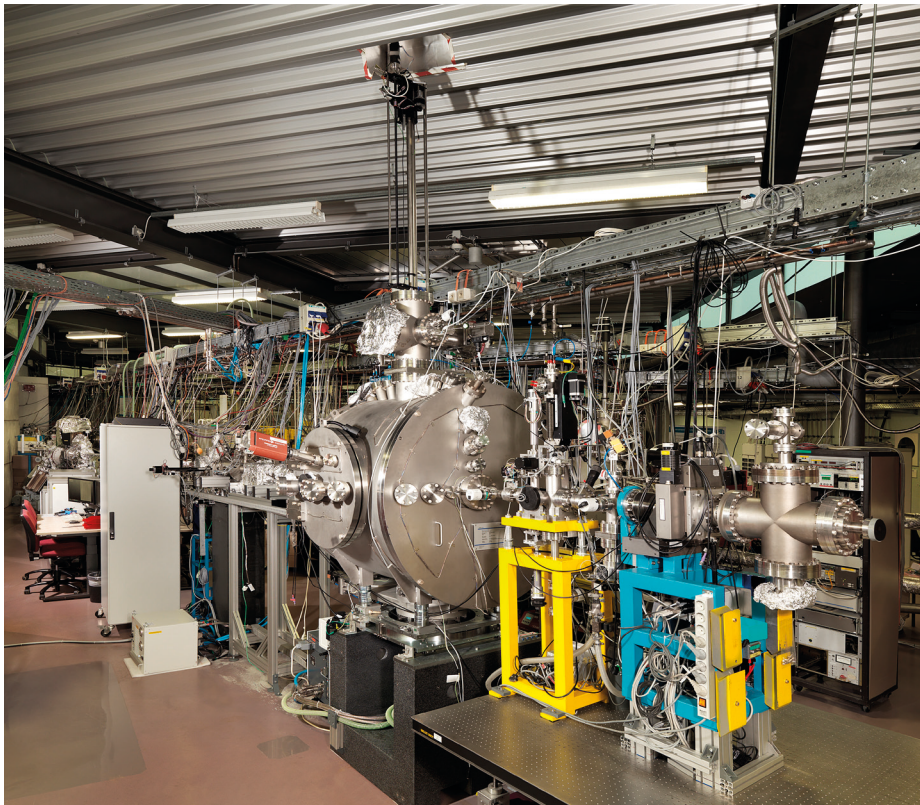


Bild 2: Das neue EUV-Scattero-Ellipsometer bei BESSY II

den sowohl im Vakuum-UV- als auch im Röntgenbereich im Fokus. Mit Elektronenspektroskopie wurden am Undulatorstrahlrohr der MLS strahlungsinduzierte Veränderungen der Bandstruktur von organischen Halbleitern gemessen, die in der Photovoltaik eine große Rolle spielen. Mit Röntgenkleinwinkelstreuung (GISAXS) konnten bei BESSY II im Rahmen einer Doktorarbeit temperaturinduzierte tiefenabhängige Strukturveränderungen in nanostrukturierten Polymerfilmen auf Silizium beobachtet (Bild 3) und die Nanostrukturen von Self-Assembled-Polymergittern mit verringerten Unsicherheiten bestimmt werden.

Im Bereich der Bioanalytik ist eine Analyse von organischen Molekülen in einer flüssigen Umgebung von zunehmendem Interesse. Im Rahmen des EMRP-Projektes HLT04 „BioSurf“ wurde in Kooperation mit dem BLiX (TU Berlin) eine Flüssigkeitszelle entwickelt, die die Untersuchung von Flüssigkeiten im Ultrahochvakuum (UHV) erlaubt. Der Zugang zur Messumgebung kann dabei nur durch ein ultra-dünnes Fenster gewährt werden, welches für die anregende und zu detektierende Strahlung ausreichend transparent ist (Bild 4a). Mit weicher Röntgenstrahlung können insbesondere leichte Elemente wie Kohlenstoff oder Stickstoff und deren Bindungen untersucht werden (Bild 4b). Der Einsatz dieser Flüssigkeitszelle im PTB-Laboratorium bei BESSY II ermöglicht damit die röntgenspektro-

metrische Untersuchung von Flüssigkeiten aus den verschiedensten Anwendungsbereichen.

Für die Unterstützung der Entwicklung neuer Li-S-Batterien mit verbesserter Stabilität der Kapazität über viele Lade- und Entladezyklen im Rahmen eines DFG-Vorhabens wurden bei der PTB spezielle Probenzellen mit nur 1 μm dicken Si_3N_4 -Fenstern entwickelt, welche die röntgenspektrometrische Untersuchung des Kathodenmaterials unter Argonatmosphäre erlauben. Damit konnte die Entstehung von an Luft instabilen Polysulfiden im Kathodenmaterial mittels Röntgenabsorptionsspektrometrie, wie in Bild 5 gezeigt, nachgewiesen werden. Die

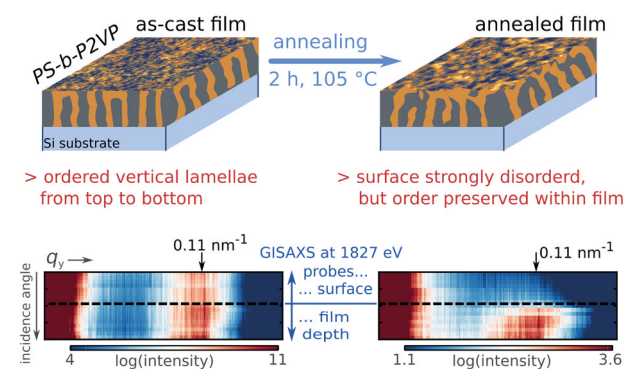


Bild 3: Schematische Darstellung der Umorientierung eines PS-b-P2VP-Block-Co-Polymer-Films durch thermische Behandlung (oben) sowie horizontale Schnitte durch GISAXS-Bilder vor (unten links) und nach (unten rechts) der thermischen Behandlung

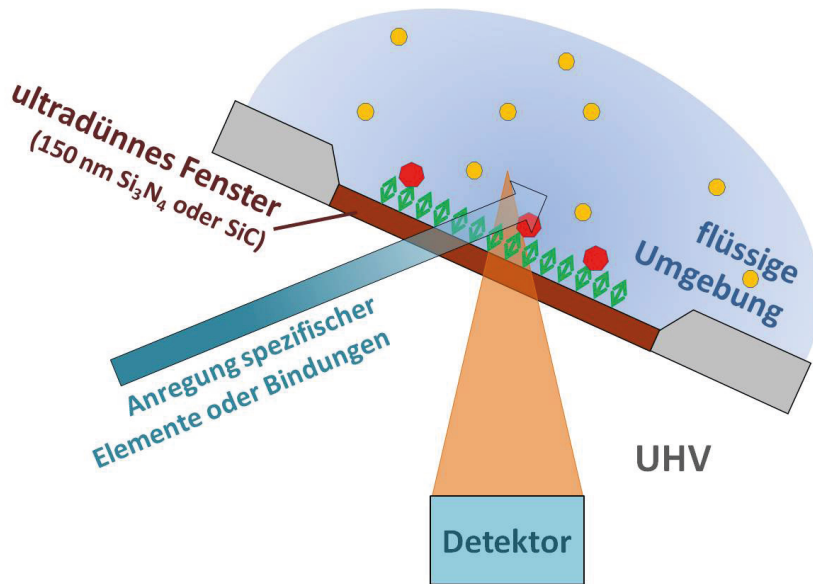


Bild 4a: Die Flüssigkeitszelle ermöglicht die Anregung von Bio-Molekülen in einer Flüssigkeit (gelb) oder gebunden am fest-flüssigen Interface (rot).

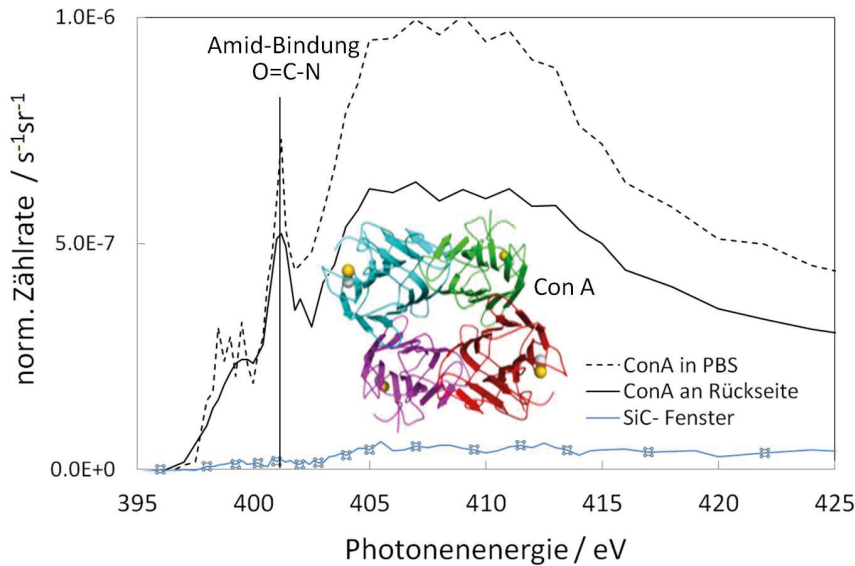


Bild 4b: Untersuchung des Proteins Concanavalin A (ConA) in Flüssigkeit an der Stickstoff-K-Kante mittels Röntgenabsorptionsspektrometrie

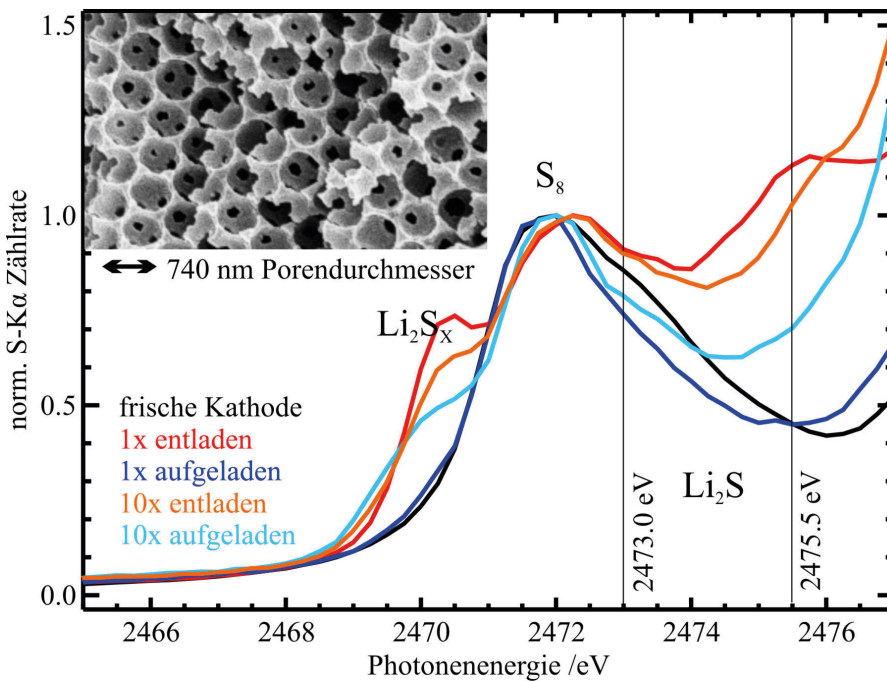


Bild 5: Absorptionsspektrum des porösen Li-S-Kathodenmaterials bei verschiedenen Lade- bzw. Entladezuständen gemessen in Argonschutzatmosphäre. Die Absorptionsresonanz bei 2470 eV zeigt, dass Polysulfide (Li_2S_x) in den Proben vorhanden sind und diese nur anfangs durch das Aufladen der Batterie vollständig wieder abgebaut werden.



Ergebnisse der bei BESSY II durchgeführten Messungen wurden unseren Projektpartnern vom Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V. zur Verfügung gestellt und lieferten wichtige Hinweise über das Verhalten der Polysulfide. Insbesondere hat sich gezeigt, dass die elektrische Verbindung des Schwefels an das Kathodenmaterial erhöht werden muss, um die Reversibilität der elektrochemischen Prozesse zu verbessern.

Vom 26. bis zum 30. Mai 2014 fand in Lille im Rahmen der Frühjahrstagung der European Materials Research Society (E-MRS) das Symposium „Analytical Techniques for Precise Characterization of Nanomaterials“ (ALTECH 2014) statt, welches von Burkhard Beckhoff hauptverantwortlich zusammen mit den britischen, holländischen und tschechischen Staatsinstituten NPL, VSL und CMI sowie dem in Europa führenden Halbleiterforschungsinstitut IMEC aus Belgien organisiert wurde. Das Symposium wurde von rund 150 Teilnehmern besucht. Schwerpunkte bildeten die zuverlässige Charakterisierung und gerichtete Weiterentwicklung verschiedenster technologisch relevanter Nanomaterialien, die den zunehmenden Bedarf an Unterstützung durch fortgeschrittene nanometrologische Verfahren deutlich belegten.

Am IR-Strahlrohr der MLS wurden intensiv Untersuchungen zur FTIR-Spektroskopie und optischen Nahfeldmikroskopie im Rahmen mehrerer noch laufender EMRP-Vorhaben durchgeführt. Dabei wurden u. a. Halbleiternanostrukturen und biomedizinische Proben analysiert.

Kryosensorik

Im Bereich der Fertigung von supraleitenden Sensoren wurde eine neue chlor-basierte Plasmaätzanlage im Warburgbau in Betrieb genommen. Diese Anlage ergänzt die bestehenden Mikrofabrikationseinrichtungen und ermöglicht insbesondere auch die Strukturierung von Aluminium- und Gold/Palladium-Dünnschichten, die zur Herstellung von Supraleitungssensoren benötigt werden.

Bild 6: Teilnehmer an der 27. Sitzung des Beratenden Komitees für Thermometrie (CCT)

Thermometrie

Der internationale Kreis der Temperaturmetrologen traf sich im Mai 2014 zur 27. Sitzung des Beratenden Komitees für Thermometrie in der Meterkonvention (CCT) am BIPM in Paris (Bild 6). Im Zuge der Umsetzung einer strategischen Planung für die nächsten 10 bis 15 Jahre wurde die Struktur des CCT verschlankt und die Anzahl der permanenten Arbeitsgruppen von 10 auf 6 verringert. Die PTB leitet jedoch weiterhin die für die Berührungsthermometrie entscheidende Arbeitsgruppe. Außerdem stellt sie die Vorsitzenden in den „task groups“ für die Realisierung des Kelvin und die Neudefinition der Einheiten. Um auf aktuelle Anforderungen im Bereich der Messtechnik für die Umwelt schneller reagieren zu können, wurde eine eigene „task group“ mit PTB-Beteiligung gegründet.

Die Sitzung des CCT begann mit einem halbtägigen Seminar zu aktuellen Fragen in der Thermometrie. Die PTB war mit einem Überblick zum Stand der Neudefinition der Basiseinheit Kelvin vertreten. Die angestrebte relative, über alle Methoden gemittelte Unsicherheit des zur Neudefinition benötigten Zahlenwerts für die Boltzmann-Konstante von kleiner 10^{-6} wird bereits erreicht. Jedoch weisen Messungen mit einer zweiten unabhängigen Methode noch nicht die erforderliche Unsicherheit auf. Nach der 2014 verabschiedeten Empfehlung des CCT muss diese mindestens bei $3 \cdot 10^{-6}$ liegen, um die Messungen mit akustischer Gasthermometrie bestätigen zu können. Bis zur endgültigen Festlegung der Boltzmann-Konstante im Jahre 2017 sollte auch diese Bedingung erfüllt sein: Hinsichtlich der Unsicherheit der von der PTB verfolgten Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie gelang ein wichtiger Schritt auf diesem Weg. Bei der Druckmessung konnte die Unsicherheit durch sehr sorgfältige und aufwendige Vergleichsmessungen der Kolben-Zylindersysteme halbiert werden. Damit können die elektrischen Messungen mit verbesserten Kondensatoren im nächsten Jahr das Potenzial der Methode vollständig ausreizen.



Bild 7: Isotherme Wärmerohrthermostate mit zentraler Steuerung und Reinstgasversorgung zum Betrieb der als nationale Temperaturnormale verwendeten Fixpunktzellen

Die Basis für die Realisierung, Darstellung und Weitergabe der Internationalen Temperaturskala von 1990, ITS-90, im Hochtemperaturbereich oberhalb 660 °C bis 1085 °C konnte mit der Installation und Inbetriebnahme von vier besonders isothermen Wärmerohrthermostaten sowie weiteren Thermostaten zur Wärmebehandlung der Thermometer wesentlich verbessert werden (Bild 7). Damit soll der steigenden Nachfrage nach hochwertigen Kalibrierungen von Hochtemperatur-Platin-Normalthermometern und Aluminium- und Silber-Fixpunktzellen mit geringen Messunsicherheiten Rechnung getragen werden.

Im Zug eines Gastwissenschaftler-Aufenthalts aus dem chinesischen Staatsinstitut konnten die nationalen Realisierungen der Basiseinheit Kelvin mit kleinsten Unsicherheiten verglichen werden. Der Vergleich ergab eine sehr gute Übereinstimmung innerhalb von 10 μ K, deutlich besser als die kombinierte Unsicherheit der jeweiligen Realisierung. Darüber hinaus wurde die Langzeitstabilität der zur Realisierung verwendeten Wasser-Tripelpunktzellen untersucht. Dabei wurde die Langzeitdrift der vermutlich ältesten funktionsfähigen Tripelpunktzelle aus dem Jahr 1928 (Bild 8) bestimmt. Die Abweichung zur derzeitigen Realisierung des Kelvin beträgt lediglich 1,2 mK und ist ein eindrucksvoller Beleg für die hohe Qualität der damaligen Arbeiten.

Für den Temperaturbereich oberhalb von 1085 °C, in dem die Internationale Temperaturskala über strahlungsthermometrische Methoden definiert ist, werden eutektische Materialien im Rahmen des Hochtemperaturentwicklungsplans des CCT

und des europäischen Forschungsvorhabens „Implementing the New Kelvin“ systematisch auf ihre Eignung als neue Hochtemperatur-Fixpunkte untersucht. Dazu wurden in der PTB radiometrische Temperaturmessungen an den Fixpunktmaterialien Cu, Co-C, Pt-C und Re-C bis zu Temperaturen von 2474 °C durchgeführt, um ihre thermodynamischen Phasenübergangstemperaturen mit geringstmöglicher Messunsicherheit zu bestimmen. Die untersuchten Fixpunktzellen wurden nach umfangreichen internationalen Voruntersuchungen ausgewählt. Die Messungen stellen den Höhepunkt



Bild 8: Im Jahr 1928 in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt von Helmut Moser hergestellte, heute noch funktionsfähige Wasser-Tripelpunktzelle

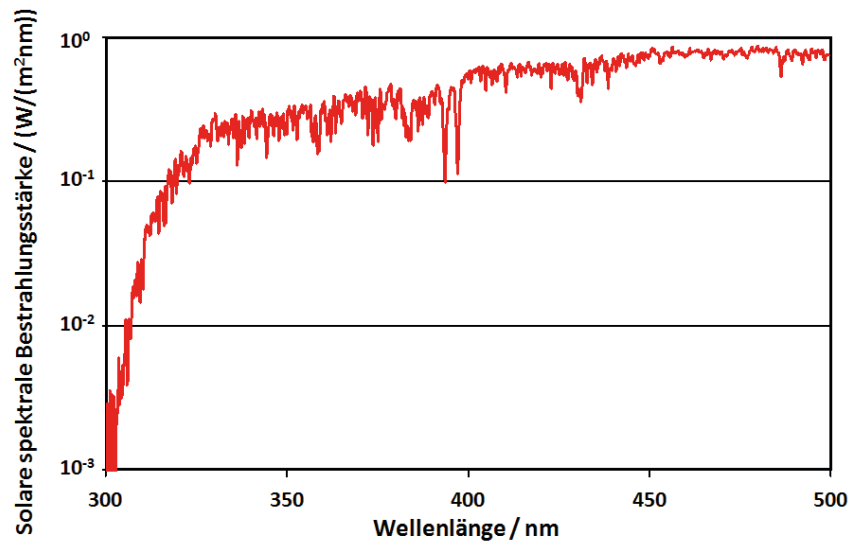


Bild 9: An der PTB Berlin am 3. April 2014 gemessene solare spektrale UV-Bestrahlungsstärke. Die relative Standardmessunsicherheit im Spektralbereich von 310 nm bis 400 nm beträgt 1,6%.

einer über 15-jährigen internationalen Entwicklung und Optimierung der eutektischen Hochtemperatur-Fixpunkte und der radiometrischen Temperaturmessung an diesen in der PTB dar. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden mit der Mise en pratique des Kelvins zu einer deutlichen Verringerung der Messunsicherheit bei der Darstellung und Weitergabe der Hochtemperaturskala führen.

Die Möglichkeit, Temperaturen radiometrisch und damit primärthermometrisch durch absolute Messung der Strahldichte der Temperaturstrahlung zu bestimmen, wurde in der PTB weiter ausgebaut. Auf der Grundlage eines Superkontinuum-Lasers wurde ein Spektralmessplatz für die radiometrische Kalibrierung der spektralen Empfindlichkeit von abbildenden Strahlungsthermometern im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich entwickelt. Als erste Anwendung erfolgte im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens „Novel Techniques for Traceable Temperature Dissemination“ die Kalibrierung eines kommerziellen Infrarot-Strahlungsthermometers mit einer Standardmessunsicherheit, die 75 mK bei einer Temperatur von 500 °C entspricht.

Radiometrie

Die Kalibriermöglichkeiten für Strahlungsdetektoren wurde kundenorientiert gezielt weiter ausgebaut. Die spektrale Empfindlichkeit von Detektor-Sekundärnormalen wurde dazu erfolgreich gegen das neue Detektorprimärnormal der PTB für diese Messgröße, ein mit Laserstrahlung betriebenes Kryoradiometer, im Wellenlängenbereich von 407 nm bis 1004 nm bestimmt. Externe Kunden sowie PTB-interne Anwender aus den Bereichen Strahlungsther-

metrie, Radiometrie und Photometrie können nun auf Kalibrierungen von Strahlungsdetektoren mit einer relativen Standardmessunsicherheit von unter 50 ppm zurückgreifen. Durch die Verwendung eines leistungsstarken Superkontinuum-Lasers am UV- und NIR-Kryoradiometermessplatz konnte darüber hinaus die Messung der spektralen Empfindlichkeit von IR-Strahlungsdetektoren bis zu einer Wellenlänge von 2,4 μm erweitert werden.

Im Rahmen von zwei europäischen Forschungsvorhaben wurden umweltrelevante Messverfahren mit sehr kleiner Unsicherheit auf die radiometrischen Skalen für spektrale Bestrahlungsstärke und spektrale Strahldichte zurückgeführt. Durch das Projekt „SolarUV“, an dem Partner aus 9 Ländern teilnahmen, wurde die Rückführung des europäischen sowie weltweiten Messnetzes zur solaren UV-Bestrahlungsstärke am Erdboden deutlich verbessert. In der PTB wurde hierzu die prinzipielle Nutzbarkeit eines Fouriertransform-Spektroradiometers als schnell messendes Referenzspektrometer gezeigt (Bild 9).

Mit der Bergischen Universität Wuppertal, dem Forschungszentrum Jülich und dem Karlsruher Institut für Technologie wurden im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens „Metrology for Earth Observation and Climate“ die von der PTB vollständig radiometrisch und thermometrisch charakterisierten „In-Flight“-Referenzstrahler des Gimbalbed Limb Observer for Radiance Imaging of the Atmosphere (GLORIA) erfolgreich auf mehreren Flügen von GLORIA mit dem Forschungsflugzeug HALO eingesetzt. Durch die Kalibrierung der Strahler vor und nach der TACTS/ESMVal-Messkampagne von GLORIA können die während die-

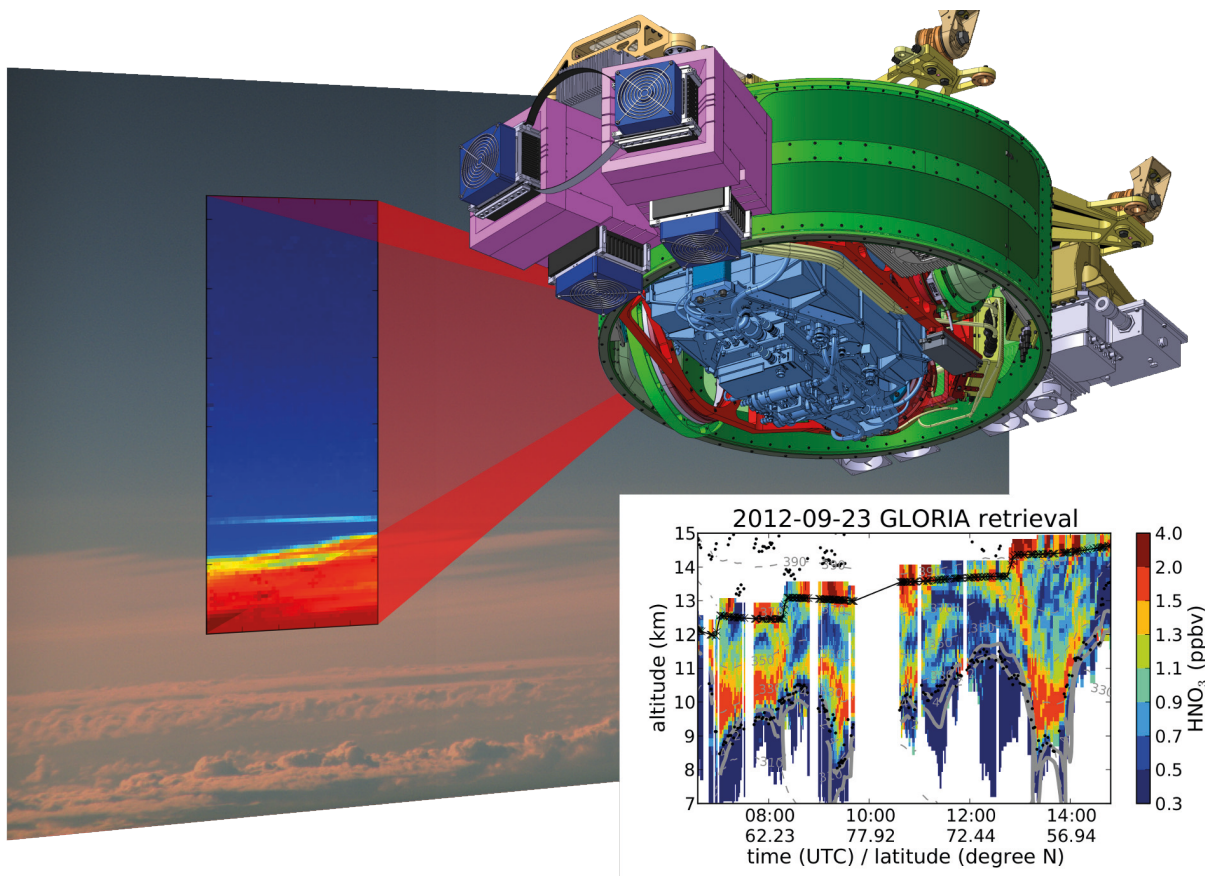


Bild 10: Blick von GLORIA auf eine Wolkenszene, aufgenommen in 14 km Höhe. Das Infrarotbild von GLORIA in Falschfarben (blau, rot) sieht nur einen Ausschnitt der Szene und zeigt hier die im Wellenlängenbereich von 10,5 μm bis 12,5 μm integrierte Strahlung. Treibhausgase lassen sich durch ihre spektrale Signatur identifizieren – so können über den Verlauf eines Fluges Konzentrationsprofile von klimarelevanten Gasen in der Atmosphäre ermittelt werden. Dies ist in der Grafik in der rechten unteren Ecke beispielsweise für Salpetersäure in verschiedenen Höhen im Übergangsbereich zwischen Troposphäre und Stratosphäre und überflogene geografischen Breiten von Süddeutschland bis Nordskandinavien und zurück dargestellt.

ser Kampagne gewonnenen Atmosphären Daten auf die Strahldichteskala rückgeführt werden. So lassen sich die Teilchendichten der klimarelevanten Spurengase aus den spektroskopischen Messungen ermitteln (Bild 10).

Die quantitative Messung von FIR- und THz-Strahlung sowie der optischen Materialeigenschaften in diesem für industrielle und sicherheitstechnische Anwendungen interessant werdenden Spektralbereich wurde weiterentwickelt. Time-Domain-Spektrometer sind in der THz-Spektroskopie weit verbreitet. In einem drittmittelgeförderten Kooperationsprojekt mit einem deutschen Detektorhersteller erfolgte die Entwicklung eines pyroelektrischen THz-Detektors, der bei hoher Nachweisempfindlichkeit bis in den Bereich der Millimeterwellen einsetzbar ist und mit dem erstmalig die Messung der THz-Leistung eines Time-Domain-Spektrometersystems erreicht wurde. Mit ausgerichteten Kohlenstoff-Nanotube-Röhrchen (vertical aligned carbon nano tube arrays – VANTA) beschichtete Oberflä-

chen wurden vom amerikanischen Staatsinstitut NIST als besonders schwarze Absorber mit nahezu vollständiger Strahlungsabsorption vom sichtbaren bis in den THz-Spektralbereich entwickelt. Die verbleibenden optischen Verluste eines VANTA-beschichteten pyroelektrischen Detektors des NIST wurden mit dem Molekülgaslaser der PTB erstmalig bei 1,4 THz bestimmt. Es ergab sich ein bei dieser Frequenz sehr hoher Absorptionsgrad von 0,95. Ein in der PTB insbesondere für die FIR- und THz-Spektroskopie und Radiometrie entwickeltes Transition-Edge-Sensor-(TES)-Bolometer wurde umfassend elektrisch und optisch charakterisiert. Unter anderem konnte mittels Synchrotronstrahlung der MLS gezeigt werden, dass sich der streng lineare Arbeitsbereich des Detektors über vier Größenordnungen erstreckt. Dies stellt eine Verbesserung um mindestens eine Größenordnung gegenüber kommerziell erhältlichen Siliziumkomposit-Bolometern dar (Bild 11).

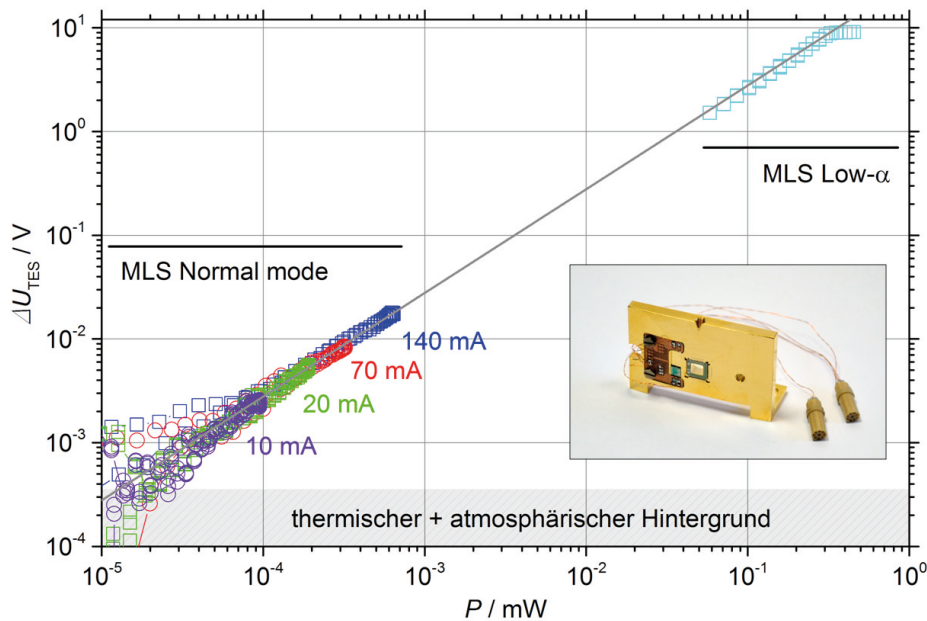


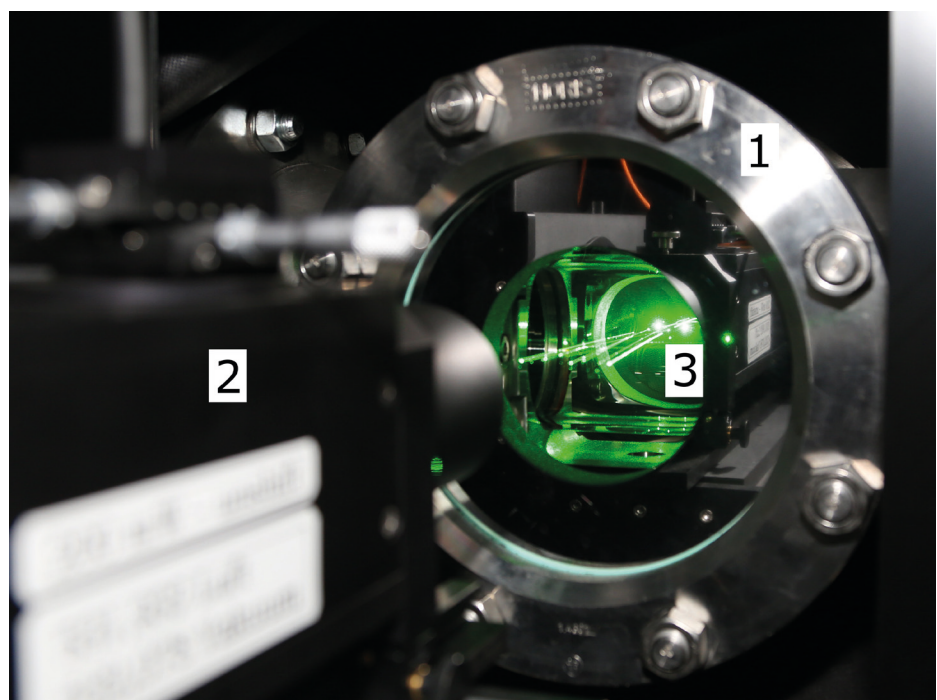
Bild 11: Der über vier Größenordnungen lineare Arbeitsbereich eines in der PTB entwickelten TES-Bolometers für die FIR- und THz-Spektroskopie und Radiometrie (Foto). Der Linearitätsbereich wurde mit der Synchrotronstrahlung der MLS bestimmt, die dazu in zwei verschiedenen Modi (Low- α - und Normalbetrieb) mit verschiedenen Ringströmen betrieben wurde.

Thermische Energie

Es wurde ein laseroptischer Durchflusssensor entwickelt, der mithilfe der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) erstmalig eine rückführbare Volumenstrommessung von Wasser bei Temperaturen bis 230 °C und Drücken bis 40 bar ermöglicht (Bild 12). Dieses neue Messverfahren stößt insbesondere bei den Kraftwerksbetreibern auf erhebliches Interesse. Durchflusssensoren im Kraftwerk können so vor Ort, im eingebauten Zustand und ohne Betriebsunterbrechung kalibriert werden. Auf diese Weise lässt sich der Kraftwerksprozess präziser steuern und die Energieeffizienz des Kraftwerkes deutlich steigern. Der optische Zugang für die LDA wird durch Kom-

bination einer speziell für den Kraftwerksbetrieb zugelassenen Schauglasarmatur mit einem eigens entwickelten Einschub geschaffen. Der Einschub sorgt für eine Konditionierung der Strömung und verbessert so die Messbedingungen. Durch ein neuentwickeltes Verfahren zur Positionsbestimmung des LDA-Messvolumens wurde die Messunsicherheit der LDA deutlich verringert. Ein erster Vergleich des laseroptischen Durchflusssensors mit der gravimetrisch rückgeführten Normalmessanlage der PTB zeigte eine Abweichung des Volumenstromes von weniger als 0,2 %.

Bild 12: Laseroptischer Durchflusssensor: Mithilfe der Schauglasarmatur (1) wird ein optischer Zugang geschaffen. Die LDA-Sonde (2) erzeugt innerhalb der Rohrleitung ein Messvolumen (3), in dem das Geschwindigkeitsprofil gemessen werden kann.



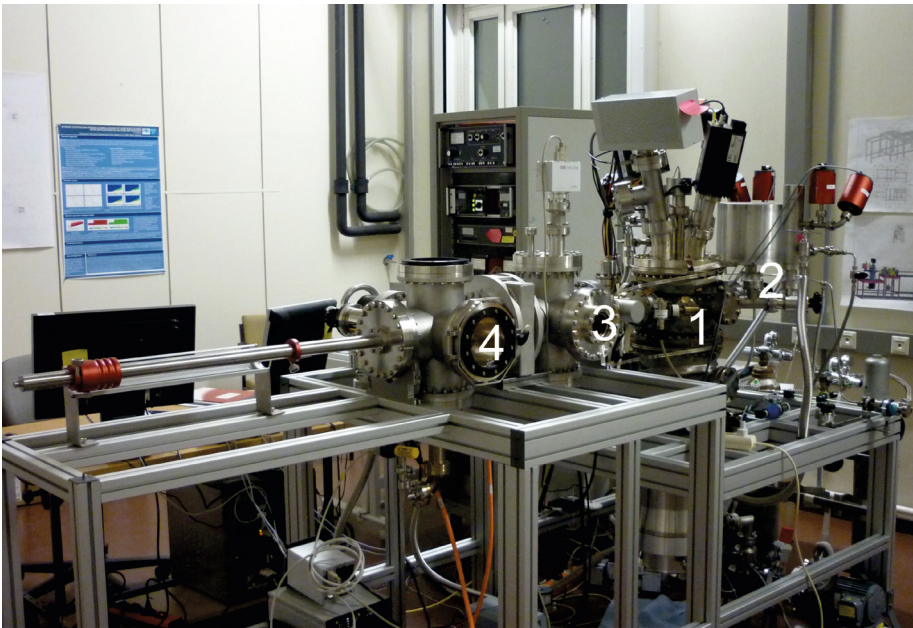


Bild 13: Das weltweit erste Normal für Partialdrücke zur Kalibrierung von Quadrupolmassenspektrometern (im Bild rechts oben auf dem Kammerdeckel der Kalibrierkammer „1“ installiert) und zur Rückführung von Ausgasratenmessungen von Proben (Probenkammer „3“, Schleusenkammer „4“), errichtet in der PTB im Rahmen des EMRP-Projekts IND12. Der Gaseinlass „2“ erlaubt sogar die definierte Druckeinstellung von Dämpfen, z. B. Wasserdampf.

Vakuummetrologie

Im August 2014 ging das sehr erfolgreiche europäische Projekt EMRP IND 12 „Vacuum metrology for production environments“ zu Ende. Es wurde von der PTB koordiniert. Im Rahmen des Projekts wurden sehr schnell messende Vakuummessgeräte entwickelt, die jetzt kommerziell erhältlich sind. Sie weisen Antwortzeiten von höchstens 1 ms bei Druckänderungen auf und können in schnellen Industrieprozessen eingesetzt werden, z. B. bei der Beschichtung optischer Speicher. In der PTB wurde weltweit das erste Normal für Partialdrücke zur Kalibrierung von Quadrupolmassenspektrometern und zur Rückführung von Ausgasraten von Vakuumbauteilen errichtet (Bild 13). Aus den damit entstandenen metrologischen Untersuchungen entstand ein internationales Normungsprojekt bei ISO. Gemeinsam mit einem slowenischen Partner hat die PTB ein Patent für eine Referenzausgasungsquelle angemeldet, welches, in Zukunft ermöglichen wird, verschiedene Ausgasatenmesssysteme zu vergleichen und zu validieren. Dies wurde besonders von der Firma ASML und deren Zulieferern für die EUV-Lithografie auf dem abschließenden Projekt-Workshop im Juni 2014 begrüßt. Auch bei der quantitativen Leckratenmessung für andere Gase als Helium machte das Projekt große Fortschritte.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Aufbau einer Instrumentierung zur Oberflächenanalytik

Im Sommer 2014 wurde nach anderthalbjähriger Konstruktions- und Aufbauphase eine Apparatur zur metrologischen Charakterisierung von Oberflächen in Betrieb genommen, insbesondere an 1 kg schweren Siliziumkugeln, die zur Neubestimmung der Avogadro-Konstanten genutzt werden. Die Instrumentierung verfügt über eine monochromatische Röntgenquelle, einen Fluoreszenz- und einen Elektronendetektor, die zur Bestimmung der Massendeposition, der Stöchiometrie der Siliziumoxidschicht sowie potenzieller Kontaminationen verwendet werden. (M. Kolbe, FB 7.1, michael.kolbe@ptb.de)

Messplatz zur Kalibrierung von Strahlungsquellen an der Metrology Light Source

Der neue Messplatz zur Kalibrierung von Strahlungsquellen an der *Metrology Light Source* wurde erstmals im kurzwelligen Spektralbereich von 7 nm bis 100 nm umfangreich charakterisiert. Dieser durch den Messplatz neu erschlossene Spektralbereich ist wichtig für die Kalibrierung von Transferquellen, die im Rahmen von Forschungs Kooperationen zur Charakterisierung von Sonnenspektrografen eingesetzt werden. (R. Thornagel, FB 7.1, reiner.thornagel@ptb.de)

Messung der Polarisations-eigenschaften im extremen UV (EUV) mit hoher Dynamik

Mit dem neuen Scattero-Ellipsometer für EUV-Radiometrie im PTB-Laboratorium bei BESSY II konnte beim Nachweis der von einer Probe reflektierten hochgradig linear polarisierten Synchrotronstrahlung durch einen Polarisationsanalysator ein Unterdrückungsverhältnis für die orthogonale Polarisationskomponente von mindestens 10^4 nachgewiesen werden. Dadurch werden die Messmöglichkeiten bei der Charakterisierung von Spiegeln im Rahmen von Dienstleistungen und Forschungs Kooperationen deutlich erweitert und weitergehende Untersuchungen wie die Messung optischer Konstanten vergrabener Schichten ermöglicht. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

Gitterkonstante von 25 nm rückführbar bestimmt

In Zusammenarbeit mit dem NIST wurde ein sogenanntes ‚self-assembled‘ Polymergitter mit einer nominellen Gitterkonstanten von nur 25 nm mit Röntgenkleinwinkelstreuung unter streifenförmigem Strahlungseinfall im PTB-Laboratorium bei BESSY II untersucht. Durch die exakte Bestimmung der Eingangsparameter wie der Pixelgröße des verwendeten Röntgendetektors PILATUS und dessen Abstand zum Gitter sowie durch die genaue Analyse der Streubilder konnte eine Standardmessunsicherheit der Gitterkonstanten von weniger als 0,1 nm erreicht werden. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Kern-Hülle-Nanopartikel mit Kontrastvariation charakterisiert

Bei der rückgeführten Größenbestimmung mit Röntgenkleinwinkelstreuung von Nanopartikeln auf Polymerbasis, die eine Struktur aus Kern und Hülle aufweisen, konnte im Rahmen einer Doktorarbeit die Unsicherheit deutlich reduziert werden. Dazu wurden in einer speziellen Kapillare durch Diffusion ein Dichtegradient der Partikel in ihrer Umgebungsflüssigkeit erzeugt, und Streukurven bei unterschiedlichen Kapillarpositionen und damit verschiedenem Kontrast aufgenommen und in ihrer Gesamtheit ausgewertet. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Streulicht-Nahfeldmikroskopie und Nano-FTIR-Spektroskopie an der Metrology Light Source

In Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) wurde ein neuer Betriebsmodus mit stark verkleinertem Quellpunkt (low-emittance mode) für die Metrology Light Source (MLS) entwickelt, der sich als besonders geeignet für Nahfeldmikroskopie und -spektroskopie erwies. Mithilfe dieser neuen Speicherringoptik konnte die Sensitivität bei Messungen mit dem optischen Nahfeldmikroskop deutlich gesteigert werden, sodass auch Untersuchungen an dünnen organischen Schichten erfolgreich durchgeführt werden konnten. (B. Kästner, FB 7.2, bernd.kaestner@ptb.de)

Energieabhängigkeit der partiellen L-Schalen-Photoionisationswahrscheinlichkeiten experimentell nachgewiesen

Mithilfe der referenzprobenfreien Röntgenfluoreszenzanalyse-Instrumentierung der PTB konnte die spezifische Energieabhängigkeit der L-Unterschalen-Photoionisationswahrscheinlichkeiten anhand zweier untersuchter Elemente, Pd und Mo, nachgewiesen werden. Mithilfe dieser Ergebnisse wurde der in der Analytik weit verbreitete Ansatz eines energieunabhängigen Verhältnisses dieser Wahrscheinlichkeiten zueinander widerlegt. Die experimentelle Bestätigung des theoretischen Modells trägt somit zu verbesserten Analyseergebnissen bei. (P. Hönicke, FB 7.2, phillip.hoenicke@ptb.de)

Sehr lineares TES-Bolometer für die FIR- und THz-Spektroskopie entwickelt

Ein in der PTB insbesondere für die Fourier-Transform-Spektroskopie und Radiometrie entwickeltes Transition-Edge-Sensor-(TES)-Bolometer wurde umfassend elektrisch und optisch charakterisiert. Unter anderem konnte mittels der Synchrotronstrahlung der Metrology Light Source gezeigt werden, dass sich der streng lineare Arbeitsbereich des Detektors über vier Größenordnungen erstreckt. Dies stellt eine Verbesserung um mindestens eine Größenordnung gegenüber kommerziell erhältlichen Siliziumkomposit-Bolometern dar. (M. Kehrt, FB 7.3, mathias.kehrt@ptb.de)

Radiometrische Temperaturmessung an Hochtemperaturfixpunkten

Im Rahmen des Hochtemperaturentwicklungsplans des CCT und im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens „Implementing the New Kelvin“ wurden in der PTB radiometrische Temperaturmessungen an den Fixpunktmaterialien Cu, Co-C, Pt-C und Re-C im Temperaturbereich zwischen 1084,6 °C und 2474 °C durchgeführt, um die thermodynamische Phasenübergangstemperatur der Fixpunkte mit geringstmöglicher Messunsicherheit zu bestimmen. Die 16 untersuchten Fixpunktzellen wurden nach umfangreichen internationalen Voruntersuchungen ausgewählt. Die Messungen stellen den Höhepunkt einer über 15-jährigen internationalen Entwicklung und Optimierung der eutektischen Hochtemperaturfixpunkte und der radiometrischen Temperaturmessung an diesen in der PTB dar. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden mit der mise en pratique des Kelvins zu einer deutlichen Verringerung der Messunsicherheit bei der Darstellung und Weitergabe der Hochtemperaturskala führen. (K. Anhalt, FB 7.3, klaus.anhalt@ptb.de)

Radiometrische Kalibrierung eines NIR-Strahlungsthermometers

Auf der Grundlage eines Superkontinuum-Lasers und einer Ulbrichtkugel hat die PTB einen Spektralmessplatz für die radiometrische Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von abbildenden Strahlungsthermometern im sichtbaren und nahen infraroten (NIR) Spektralbereich entwickelt. Als erste Anwendung im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens „NOTED“ erfolgte die Kalibrierung eines kommerziellen NIR-Strahlungsthermometers mit einer Standardmessunsicherheit, die 75 mK bei einer Temperatur von 500 °C entspricht. Eine Überprüfung des Kalibrierverfahrens gegen die Hohlraum-Temperaturstrahler der PTB ergab eine sehr gute Übereinstimmung mit der Internationalen Temperaturskala. (L. Bünger, FB 7.3, lars.buenger@ptb.de)

Hochgenauer Blendenvergleichsmessplatz

Für radiometrische Messungen ist die genaue Kenntnis der optisch wirksamen Fläche von geometrischen Blenden unbedingt notwendig. Radiometrische Temperaturbestimmungen benötigen dabei Standardmessunsicherheiten kleiner als 10^{-3} . In der PTB erlaubt ein Blendenvergleichsmessplatz sehr schnell die Fläche optischer Blenden gegen eine mit Laserstrahlung vermessene Referenzblende zu bestimmen. Durch einen Vergleich von Blenden, die an der PTB und am australischen Staatsinstitut kalibriert wurden, konnte die Messunsicherheit des Vergleichsmessplatzes mit $5 \cdot 10^{-4}$ validiert werden. (D. Taubert, FB 7.3, dieter.taubert@ptb.de)

Weltweit erste Leistungsmessung eines Terahertz-(THz)-Time-Domain-Systems

Time-Domain-Spektrometer sind in der THz-Spektroskopie weit verbreitet. In einem drittmittelgeförderten Kooperationsprojekt mit einem deutschen Detektorhersteller erfolgt die Entwicklung pyroelektrischer THz-Detektoren, die bei hoher Nachweisempfindlichkeit bis in den Bereich der Millimeterwellen einsetzbar sind. Bereits mit dem ersten Funktionsmodell eines solchen Detektors gelang die weltweit erste Messung der Terahertzleistung eines Time-Domain-Spektrometersystems. (A. Steiger, FB 7.3, andreas.steiger@ptb.de)

Terahertz-Reflektionsverluste eines Kohlenstoff-Nanotube-Arrays bestimmt

Mit ausgerichteten Kohlenstoff-Nanotube-Röhrchen (vertical aligned carbon nano tube arrays – VANTA) beschichtete Oberflächen wurden vom amerikanischen Staatsinstitut NIST entwickelt als besonders schwarze Absorber mit nahezu voll-

ständiger Strahlungsabsorption vom sichtbaren bis ins ferne infrarote Spektralgebiet (FIR). Die verbleibenden optischen Verluste eines VANTA-beschichteten pyroelektrischen Detektors des NIST wurden mit dem Molekülgaslaser der PTB erstmalig bei 1,4 THz bestimmt. Es ergab sich ein bei dieser Frequenz sehr hoher Absorptionsgrad von 0,95. (A. Steiger, FB 7.3, andreas.steiger@ptb.de)

Schallgeschwindigkeitsanomalie im Ostseewasser

Mit Präzisionsmessungen der Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten im Rahmen des EMRP-Projektes „Ocean Salinity and Acidification“ konnten in Ozeanwasserproben mit dem anwenderfreundlichen Flugzeitverfahren konsistente Ergebnisse innerhalb 200 ppm im Vergleich zu vorhandenen Absolutdaten erzielt werden. Mit den erreichten Reproduzierbarkeiten, die nochmals um eine Größenordnung besser sind, war es erstmals möglich, den Effekt der Anomalie in der relativen Salzzusammensetzung des Ostseewassers auf die Schallgeschwindigkeit aufzulösen. Dies trägt wesentlich zur Reduzierung von Unsicherheiten der thermodynamischen Zustandsgleichungen für die Ostsee bei. (C. v. Rohden, FB 7.4, christoph.v.rohden@ptb.de)

Präzisionsbestimmung der Virialkoeffizienten von Neon

Mit der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie konnten neben der thermodynamischen Temperatur bei tiefen Temperaturen auch Teilchenwechselwirkungen der Gase in Form von Virialkoeffizienten experimentell bestimmt werden. Erstmals wurde im Bereich zwischen 40 K und 273 K der zweite Virialkoeffizient von Neon auf bisher nicht erreichtem Niveau (relative Unsicherheit von einigen 10^{-3}) gemessen. Die gute Übereinstimmung mit den neuesten „Ab-initio“-Theorien belegt darüber hinaus, wie leistungsstark Theorie und Experiment geworden sind. (C. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

Erste Messungen der thermodynamischen Temperatur im Bereich zwischen 40 K und 140 K

Mit einem verbesserten Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer (DCGT) wurden die bisherigen Messungen der PTB im Bereich zwischen 2 K und 36 K bestätigt. Darauf aufbauend wurde der Temperaturbereich erstmals bis 140 K ausgeweitet. Die erreichten Unsicherheiten für $T_{\text{DCGT}} - T_{90}$ (T_{90} Temperatur gemäß der Internationalen Temperaturskala ITS90) von etwa 1 mK in diesem Bereich sind mit denen der bislang genauesten Methode, dem akustischen Gasthermometer, vergleichbar und liefern damit unverzichtbare Daten für die Aufklärung von Diskrepanzen und die Erstellung einer verbesserten

Internationalen Temperaturskala im Tieftemperaturbereich. (C. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

pMFFT – ein neues Primärthermometer für den Tieftemperaturbereich

Die neue „Mise en Pratique“ für die Darstellung der Einheit Kelvin wird es nach deren Neudefinition gestatten, die Temperatur auch direkt mit Primärthermometern zu messen. Im Rahmen des EMRP-Projekts „Implementing the new Kelvin“ werden dafür gerade die Voraussetzungen geschaffen. Die PTB hat dazu ein Rauschthermometer auf Basis von dc-SQUIDS für den Tieftemperaturbereich entwickelt. Der spezielle Aufbau dieses primären Magnetfeld-Fluktuations-Thermometers (pMFFT) wurde bereits patentiert. Erste Vergleichsmessungen zwischen dem pMFFT und der internationalen Tieftemperaturskala PLTS-2000 im Bereich zwischen 0,009 K und 1 K ergaben eine Übereinstimmung besser als 0,5%. (A. Kirste, FB 7.4, alexander.kirste@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Messung der Beugungseffizienz von EUV-Photomasken

Am EUV-Strahlrohr der *Metrology Light Source* wurden im großen Umfang Photomasken mit speziellen Reflexionsbeschichtungen hinsichtlich Reflexionsgrad und Beugungseffizienz untersucht, die bei der Einführung der EUV-Lithografie als Produktionstechnik für die Fertigung integrierter Schaltungen eine wesentliche Rolle spielen. Durch höhere numerische Aperturen und eine außeraxiale Belichtung sollen Strukturgrößen auf den Wafern im Bereich unter 10 nm erreicht werden, um die führende Stellung der europäischen Hersteller von EUV-Belichtungsmaschinen auf dem Weltmarkt zu sichern. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

Bestimmung der Rauheit von Multilayer-Spiegeln

Um für Oberflächen mit einer Multilayer-Reflexionsbeschichtung aus dem winkelaufgelösten Nachweis diffus gestreuter EUV-Strahlung die Oberflächenrauheit zu bestimmen, wurde im Rahmen einer Doktorarbeit ein mathematisches Modell erstellt, das Mehrfachreflexionen und resonante Effekte berücksichtigt und entsprechende Experimente vollständig beschreibt. Die Arbeiten stehen im Zusammenhang mit wissenschaftlichen und industriellen Anwendungen von Multilayer-Spiegeln. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

Kalibrierung von Strahlungsdetektoren gegen das neue Detektorprimärnormal der PTB

Die spektrale Empfindlichkeit von Detektorsekundärnormalen wurde gegen das neue Detektorprimärnormal der PTB für diese Messgröße, ein mit Laserstrahlung betriebenes Kryoradiometer, im Wellenlängenbereich von 407 nm bis 1004 nm bestimmt. Externe Kunden sowie PTB-interne Anwender aus den Bereichen Strahlungsthermometrie, Radiometrie und Photometrie können nun auf Kalibrierungen von Strahlungsdetektoren mit einer relativen Standardmessunsicherheit von unter 50 ppm zurückgreifen. (U. Johannsen, FB 7.3, uwe.johannsen@ptb.de)

Kalibrierung von Strahlungsdetektoren im NIR

Durch die Verwendung eines leistungsstarken Superkontinuum-Lasers konnte am UV- und NIR-Kryoradiometermessplatz die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von Infrarot-Strahlungsdetektoren bis zu einer Wellenlänge von 2,4 μm erweitert werden. Kalibriert wurden hierbei spezielle InGaAs-Photodioden, die in diesem Wellenlängenbereich als Sekundärnormale verwendet werden können. (P. Meindl, FB 7.3, peter.meindl@ptb.de)

Abschluss des EMRP-Projekts „High temperature metrology for industrial applications“

Im Mai 2014 wurde das Projekt „High temperature metrology for industrial applications ($t > 1000\text{ °C}$)“ mit einem Workshop unter Beteiligung aller Projektteilnehmer, Stakeholder und weiterer interessierter Vertreter aus Industrie und Forschung erfolgreich abgeschlossen. Im Fachbereich 7.4 wurden Methoden zum Nachweis von thermoelektrischen Instabilitäten in Hochtemperatur-Thermoelementen mit integrierten Miniaturfixpunkten bzw. mit Rauschtemperaturmessungen mittels kombinierter Thermoelement-Rauschtemperaturfühler weiterentwickelt. Die Anwendung und Umsetzung der präsentierten Ergebnisse weisen das Potenzial auf, Hochtemperaturmessungen in der Industrie erheblich zu verbessern. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

Kalibrierplatz für Hochtemperatur-Normalthermometer in Betrieb

Grundlegend modernisierte Einrichtungen für die Kalibrierung von Hochtemperatur-Normalthermometern und Aluminium- und Silber-Fixpunktzellen sind in Betrieb gegangen. Hiermit erfolgt die Darstellung und Weitergabe der Internationalen Temperaturskala von 1990 im Temperaturbereich von 660 $^{\circ}\text{C}$ bis 960 $^{\circ}\text{C}$ auf höchstem metrologischen

Niveau mit Unsicherheiten von 2 mK bzw. 3 mK. Dies wird erreicht durch hierfür speziell entwickelte gleichstromgespeiste Wärmerohröfen, welche in Zusammenarbeit mit einem mittelständischen deutschen Unternehmen entwickelt worden sind. Eine weitere Besonderheit ist die Verwendung einer Nickel-Superlegierung für das Wärmerohr. Damit kann der Temperaturbereich bis zum Kupferfixpunkt (1085 $^{\circ}\text{C}$) erweitert werden. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

Schnelle Temperaturmessungen bei sich schnell ändernden Drücken im Vakuum

Im Rahmen des Projekts EMRP JRP IND12 „Vacuum metrology for production environments“ wurde ein dynamisches Drucknormal aufgebaut, in dem sich der Druck durch Expansion des Gases von 100 kPa auf 100 Pa innerhalb 20 ms stufenartig oder, in einem etwas längeren Zeitraum innerhalb 1 s, in vorhersagbarer Weise ändert. Da sich dabei auch die Temperatur drastisch ändert, wurde mit Simulationsrechnungen untersucht, wie schnell sich die Gastemperatur auf ein Thermoelement bei verschiedenen Bedingungen überträgt. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)

Neues Verfahren zur In-situ-Kalibrierung von Particle Image Velozimetern

Zur Messung von Geschwindigkeitsverteilungen von strömenden Fluiden in Rohrleitungen mittels PIV wurde ein neuartiges laseroptisches Verfahren zur In-situ-Kalibrierung entwickelt. Diese In-situ-Kalibrierung ersetzt ein aufwendiges mechanisches Verfahren, bei dem ein sogenanntes Kalibriertarget in das Rohr eingebracht werden muss. Mit der neuen laseroptischen Kalibrierung können nun PIV-Systeme ohne Betriebsunterbrechung kalibriert werden. (T. Eichler, FB 7.5, thomas.eichler@ptb.de)

Volumetrischer Prüfstand für Glykol-Wassergemische

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit Verbänden der deutschen Industrie zur Messbeständigkeit von Wärmemengenzählern für solarthermische Anlagen wurde ein Prüfstand zur Durchführung von Volumenstrommessungen in Glykol-Wassergemischen aufgebaut. Auf dem Prinzip der volumetrischen Verdrängung basierend, können Durchflusssensoren bei Temperaturen zwischen -20 °C und 110 $^{\circ}\text{C}$ und Volumenströmen im Bereich von 6 l/h und 3600 l/h untersucht werden. (S. Baack, FB 7.5, Sebastian.baack@ptb.de)

Numerische Simulation von gestörten Rohrströmungen

Bei zahlreichen Messanwendungen kann die Kenntnis der Strömungsverteilung am Messort zur Minderung der Messabweichung des Zählers herangezogen werden. Mit Computational-Fluid-Dynamics (CFD) wurden verschiedene Strömungssituationen in Rohren numerisch simuliert. Dabei wurden für die Praxis relevante Störungen wie z. B. Krümmer und Segmentblenden untersucht. Bei Vergleichen von Simulationsergebnissen mit Messwerten konnten geeignete Turbulenzmodelle sowie Modellparameter identifiziert werden. (A. Weissenbrunner, FB 7.5, andreas.weissenbrunner@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Kalibrierung des SPICE-EM-Spektrografen der Solar-Orbiter-Mission

Das „Engineering“-Modell (EM) des Sonnen-Spektrografen SPICE (*Spectral Imaging of the Coronal Environment*) wurde mit der berechenbaren Synchrotronstrahlung der *Metrology Light Source* kalibriert. Die Untersuchungen bilden die Grundlage für die im nächsten Jahr geplante Kalibrierung des Flugmodells. (R. Klein, FB 7.1, roman.klein@ptb.de)

Charakterisierung von Gas-Monitor-Detektoren für den Europäischen Röntgenlaser

Im Rahmen einer Kooperation mit dem Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) wurden an der *Metrology Light Source* im Spektralbereich des Vakuum-UV (VUV) Monitor-Detektoren charakterisiert, mit denen am Europäischen Röntgenlaser XFEL in Hamburg Strahlleistung und Strahlungsleistung gemessen werden sollen. Dabei werden Daten zur spektralen Empfindlichkeit vom VUV- bis in den Röntgenbereich mithilfe von Gas-Ionisationsquerschnitten extrapoliert, deren Bestimmung ebenfalls Gegenstand der Kooperation ist. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

Bestrahlungsalterung organischer Photovoltaik-Materialien

Mit UV-Photoelektronenspektroskopie (UPS) wurden am Undulatorstrahlrohr der *Metrology Light Source* (MLS) strahlungsinduzierte Veränderungen der Bandstruktur von organischen Halbleitern untersucht, zum Beispiel an Metall-Phthalocyaninen, die im Bereich Photovoltaik eine große Rolle spielen. Die Experimente fanden in Abhängigkeit von der Bestrahlungswellenlänge statt, wobei die Durchstimmpbarkeit und die hohe Intensität der an der MLS verfügbaren VIS-, UV- und Vakuum-UV-Strahlung genutzt wurde. Die quantitativen Ergeb-

nisse wurden im Rahmen des EMRP-Vorhabens *ThinErgy* (ENG53) erzielt. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

Tiefenabhängige Strukturbestimmung in Polymerfilmen

Im PTB-Laboratorium bei BESSY II wurden im Rahmen einer Doktorarbeit mit Röntgenkleinwinkelstreuung nanostrukturierte Polymerfilme auf Silizium untersucht. Durch die Wahl der Photonenergie im Bereich der Silizium-K-Absorptionskante konnte die Streuung an der Grenzfläche von Schicht und Substrat nahezu vollständig unterdrückt und damit der Kontrast deutlich erhöht werden. Die Messungen wurden durch den Einsatz einer vakuumtauglichen Version des Hybrid-Pixel-Röntgendetektors PILATUS ermöglicht und ergaben neue Erkenntnisse über temperaturinduzierte tiefenabhängige Strukturveränderungen im Polymer. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Tagung Kryoelektronische Bauelemente 2014 in Berlin

Die diesjährige nationale Tagung Kryoelektronische Bauelemente 2014, Kryo 2014, fand vom 21.–23. September in Berlin im Hotel am Müggelsee statt und wurde vom FB 7.2 ausgerichtet. Die Tagung bringt in jedem Jahr Wissenschaftler, Ingenieure, Techniker und Studenten aus dem akademischen und industriellen Bereich zusammen, um sich über neue Entwicklungen auf dem Gebiet der supraleitenden elektronischen Bauelemente und der Kryotechnik auszutauschen. In diesem Jahr konnten sich die 77 Teilnehmer der Tagung u. a. auch im Rahmen von Tutorials über spezifische Anwendungen von SQUIDs in der PTB informieren und den Standort der PTB in Berlin-Adlershof kennenlernen. (Th. Schurig, FB 7.2, thomas.schurig@ptb.de)

Europäisches Forschungsvorhaben zur verbesserten solaren UV-Bestrahlungsstärkemessung abgeschlossen

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts „SolarUV“, an dem Partner aus 9 Ländern teilnahmen, wurde die Rückführung des europäischen sowie weltweiten Messnetzes zur solaren UV-Bestrahlungsstärke am Erdboden deutlich verbessert. Im Fachbereich 7.3 wurde hierzu die prinzipielle Nutzbarkeit eines Fouriertransform-Spektrometers als schnell messendes Referenzspektrometer gezeigt. (P. Meindl, FB 7.3, peter.meindl@ptb.de)

Rückführung des Atmosphären-Spektrometers GLORIA auf die Internationale Temperaturskala

Mit der Bergischen Universität Wuppertal, dem Forschungszentrum Jülich und dem Karlsruher Institut für Technologie wurden im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens „Metrology for Earth Observation and Climate“ (MetEOC) die von der PTB vollständig radiometrisch und thermometrisch charakterisierten „In-Flight“-Referenzstrahler des Gimbalbed Limb Observer for Radiance Imaging of the Atmosphere (GLORIA) erfolgreich auf mehreren Flügen von GLORIA mit dem Forschungsflugzeug HALO eingesetzt. Durch die Kalibrierung der Strahler vor und nach der TACTS/ESMVal-Messkampagne von GLORIA können die während dieser Kampagne gewonnenen klimarelevanten Daten auf das Internationale Einheitensystem rückgeführt werden. (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Pränormative Arbeiten auf dem Gebiet der Standardisierung von Supraleitungssensoren

Supraleitende Sensoren und Detektoren werden zunehmend nicht nur für unikale Messaufbauten im Bereich der Grundlagenforschung sondern auch für industriell gefertigte Produkte verwendet. Wichtige Parameter und Eigenschaften dieser Bauelemente sind aber nur schwer vergleichbar, da es z. B. keine einheitlichen Messvorschriften für deren elektronische Parameter gibt. Inzwischen wurde eine international besetzte IEC-IEEE-Arbeitsgruppe zur Standardisierung supraleitender Sensoren und Detektoren unter Beteiligung von PTB-Vertretern ins Leben gerufen, deren Ziel es ist, einheitliche Terminologien und Spezifikationen für supraleitende Sensoren und Detektoren, wie z. B. SQUIDS oder supraleitende Einzelphotonendetektoren, zu erarbeiten. Eine Sitzung dieser Arbeitsgruppe fand im November in Shanghai statt. (J. Beyer, FB 7.2, joern.beyer@ptb.de)

CCQM-Pilot-Studie P-140 zur Quantifizierung von Multi-Element-Schichten durch Tiefenprofilierung

In der CCQM-Pilot-Studie P-140 zur Quantifizierung von Multi-Element-Schichten durch Tiefenprofilierung war die PTB mit der referenzprobenfreien Röntgenfluoreszenzanalyse beteiligt. Die vom südkoreanischen Metrologieinstitut KRISS initiierte Pilot-Studie hatte zum Ziel, verschiedene Messverfahren zur Quantifizierung von dünnen Multi-Element-Schichten mit einer ungleichmäßigen Elementtiefenverteilung zu vergleichen. Als Test-Systeme wurden Absorberschichten von CIGS-

Dünnschichtsolarzellen (Cu(In,Ga)Se_2) verwendet. Das CIGS ist neben Silizium eines der Materialien mit der höchsten Konversionseffizienz, das für einen großflächigen Einsatz von Solarmodulen geeignet ist. Die erfolgreiche Pilotstudie wird durch einen Key Comparison fortgesetzt. (C. Streeck, FB 7.2, cornelia.streeck@ptb.de)

Vergleich zur Bestimmung der Nachweisempfindlichkeit von Einzelphotonendetektoren mit dem NIST

Einzelphotonendetektoren gewinnen eine immer größere Bedeutung für die sichere Datenübertragung. Zur Vorbereitung einer CCPR-Pilotstudie mit dem Ziel, die Nachweisempfindlichkeit von Einzelphotonendetektoren rückgeführt und mit kleiner Unsicherheit zu bestimmen, hat die PTB mit einer auf Synchrotronstrahlung basierenden Methode ein supraleitendes Einzelphotonendetektorsystem kalibriert. Dieses System wird nun im Rahmen einer Zusammenarbeit am NIST eingesetzt, um dort hergestellte und kalibrierte supraleitenden Einzelphotonendetektoren zu validieren. (I. Mueller, FB 7.3, ingmar.mueller@ptb.de)

Neue Empfehlung des CCT

Das Beratende Komitee für Einheiten (CCU) hat in seiner 2013 verabschiedeten Resolution zur Reform des Internationalen Einheitensystems dazu aufgefordert, die Fachexperten noch stärker in den Prozess der Festlegung der erforderlichen Naturkonstanten einzubeziehen. Daraufhin hat das Beratende Komitee für Thermometrie (CCT) seine Empfehlung zur Neudefinition des Kelvins aus dem Jahr 2010 präzisiert. Durch den beträchtlichen Fortschritt bei der Bestimmung der Boltzmann-Konstante ist es zusätzlich möglich geworden, die Bedingungen zur Neudefinition schärfer zu fassen und für die zweite unabhängige Methode eine relative Unsicherheit von nicht größer als $3 \cdot 10^{-6}$ zu fordern. Mit der in der PTB verfolgten Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie sollte diese Bedingung bis zur endgültigen Festlegung der Boltzmann-Konstante im Jahre 2017 erfüllt sein. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

Abschluss eines Schlüsselvergleiches von Realisierungen der ITS-90 von 2 K bis 25 K

Der regionale Schlüsselvergleich von Realisierungen der ITS-90 im Bereich von 2 K bis 25 K mittels Rhodium-Eisen-Thermometern als TransfERNormale (EURAMET-Projekt Nr. 1147) wurde von der PTB erfolgreich durchgeführt. Die erzielte Standardabweichung der Anzeigen von fünf Thermometern von nur 0,2 mK beweist, dass der Anschluss an den

Referenzvergleich des CIPM mit genügend geringer Unsicherheit hergestellt werden konnte. Die PTB nimmt damit eine Spitzenstellung im Bereich der Tieftemperaturmetrologie ein. Im Zusammenspiel mit der thermodynamischen Temperaturmessung mit Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie ist dies ein wichtiger Beitrag zur Weiterentwicklung der Internationalen Temperaturskala. (C. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

Vergleich der Kelvin-Realisierung zwischen Deutschland und China

Gemeinsam mit dem Gastwissenschaftler Xiaoke Yan vom National Institute of Metrology (China) wurden die nationalen Realisierungen der SI-Basiseinheit Kelvin von China und Deutschland mit kleinsten Unsicherheiten deutlich unter 50 μ K miteinander verglichen. Darüber hinaus wurden Untersuchungen zur Langzeitstabilität der Realisierung mittels Wassertripelpunktzellen durchgeführt. Dabei wurde die Langzeitdrift der vermutlich weltweit ältesten Wassertripelpunktzelle bestimmt. Diese wurde vom späteren Vizepräsidenten der PTB, Helmut Moser, im Jahr 1928 hergestellt. Die Abweichung zur derzeitigen Realisierung des Kelvins in der PTB beträgt lediglich 1,2 mK und ist ein eindrucksvoller Beleg für die hohe Qualität der damaligen Arbeiten in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

EURAMET-Projekt 1268 „Comparison of the calibration of Pt/Pd thermocouples up to 1500 °C“

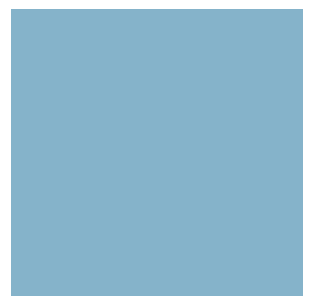
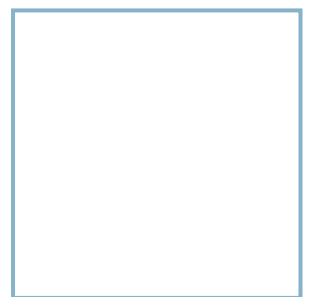
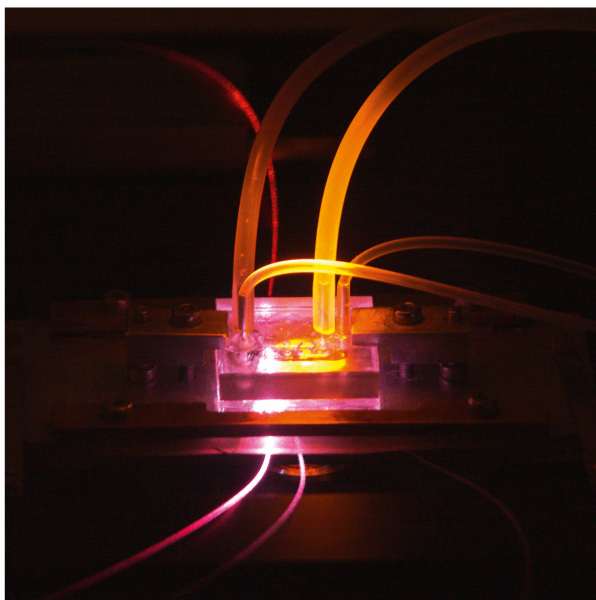
Auf dem EURAMET-Treffen des Technical Committee Thermometry wurde 2012 ein Ringvergleich mit Pt/Pd-Thermoelementen im Temperaturbereich zwischen 0 °C und 1500 °C beschlossen. Damit soll die Gleichwertigkeit der Kalibrierung von Pt/Pd-Thermoelementen an Fixpunkten in 22 teilnehmenden europäischen Metrologieinstituten nachgewiesen werden. Koordiniert wird der Vergleich durch das spanische Staatsinstitut. Die drei installierten Ringe mit jeweils sieben Teilnehmern werden durch die Institute in Deutschland, Frankreich und Großbritannien geleitet. Die Vergleichsmessungen begannen im November 2013 mit der Anfangskalibrierung von jeweils zwei in den Pilotlaboratorien konstruierten Pt/Pd-Thermoelementen, die im ersten Halbjahr 2015 für die Rückmessungen in den jeweiligen Pilotlaboratorien erwartet werden. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

Neufassung der Fachgrundnorm EN 1434 „Heat Meters“ verabschiedet

Die Neufassung der europäischen harmonisierten Fachgrundnorm EN 1434 „Heat Meters“ wurde im September 2014 vom CEN/TC 176 einstimmig angenommen. Die EN1434 wird im April 2015 in englischer, französischer und deutscher Sprache erscheinen. Die EN 1434 wird auch von Kanada und China übernommen. Die Neufassung beinhaltet 34 fundamentale Änderungen und Erweiterungen. 29 dieser Änderungsinhalte basieren aus Ergebnissen von Drittmittelforschungsvorhaben des Fachbereichs 7.5 mit industriellen Gremien. (J. Rose, FB 7.5, juergen.rose@ptb.de)

Abteilung 8

Medizinphysik und metrologische Informationstechnik



Hans Koch, der 10 Jahre lang die Abteilung 8 *Medizinphysik und metrologische Informationstechnik* und seit Januar 2010 das Institut Berlin geleitet hatte, trat Ende August 2014 in den Ruhestand. Gerhard Ulm, Leiter der Abteilung 7 *Temperatur und Synchrotronstrahlung*, wurde mit der Institutsleitung und der Wahrnehmung der Leitung der Abteilung 8 beauftragt.

Die Abteilung 8 ist unverändert in fünf Fachbereiche untergliedert, die nachfolgend jeweils ausgewählte Entwicklungen und Ergebnisse darstellen.

Räumlich-selektive Anregung in der Magnetresonanztomografie

In der bildgebenden medizinischen Diagnostik stellt sich häufig das Problem, dass man sich nach einer ersten Übersichtsaufnahme eine bestimmte anatomische Zielregion im zweiten Schritt „genauer ansehen“, d. h. mit erhöhter Auflösung abbilden möchte. Konventionelle Magnetresonanztomografie (MRT) stößt hier an Grenzen, denn prinzipbedingt muss ein Objekt *vollständig* abgerastert werden, wenn es einmal von den MR-üblichen Hochfrequenzpulsen angeregt wurde. Höhere Auflösung im Detail ist deshalb nur möglich, wenn der gesamte angeregte Körperbereich mit hoher Auflösung gescannt wird, was vielfach aus Messzeitgründen nicht praktikabel ist. Im Fachbereich 8.1 *Medizinische Messtechnik* werden deshalb Methoden zur räumlich-selektiven Anregung (spatially selective excitation, SSE) entwickelt, die die Anregung beliebig geformter – und insbesondere räumlich begrenzter – Zielvolumina erlaubt. Dieses Verfahren wurde jetzt so weiterentwickelt, dass echtes „Zoomed Imaging“ mit guter Bildqualität auch *in vivo* demonstriert werden konnte. Besonders wichtig ist dabei eine robuste Unterdrückung aller Anregung von außerhalb des Zielvolumens. Bild 1 zeigt zwei verschiedene Ansätze, in einem homogenen Gel-Zylinder von 20 cm Durchmesser eine flache, quadratische Scheibe mit 8 cm Kantenlänge anzuregen, wobei das Zielmuster einmal über die Magnitude und einmal über die Phase der komplexen Magnetisierung kodiert wurde. Man erkennt, dass der „Phasenmodulations-Ansatz“ (FM-SSE, links im Bild) einen schärferen Hell-Dunkel-Übergang liefert und Signale von außerhalb des Zielquadrats deutlich besser unterdrückt.

Titelbild:

Mikrofluidisches Laser-Durchflusszytometer zur Blutzellzählung

In-vivo-Anwendungen des Verfahrens sind in Bild 2 gezeigt. Links die „Übersichtsaufnahme“ des gesamten Gehirns mit der farbig unterlegten Zielregion; die räumliche Auflösung beträgt hier 1,7 mm in allen drei Raumrichtungen. In der SSE-Aufnahme rechts daneben wurde immer noch das gesamte Gehirn abgebildet, da aber nur das Zielvolumens angeregt wurde, bleibt der Rest unsichtbar. Die dritte Spalte von links demonstriert die Probleme von herkömmlichen „Zoomed Imaging“-Verfahren: Hier wurde das gesamte Gehirn konventionell angeregt, aber beim Auslesen nur der kleinere Zielbereich abgerastert. Dadurch kommt es zu Einfaltungen, von denen die hellen Fettsignale der Kopfhaut nur die markantesten sind. In der entsprechenden Aufnahme nach SSE-Anregung (ganz rechts) sind diese Artefakte vollständig unterdrückt: In der gleichen Messzeit konnte der interessierende Bereich mit 2,4-mal höherer Auflösung (0,7 mm isotrop) gescannt werden.

Die SSE-Technik wurde primär für die 7-Tesla-MRT entwickelt, und die obere Zeile von Bild 2 wurde auch an einem 7T-Scanner akquiriert. In der unteren Zeilen sind dagegen drei korrespondierende Aufnahmen von einem 3T-MRT gezeigt. Das Bild ist deshalb auch ein Beispiel für eine erfolgreiche Rückübertragung von Methoden, die an einem teuren „Ultrahochfeld“-Forschungs-MRT entwickelt und optimiert wurden, auf die klinische Feldstärke. Das Verfahren funktioniert auf Anhieb auch bei 3 T, allerdings werden gerade in der gezoomten Abbildung mit der hohen Auflösung die Vorteile der 7T-MRT in Bezug auf Signal-Rauschverhältnis und Kontrast deutlich. Bei 3 T bietet es sich eher an, SSE bei gleicher Bildauflösung zur Zeitersparnis zu nutzen, beispielsweise um dynamische Prozesse zu verfolgen.

Wahrnehmung von Infraschall, untersucht mittels Psychoakustik, Magnetenzephalografie und funktioneller Kernspintomografie

Es ist bekannt, dass Schall auch außerhalb des hörbaren Frequenzbereichs von 20 Hz bis 20 kHz durchaus wahrgenommen wird. Unklar ist allerdings, wie die Reizverarbeitung im Gehirn genau aussieht. Diese Frage ist im Hinblick auf die Akzeptanz technischer Installationen wie Windräder, die bekanntlich Schall im niederfrequenten Bereich unterhalb von 20 Hz erzeugen, gegenwärtig besonders aktuell. Um Wahrnehmungsmechanismen bei derart tiefen Frequenzen quantifizieren zu können, arbeiten seit Beginn des Jahres die Fachbereiche 1.6 *Schall*, 8.1 *Medizinische Messtechnik* und 8.2 *Biosignale* in dem von der EU geförderten Projekt „EARS“ mit Part-

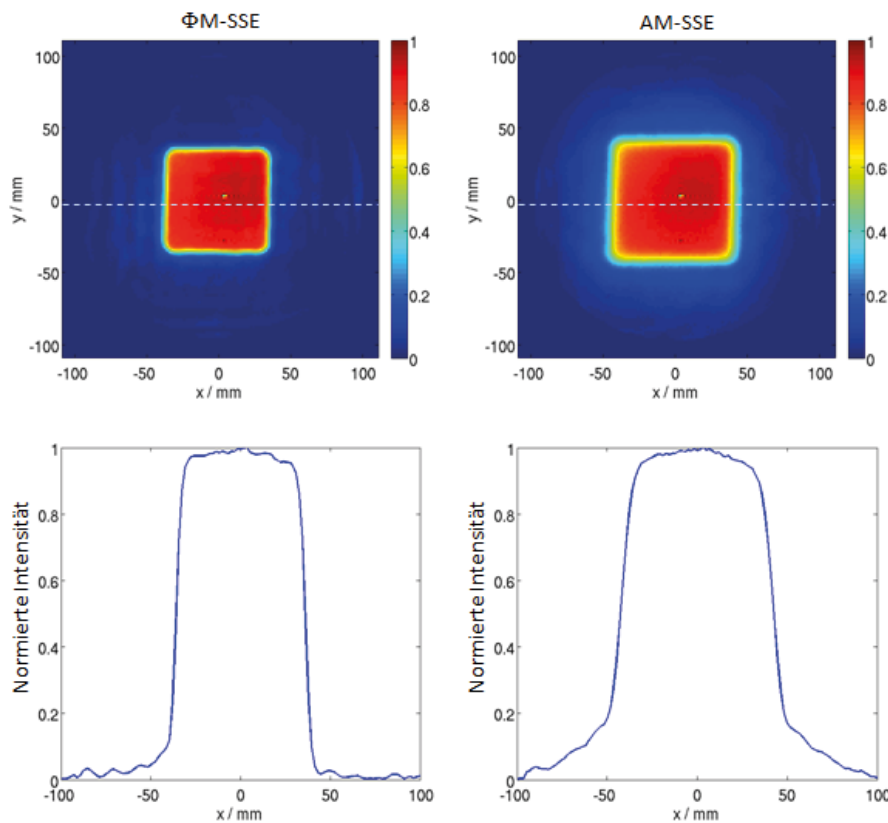


Bild 1: Räumlich selektive Anregung in einem Gel-Phantom mit einem Phasenmodulations- (FM-SSE, links) und einem Amplitudenmodulationsverfahren (AM-SSE, rechts). Unten sind Signalprofile entlang der gestrichelten Linie gezeigt.

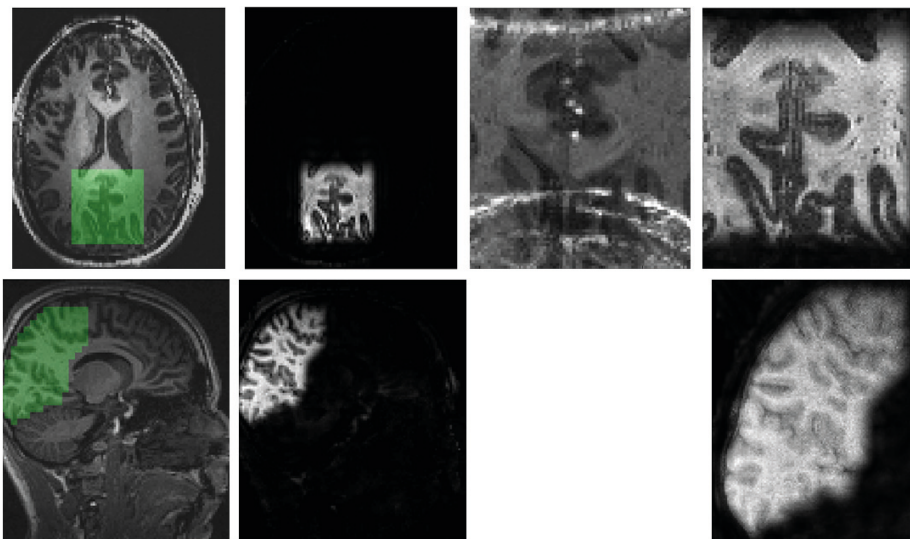


Bild 2: Räumlich selektive Anregung und „Zoomed Imaging“ in vivo, aufgenommen an einem 7T-MRT (oben) und einem 3T-MRT (unten). Weitere Erläuterungen im Text.

nern verschiedener europäischer Metrologieinstitute zusammen. Durch die Kombination der Expertise der drei PTB-Fachbereiche kann die Wahrnehmung des Schalls sowohl mittels audiologischer Tests als auch mittels objektiver physikalischer Messungen der physiologischen Vorgänge bestimmt werden.

Zuerst wurde hierzu eine Schallquelle am Ganzkopf-Magnetenzephalografie-System (MEG) des Fachbereichs *Biosignale* installiert, das die Magnetfelder von Hirnströmen registriert. Der Schalldruck am Ohr wurde dabei durch ein optisches Mikrofon gemessen, das keine magnetischen Störfelder erzeugt. Zunächst wurden bei insgesamt 15 Probanden die

Schalldrücke von Sinustönen bei 8 Hz, 12 Hz, 20 Hz, 40 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz so eingestellt, dass diese von den Probanden mit subjektiv konstant empfundener Lautstärke wahrgenommen wurden. Daraufhin wurden Reaktionen der Probanden auf die Schallreize zusätzlich mit der funktionalen Magnetresonanzbildgebung (fMRT) untersucht.

Bild 3 zeigt die aus den MEG-Messdaten gewonnenen Orte der Gehirnaktivierung der Probanden für die verschiedenen Frequenzen von 250 Hz bis 8 Hz in der Transversal- und Koronalebene (d. h. „von oben“ und „von vorne“). Die farbigen Kreise stellen das 95%-Konfidenzintervall des Aktivie-

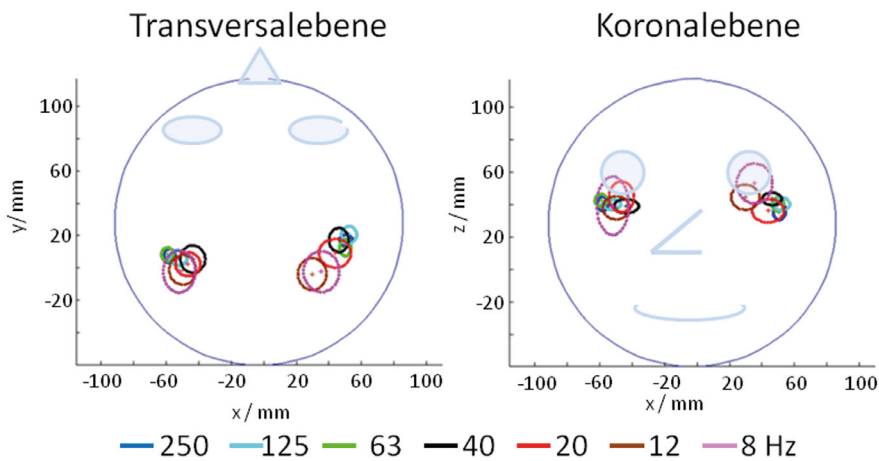


Bild 3: Aktivierungsorte aufgrund der Wahrnehmung von Schall im Frequenzbereich zwischen 8 Hz und 250 Hz. Nase und Augen sind zur besseren Anschauung skizziert. Der Kreisdurchmesser gibt die Streubreite innerhalb einer Gruppe von Probanden wieder. Die jeder Frequenz zugeordnete Farbe ist eingezeichnet.

rungsortes für die Gruppe von Probanden dar. Zu tiefen Frequenzen hin nimmt die Streubreite des Aktivierungsortes deutlich zu. Das ist nur zum Teil darauf zurückzuführen, dass die Reizantworten des Gehirns schwächer werden, sodass ihre Lokalisation ungenauer wird. Offensichtlich aber werden auch die niedrigen Frequenzen nicht in völlig anderen Hirnarealen verarbeitet als die hörbaren Frequenzen. Diese Beobachtung wurde durch fMRT-Messungen bestätigt, die für alle Frequenzen eine Aktivierung des Hörkortex zeigten. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass es keinen qualitativen Unterschied in der Verarbeitung von Hörreizen im Infraschall gegenüber hörbarem Schall gibt.

Messprotokolle und Phantome zur Leistungsbewertung von Mess- und Bildgebungsverfahren der Nahinfrarot-Spektroskopie von Gewebe

Mess- und Bildgebungsverfahren der diffusen Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS) zur nichtinvasiven Bestimmung und Darstellung von Änderungen in der Hämoglobinkonzentration und der Sauerstoffsättigung im menschlichen Gewebe finden zunehmend klinische Anwendungen. Das Einsatzspektrum der Verfahren reicht von der Diagnose, der Verlaufskontrolle sowie der Prognose neurologischer Erkrankungen über die Messung hämodynamischer Parameter bei traumatischen Hirnverletzungen oder Schlaganfall bis hin zur Verlaufskontrolle bei der chemotherapeutischen Behandlung von Krebserkrankungen. Im Fachbereich 8.3 *Biomedizinische Optik* der PTB werden entsprechende Mess- und Bildgebungsverfahren hoher Genauigkeit unter Ausnutzung der zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung mit Pikosekunden-Zeitauflösung zur Messung der Photonenflugzeiten im Gewebe entwickelt und zusammen mit klinischen Partnern in ausgewählten Anwendungen erprobt.

Die zunehmende Verbreitung und Anwendung der NIRS hat gezeigt, dass es dringenden Bedarf an standardisierten Messprotokollen sowie an Messphantomen mit gewebeähnlichen optischen Eigenschaften gibt, um die Leistungsfähigkeit der Methoden und Verfahren vergleichen und bewerten zu können. Unter Federführung der PTB wurden deshalb im Rahmen eines EU-Projektes (nEUROPt) zusammen mit einer Reihe von Partnereinrichtungen unter anderem zwei Messprotokolle entwickelt und praktisch erprobt. Damit lassen sich grundlegende Tests zur Charakterisierung der Instrumente („Basic Instrumental Performance“) durchführen. Darüber hinaus können die Empfindlichkeit, die räumliche Auflösung sowie die Genauigkeit der Quantifizierung von Absorptionsänderungen im Gewebe bewertet werden. Die Messprotokolle sowie deren praktische Realisierung wurden in zwei Artikeln im Journal of Biomedical Optics publiziert. Sie lassen sich außer zur Leistungsbewertung vorhandener Instrumente auch unterstützend für Design und Optimierung neuer Geräte zur diffusen NIRS und NIR-Bildgebung einsetzen.

Eine entscheidende Rolle für die in den Messprotokollen beschriebenen Leistungsbewertungen spielen Phantome mit gewebeähnlichen optischen Eigenschaften. Je nach Fragestellung kommen hierfür verschiedene Gewebephantome zum Einsatz. Beispielsweise wurden relativ kleine (wenige Kubik-Millimeter) und stark absorbierende Kunststoffzylinder in einer streuenden und absorbierenden Flüssigkeit (Gemisch aus Wasser, Intralipid und Tusche) verwendet, um das Auflösungsvermögen, die Empfindlichkeit oder die Genauigkeit der Absorptionsänderung zu überprüfen. Zur Quantifizierung der Tiefenselektivität, mit der Absorptionsänderungen detektiert werden können, wurden Phantome mit zwei Schichten und variabler Absorption entwickelt und eingesetzt. Die für streuende und absorbierende Flüssigphantome in der

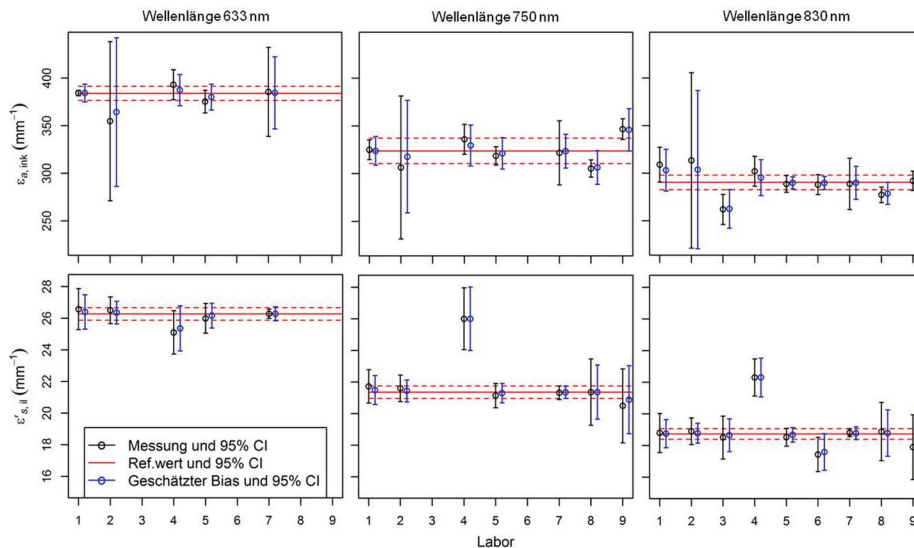


Bild 4: Messwerte (schwarz), Referenzwerte (RV, rot) und systematische Messunsicherheiten (blau), jeweils mit 95%-Konfidenzintervall für den intrinsischen Absorptionskoeffizienten $e_{a,ink}$ für Tusche (obere Reihe) und den intrinsische Transportstreckkoeffizienten $e_{s,ill}$ von Intralipid (untere Reihe) für drei verschiedene Wellenlängen

diffusen optischen Spektroskopie und Bildgebung häufig verwendeten Materialien Intralipid und Tusche müssen hinsichtlich ihrer Absorptions- und Streueigenschaften möglichst genau charakterisiert werden. In einer multizentrischen Studie mit neun Partnern aus sechs Ländern wurden unter Einsatz verschiedener Messmethoden der intrinsische Absorptionskoeffizient der Tusche und der intrinsische reduzierte Streukoeffizient von Intralipid bestimmt. Aus den ermittelten Messwerten wurden vom Fachbereich 8.4 *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* mittels eines geeigneten statistischen Modells zusammengefasste Referenzwerte für diese Größen bei drei nahinfraroten Wellenlängen ermittelt. Die relative Messunsicherheit wurde dabei zu 2 % oder besser für das absorbierende und 1 % für das streuende Material geschätzt. Die Ergebnisse der Studie wurden in Biomedical Optics Express veröffentlicht.

Der zunehmende klinische Einsatz von Mess- und Bildgebungsverfahren der diffusen Nahinfrarot-Spektroskopie hat den Anstoß zu zwei internationalen Normungsvorhaben gegeben. In einer gemeinsamen Arbeitsgruppe von IEC/TC62/SC62D und ISO/TC121/SC3 wird derzeit eine Norm zu Geräten der funktionellen Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS) erarbeitet, und ein Normvorhaben zu Geräten der Gewebeoximetrie ist in Vorbereitung. An beiden Vorhaben ist eine Mitarbeiterin des Fachbereiches 8.3 als Expertein beteiligt, die auf Grundlage der eigenen Ergebnisse sowie mit den anderen Forschungsgruppen erarbeiteten Erkenntnisse wertvolle Vorschläge beisteuern kann.

Mathematische Modellierung und Datenanalyse

Der Fachbereich 8.4 *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* forscht an metrologisch relevanten mathematischen und statistischen Fragestellungen und unterstützt damit die experimentellen Bereiche der PTB an vielen Stellen.

Schwerpunkte sind statistische Datenanalyse zur Auswertung von Messungen, numerische Verfahren zur Simulation von partiellen Differentialgleichung, Entwicklung mathematischer Modelle und die Bestimmung von Messunsicherheiten. Im Folgenden werden zwei typische Beispiele aus der Arbeit des Fachbereichs näher erläutert.

Aussagekraft eines Ringvergleichs bei instabilem Transferstandard

Ein wesentliches Ergebnis internationaler Vergleichsmessungen (*key comparisons*) ist die quantitative Bestimmung der Äquivalenz der beteiligten Laboratorien. Diese quantitative Bestimmung der Äquivalenz ist deshalb so wichtig, weil sie die Basis für die Validierung der am BIPM hinterlegten „calibration and measurement capabilities“ der Laboratorien darstellt. Instabilitäten des verwendeten Transferstandards können jedoch zu einer Verringerung der statistischen Aussagekraft von Vergleichsmessungen führen.

Bild 5 zeigt beispielhaft die Ergebnisse einer Vergleichsmessung mit instabilem Transferstandard. Auf der linken Seite sind die Messdaten ohne Berücksichtigung der Instabilität dargestellt. Die dabei auftretenden Diskrepanzen können jedoch nicht zur Bewertung der Laboratorien herangezogen werden, da sie möglicherweise auf die Instabilität

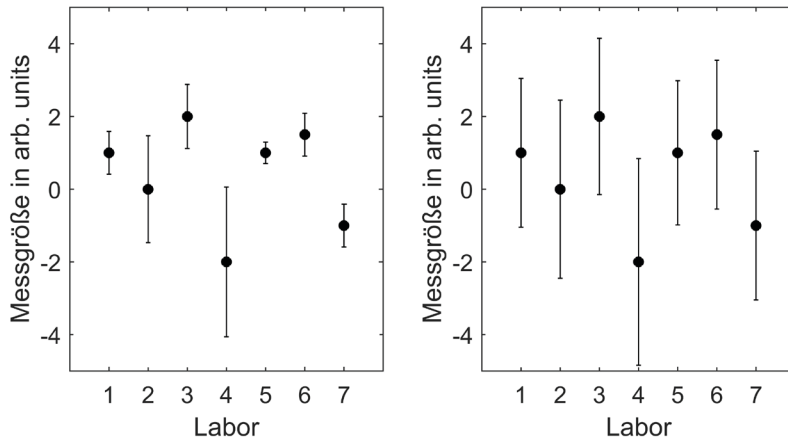


Bild 5: Messdaten einer Vergleichsmessung mit instabilem Transferstandard. Links ohne, rechts mit Berücksichtigung der Instabilität. Die Fehlerbalken zeigen jeweils die erweiterte Messunsicherheit an.

des Standards zurückzuführen sind. Bei korrekter Berücksichtigung der Instabilität des Transferstandards (Bild 5 rechts) werden diese Diskrepanzen eliminiert. Bei Verwendung eines instabilen Transferstandards erwartet man zudem eine untere Grenze für die Unsicherheit eines Labors, die im Rahmen einer Vergleichsmessung noch zuverlässig überprüft werden kann.

Zur Bestimmung dieser unteren Grenze wurde ein statistisches Verfahren entwickelt, mit dem die Verringerung der statistischen Aussagekraft einer Vergleichsmessung aufgrund eines instabilen Transferstandards quantifiziert werden kann. Die entwickelte Methodik wurde bereits auf einen aktu-

ellen Ringvergleich (CCM.FF-K6.2011) angewandt. Hierbei ergab sich, dass die dabei durchgeführte Validierung der Laboratorien trotz der Verwendung eines instabilen Transferstandards als zuverlässig angesehen werden kann.

Methoden zur Vorhersage von Unsicherheiten in Rohrströmungen

Rohrströmungen werden von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst. Hierzu zählen unsichere Anfangs- und Randbedingungen (z. B. für die Temperatur, den Druck sowie das Geschwindigkeitsprofil), Herstellungstoleranzen (z. B. Rauigkeiten) sowie Materialeigenschaften (z. B. Dichte, Viskosität), die

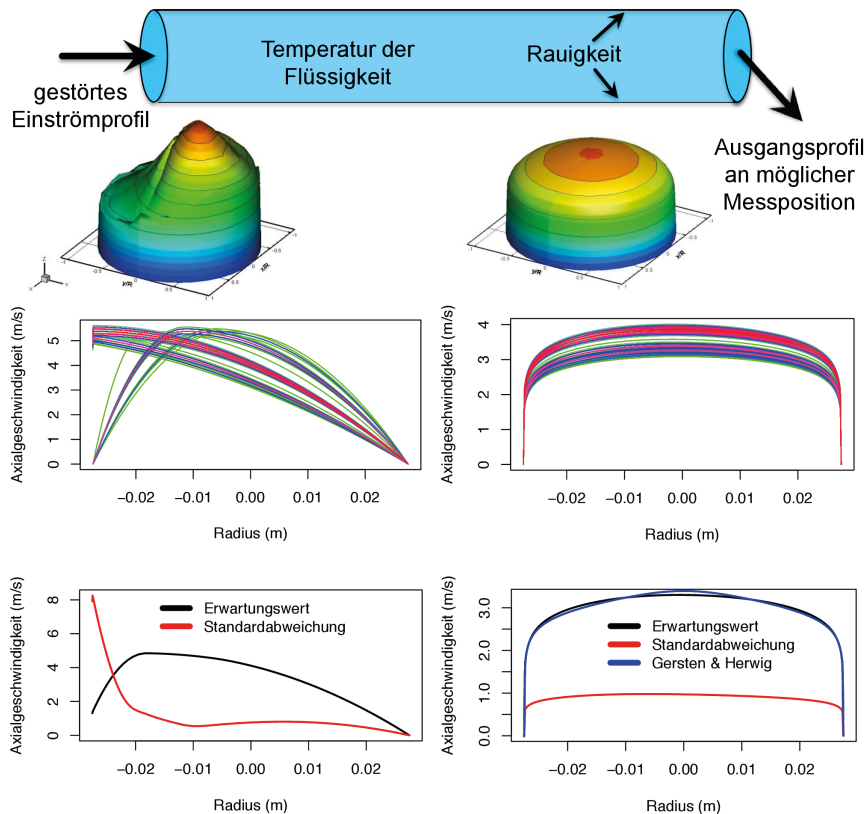


Bild 6: Mögliche unsichere Parameter und Einströmbedingungen bei einer Rohrströmung. Gegenüberstellung der Bandbreite der Strömungsprofile sowie des Erwartungswertes und der Varianz für die Fortpflanzung eines idealisiert gestörten Einströmprofils am Einlass und am Auslass.

wiederum die Messunsicherheit von Durchflussmessungen beeinflussen können. In der Praxis muss z. B. gewährleistet sein, dass die von der Einströmung herrührende Störung so weit abgeklungen ist, dass sie an der Messstelle in einen bestimmten Toleranzbereich liegt.

Zur Untersuchung solcher Unsicherheiten wird im Fachbereich 8.4 im Rahmen des EMRP-Projektes NEW04 die sogenannte „Polynomial-Chaos“-Methode in Verbindung mit Simulationen von Rohrströmungen angewendet. Diese Methode beruht darauf, eine Zufallsvariable in eine Reihe von orthogonalen Polynomen zu entwickeln. Aus den Moden der Reihenentwicklung ergeben sich der Erwartungswert und die Varianz der für die Anwendung relevanten Zielgröße. Die Koeffizienten werden durch Auswertung des deterministischen Strömungsproblems an festen, a priori bekannten Stützstellen im Variationsbereich des unsicheren Parameters ausgewertet.

In Bild 6 ist beispielhaft die Bandbreite der Geschwindigkeitsprofile sowie deren Erwartungswert und Varianz für die Fortpflanzung eines gestörten Einströmprofils am Einlass und am Auslass dargestellt. Da das Maximum des Einströmprofils nach links orientiert ist, ergibt sich eine Verschiebung der beiden Momente am Eingang nach links. Die Störung des Eingangsprofils klingt mit zunehmender Rohrlänge ab. Stromabwärts hat sich das Strömungsprofil dem voll ausgebildeten Normgeschwindigkeitsprofil für turbulente Strömungen von Gersten und Herwig weitgehend angenähert. Die zugehörige Varianz spiegelt die unterschiedlichen volumetrischen Geschwindigkeiten infolge unterschiedlicher Anfangsprofile wider.

Informationstechnische Expertise für den Verbraucherschutz im Messwesen

Der Fachbereich 8.5 *Metrologische Informationstechnik* analysiert zum einen im Rahmen der Konformitätsbewertung von Messgeräten im gesetzlichen Messwesen deren Software und erteilt zum anderen die Bauartzulassung für Geldspielgeräte nach einschlägiger Prüfung. Die zu formulierenden Anforderungen an die Systeme in beiden Bereichen werden aufgrund der verwendeten Informationstechnologie zunehmend ähnlicher.

Die Intensität der IT-Nutzung und die Komplexität der Applikationen haben sich weiter vertieft. Damit hat sich die Abhängigkeit von der sicheren Anwendung der IT verstärkt. IT-Sicherheitsunter-

suchungen dienen der objektiven Bewertung der Vertrauenswürdigkeit von Produkten und IT-Systemen im Interesse der Anwender und Hersteller. Dabei wird die Evaluation nach internationalen Standards durchgeführt, damit die Universalität des Prüfschemas sowie die internationale Anerkennung gewährleistet sind.

Um die gestiegenen Anforderungen an IT-basierte Systeme im gesetzlichen Messwesen oder bei der Bauartzulassung von Geldspielgeräten abzudecken, ist es nicht verwunderlich, dass IT-Sicherheitsgutachten auch in diesen gesetzlich geregelten Bereichen gefordert werden sollen. Ende des Jahres 2014 wurden zwei die PTB betreffende Verordnungsentwürfe veröffentlicht, die diese Art von Gutachten fordern. Dies sind die 6. Novelle der Spielverordnung (SpielV) und die Mess- und Eichverordnung (MessEV).

Die Besonderheiten der überwiegend IT-basierten Spielgeräte stellen bei der Zulassungsprüfung qualitativ neue Ansprüche an das Sicherungskonzept der Spielgerätesoftware und der Daten. Von zentraler Bedeutung ist dabei das Sicherheitsgutachten einer vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnologie anerkannten oder gleichwertigen Stelle, das zusammen mit dem Zulassungsantrag vom Antragsteller vorzulegen ist. Es wurden Kriterien für die Prüfung und Bewertung der Sicherheit von Geldspielgeräten in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte und Integrierte Sicherheit (AISEC) erarbeitet. Daraus wurde ein zu bewertender Mindestumfang von Angriffsszenarien in die vom Fachbereich 8.5 zu erarbeitende neue Technische Richtlinie aufgenommen.

Um IT-Sicherheitslücken in Messgeräten schnell und effektiv schließen zu können, wurde in der Verordnungsnovelle des gesetzlichen Messwesens ein Regelungsmechanismus für ein Eilverfahren zur Aktualisierung der Software von ans Internet angebotenen Messgeräten implementiert. Auch hier muss die Lösung zum Schließen dieser Lücke durch ein Sicherheitsgutachten nachgewiesen werden. Der Fachbereich 8.5 prüft im Rahmen dieses Eilverfahrens, inwieweit die implementierte Softwarelösung metrologische Eigenschaften korrumpieren könnte.

Diese Sicherheitsgutachten inhaltlich verstehen und bewerten zu können, ja neue Anforderungen aus dem Erfahrungsschatz des Fachbereiches über Manipulationen im Feld mit einzubringen und damit die Gutachten immer auf der Höhe der Zeit zu halten, setzt die Kenntnis der zugrundeliegenden Kon-

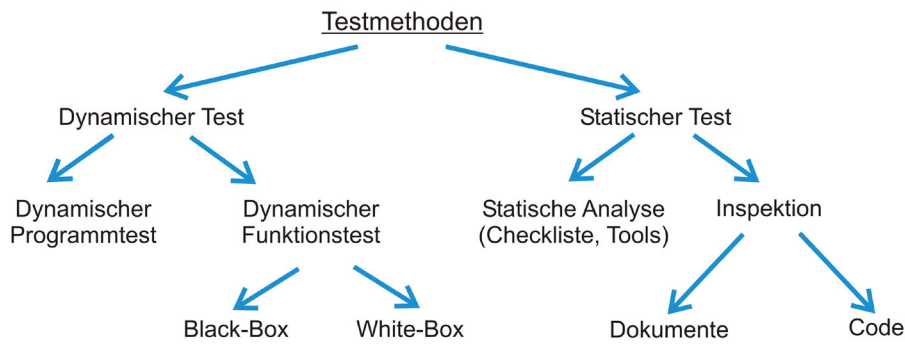


Bild 7: Testmethoden bei der Softwareprüfung

zepte der angewendeten internationalen Standards voraus. Der Fachbereich 8.5 ist hier gut aufgestellt.

Software-Anforderungen an Kommunikationseinrichtungen für Smart Meter

Das Thema Smart Meter Gateway beschäftigt den Fachbereich weiterhin. Aufgrund einer im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums erstellten Kosten-Nutzen-Analyse, die zu einem negativen Ergebnis kam, ist es auf nationaler Ebene geplant, Smart-Meter-Gateways als Kommunikationsbindeglied zwischen Energiemessgeräten und den über das Internet angeschlossenen Wirtschaftakteuren, zumindest für einen eingeschränkten Kundenkreis, einzuführen. Solche Gateways sind reine IT-Geräte mit umfangreichen metrologischen Funktionen und den Regelungen des gesetzlichen Messwesens unterworfen. Die rechtliche Grundlage für den Einsatz dieser Technologie im Rahmen des Energiewirtschaftsrechts steht jedoch noch aus.

Die konkreten metrologischen Anforderungen an solche Gateways wurden federführend vom Fachbereich 8.5 in Zusammenarbeit mit dem PTB-Arbeitskreis *Kommunikative Verbrauchszähler* entwickelt und in dem Dokument PTB-A50.8 als verlässliche Handlungshilfe für Herstellerunternehmen und Prüfinstitute niedergelegt.

Software-Prüfung komplementär zu Experiment und Simulation

Im zunehmenden Maße werden Messgeräte, die im gesetzlichen Messwesen zum Einsatz kommen, komplexer. Nicht alle messtechnischen Prüfungen können dann im Fachlabor der PTB durchgeführt werden. Insbesondere wenn sich die zu prüfenden Systeme nur begrenzt variieren lassen, die notwendigen Tests eine Gefährdung für die Prüfer oder Dritte bedeuten würden oder wenn seltene Ereignisse untersucht werden sollen, kommen vermehrt Simulationen ins Spiel. Jedoch selbst diese können

nicht alle Szenarien geeignet abdecken. Wenn Simulationstools an ihre Grenzen stoßen und Experimente nicht möglich sind, hilft in den meisten Fällen nur eine Software-Prüfung (Bild 7). Im Rahmen einer detaillierten Quellcodeanalyse findet dann z. B. ein Vergleich der gesetzlichen Vorgaben mit den von der Software gelieferten Ergebnissen statt, die auf Grundlage der vorgegeben Testparameter generiert wurden. Auf diese Weise lassen sich gefährliche Randbedingungen oder sehr spezielle Tests mit großer Detailtiefe durchführen. Die Vorgehensweise stellte sich als effektiv heraus und potenzielle Schwachstellen im Hinblick auf die gesetzlichen Anforderungen können erkannt werden.

Projekte

Das Forschungsvorhaben „On-Board-Metering“ (OBM) mit dem Ziel des Aufbaus einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität ist in die Feldversuchsphase eingetreten. Besonders hervorzuheben sind zwei Applikationen der im Feldtest verwendeten Software, die im Rahmen von OBM II entwickelt wurde: erstens ein Verifikationstool, das es dem Letztverbraucher und dem Ladepunktanbieter ermöglicht, die Korrektheit ihrer Rechnung nachzuvollziehen. Die zweite Applikation dient der statistischen Auswertung der von den mobilen Zählern bereitgestellten Daten, wie etwa Ladevorgangsdauer oder konsumierte Energiemenge (Bild 8). Die Applikation ist so angelegt, dass sich die Datenbank im Laufe der Feldversuche automatisch füllt und somit die Datengrundlage für eine statistische Auswertung der zeitlich-räumlichen Nutzung stetig wächst. Dazugehörige eichrechtliche Fragen der Markt- und Verwendungsüberwachung wurden mit den Landeseichbehörden geklärt und technisch umgesetzt.

Mitte 2014 wurde das EMRP-Forschungsvorhaben „Sensor Network Metrology for the Determination of Electrical Grid Characteristics“ gestartet. Zusammen mit dem Projektkoordinator NPL und

Verteilung der Ladevorgangsdauer

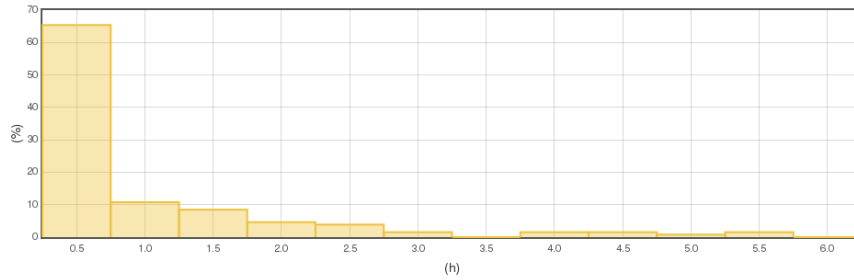
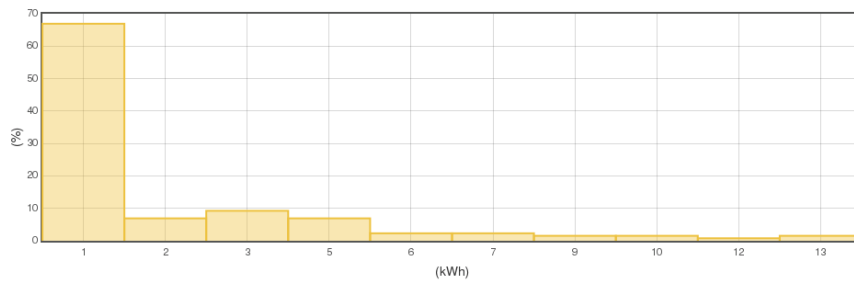


Bild 8: Von einem mobilen Zähler bereitgestellte Daten. Hier Verteilung der Ladevorgangsdauer und Energie pro Ladevorgang.

Verteilung der Energie pro Ladevorgang



neun weiteren Partnern sollen in diesem Vorhaben neue Messverfahren für Sensornetzwerke und Methoden zur Netzbeobachtung entwickelt werden. Der Fachbereich 8.5 wird die Auswirkungen von Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz von Sensornetzwerken unter besonderer Berücksichtigung neuer Netztopologien sowie veränderter dynamischer Anforderungen an die Messtechnik und die Messstrategien untersuchen und bewerten.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Strommessung in implantierten Drähten

Im Rahmen des EMRP-Projekts HLT06 „MR Safety“ wurde ein Sensor mit faseroptischer Signalübertragung entwickelt, um induzierte Hochfrequenz-Ströme in implantierten Drähten oder drahtähnlichen Objekten, z. B. Stimulationselektroden, im menschlichen Körper während einer MRT-Untersuchung zu messen. Die In-situ-Kalibrierung erfolgte mithilfe einer selbstentwickelten TEM-Zelle (Transversale Elektromagnetische-Zelle) mit Anbindung an das gyromagnetische Verhältnis von Protonen. An Drähten in einem Körperphantom konnte gezeigt werden, dass auch dann noch signifikante HF-Ströme (bis zu 100 mA bei 1 kW HF-Leistung) induziert werden, wenn alle Teile des Implantats sich bereits mehr als 30 cm außerhalb der Hochfrequenzspule des MR-Tomografen befinden. (G. Weidemann, FB 8.1, gerd.weidemann@ptb.de)

Messverfahren für die abgestrahlte Leistung von MRT-Hochfrequenzspulen

Für die Bewertung der Patientensicherheit einer mehrkanaligen MR-Sendespule bezüglich der verabreichten Hochfrequenzleistung ist die Kenntnis der kompletten Leistungsbilanz des Sendepfades essenziell. Bei Ultrahochfeldsystemen mit Feldstärken ≥ 7 T muss dafür auch die von der Spule abgestrahlte Leistung berücksichtigt werden, die bei geringeren Feldstärken (und damit Frequenzen) noch vernachlässigt werden kann. Daher wurde im Rahmen des EMRP-Projekts HLT06 „MR Safety“ ein Verfahren entwickelt, mit dem die bei einer Ultrahochfeld-MRT ins Fernfeld abgestrahlte HF-Leistung mithilfe eines Wellenleiters von 2,8 m Länge und 0,6 m Durchmesser durch wenige Punktmessungen bestimmt werden kann. Zusammen mit einem bereits zuvor aufgebauten System zur In-situ-Messung der Streuparameter-Matrix ist nun eine vollständige Bestimmung der Leistungsbilanz von MR-Sende-Arrays für beliebige Ansteuerbedingungen möglich. (F. Seifert, FB 8.1, frank.seifert@ptb.de)

Validiertes Spulenmodell

Bei einer Abschätzung der im Körper eines Patienten absorbierten Hochfrequenzleistung während einer MR-Untersuchung stellt sich stets die Frage der Vertrauenswürdigkeit der genutzten Modellrechnungen. Im Rahmen des EMRP-Projekts HLT06 „MR Safety“ wurde ein numerisches Modell

der Körperspule des hauseigenen MR-Tomografen erstellt, um die damit in einem Körperphantom erzeugten hochfrequenten E- und B-Felder zu simulieren. Durch Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messungen, die mit kalibrierten Feldsonden in und neben dem Phantom durchgeführt wurden, konnte das Spulenmodell optimiert und validiert werden. Kürzlich erfolgte Messungen der magnetischen Hochfrequenzfelder über dem Körper eines Probanden zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Modellrechnungen unter Nutzung dieses Spulenmodells. (G. Weidemann, FB 8.1, gerd.weidemann@ptb.de)

Degenerierter Platzwechsel

Der Einschluss des Edelgases Xenon in käfigartige Biomoleküle ist ein wichtiger Schritt in der Entwicklung neuer magnetresonanztomografischer Methoden zum Nachweis von Biomarkern in Zellen oder Organismen. Kernspinpolarisiertes ^{129}Xe wechselt permanent zwischen einem Platz im Käfigmolekül und der umgebenden Lösung hin und her, und dieser Austausch trägt entscheidend zur Signalverstärkung bei. Diesen Prozess zu verstehen ist unerlässlich für die Quantifizierung des Messsignals. Unter physiologischen Bedingungen ist jetzt die Koexistenz eines weiteren, bisher unbekanntem Platzwechselmechanismus‘ entdeckt worden, bei dem ein Xe-Atom in Lösung nicht einen freien Käfig besetzt, sondern vielmehr ein anderes, käfiggebundenes Xenon von diesem Platz verdrängt, ohne dass sich der Komplex vorher auflöst. Die praktische Bedeutung dieses „Degenerate Exchange“-Mechanismus‘ liegt darin, dass er über die Xe-Konzentration in Lösung von außen gesteuert und damit zur Signaloptimierung genutzt werden kann. (L. Mitschang, FB 8.1, lorenz.mitschang@ptb.de)

Messunsicherheiten von MR-Tomografen

Ein im Jahr 2012 durchgeführter „Ringvergleich“ von 3-Tesla-MRT-Scannern aus acht europäischen Forschungszentren wurde jetzt auf zwei Berliner Scanner ausgeweitet und ausgewertet. Insbesondere wurden hierbei die Unsicherheit von Längen- und Volumen-Messungen mit den beteiligten Tomografen bestimmt. Diese Messfehler betreffen direkt die Volumetrie verschiedener Hirnareale aus anatomischen MR-Bildern, die in der neurologischen Grundlagenforschung und Diagnostik, z. B. der Alzheimer-Erkrankung, gleichermaßen wichtig ist. Die Überprüfung der Genauigkeit des Prüfkörpers,

eines vom PTB-Gerätebau gefertigten Gitter-Phantoms, wurde um zwei CT-Messungen erweitert. (R. Brühl, FB 8.1, ruediger.bruehl@ptb.de)

Aufbau einer magnetisch geschirmten Kabine an der Neutronenquelle der TU München

An der TU München in Garching wurde im Rahmen des Schwerpunktprogramms der DFG „Precision experiments in particle- and astrophysics with cold and ultracold neutrons (SPP 1491)“ ein transportierbarer magnetisch abgeschirmter Raum mit einem Restfeld von < 700 Pikotesla und einem Feldgradienten von weniger als 300 pT/m in Betrieb genommen. In einer Kooperation zwischen der TU München, der University of Michigan und der PTB sollen in diesem Raum Präzisionsmessungen der Kernspinpräzession durchgeführt werden, wie zum Beispiel die Suche nach dem elektrischen Dipolmoment von Neutronen und schweren Atomkernen. Von derartigen Experimenten im Bereich extrem niedriger Energien werden neue Erkenntnisse in der Grundlagenphysik erwartet. (A. Schnabel, FB 8.2, allard.schnabel@ptb.de)

Miniaturisiertes SQUID-System zur Charakterisierung magnetisch geschirmter Umgebungen

Um die magnetischen Eigenschaften magnetisch geschirmter Umgebungen zu charakterisieren, wurde ein miniaturisiertes Messsystem auf der Grundlage von 16 supraleitenden Quanteninterferometern (SQUIDs) aufgebaut. Diese werden in einem kompakten unmagnetischen Dewar-Gefäß (30 cm Höhe und Durchmesser) in flüssigem Helium (-269°C) betrieben. Die SQUIDs wurden auf den sechs Flächen eines im *Rapid-Prototyping*-Verfahren hergestellten Würfels am Gefäßboden montiert. Mit diesem Messsystem lässt sich die räumliche Verteilung der absoluten magnetischen Flussdichte innerhalb magnetisch geschirmter Umgebungen (wie z. B. in der magnetisch geschirmten Kabine an der TU München) im Pikotesla-Bereich sowie das magnetische Rauschen unterhalb von $5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ untersuchen. (J. Voigt, FB 8.2, jens.voigt@ptb.de)

Rauscharme EEG/MEG -Systeme ermöglichen die nicht-invasive Messung von hochfrequenten Aktivitäten (über 1 kHz) im Gehirn

Die neuronale Aktivität des menschlichen Gehirns ist mit elektrischen Oszillationen von sehr niedrigen Frequenzen ($< 0,05$ Hz) bis hin zu Frequenzen über 1 kHz verbunden. Ultraschnelle Oszillationen bei etwa 1 kHz konnten allerdings früher nur mit invasiven Tiefenelektroden nachgewiesen werden. Um diese schnellen Signale auch nicht-invasiv auf der Kopfoberfläche messbar zu machen, wurde in

der PTB gemeinsam mit der Charité zunächst ein rauscharmer EEG-Verstärker entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Jetzt ist es gelungen, mit einem rauscharmen SQUID-Messsystem diese schnellen Hirnsignale auch berührungslos über eine magnetische Messung (MEG) nachzuweisen. Die Kombination der beiden Techniken EEG und MEG ermöglicht nun eine genauere Rekonstruktion der zugrundeliegenden neuronalen Generatoren und damit ein besseres Verständnis der Reizverarbeitung in diesem Frequenzbereich. (M. Burghoff, FB 8.2, martin.burghoff@ptb.de)

Neuentwicklung von Referenzmessverfahren für die Laboratoriumsmedizin: Mikroskopische Zellkonzentrationsbestimmung

Im europäischen Forschungsprojekt „BioSITrace“ zur Quantifizierung biologischer Entitäten wird untersucht, inwieweit Zählverfahren als fundamentale Messmethoden im Rahmen des SI-Systems für biologische, biochemische oder biomedizinische Messgrößen eingesetzt werden können. An der PTB wurden entscheidende Entwicklungsschritte abgeschlossen, um neben der Methode der Durchflusszytometrie auch die automatisierte mikroskopische Zellzählung als Referenzmessverfahren einzusetzen. Die Durchflusszytometrie wird derzeit als primäres Referenzmessverfahren zur Bestimmung von Zellkonzentrationen im Blut eingesetzt. Die Entwicklung des Referenzmessverfahrens unter Einsatz der Mikroskopie ermöglicht darüber hinaus eine rückführbare Zellkonzentrationsbestimmung z. B. bei Untersuchung des Liquor cerebrospinalis. (M. Kammel, FB 8.3, martin.kammel@ptb.de)

Pilotstudie zur mikroskopischen Zellzählung

Die mikroskopische Zellzählung wird in der Biotechnologie und Pharmazie zur Qualitätskontrolle und in der Medizin auch zur Diagnostik eingesetzt. Bislang fehlen jedoch etablierte Referenzverfahren für die quantitative Analyse von mikroskopischen Bildern. Die Bioanalysis Arbeitsgruppe des Consultative Committee for Amount of Substance (CCQM) der Meterkonvention hat eine Pilotstudie für die Messung der grundlegenden Parameter (Zellanzahl, Zellbedeckung) organisiert, an der auch die PTB teilnimmt. In dem Ringvergleich werden Fluoreszenz- und Phasenkontrastmessungen an adhärent gewachsenen Zellen untersucht. Die Messungen wurden inzwischen abgeschlossen und werden zurzeit ausgewertet. (A. Kummrow, FB 8.3, andreas.kummrow@ptb.de)

Realistische Modellierung von Kantenrauheit mittels Fourier-Optik

Durch die fortschreitende Miniaturisierung in der Halbleitertechnik gewinnen die realistische Beschreibung und die zerstörungsfreie Messung von Rauheit zunehmend an Bedeutung. Innerhalb des EMRP-Projekts IND17 wurde ein neuer und effizienter Algorithmus zur Berechnung der Auswirkung rauher Kanten auf die scatterometrisch gemessenen Lichtintensitäten entwickelt. Kernstück ist die 2D-Fouriertransformation der Lichtverteilung in einer Aperturebene, in der die Linienkanten rau sind. Sie erlaubt die Simulation verschiedener realistischer Rauheitsmuster und bestätigt, dass die mittlere Rauheitsamplitude dieser Muster aus Scatterometriedaten gut bestimmt werden kann. Ein erster Vergleich mit 3D-AFM-Messungen liefert vielversprechende Ergebnisse. (H. Gross, FB 8.4, hermann.gross@ptb.de)

Aussagekraft eines Ringvergleichs bei instabilem Transferstandard

Ein wesentliches Ergebnis internationaler Vergleichsmessungen (*key comparisons*) sind die *degrees of equivalence*, die die Äquivalenz der beteiligten Laboratorien quantifizieren. Diese Charakteristika in der Analyse von Ringvergleichen sind auch deshalb so wichtig, weil sie die Basis für die Validierung der am BIPM hinterlegten „calibration and measurement capabilities“ der Laboratorien darstellen. Instabilitäten des verwendeten Transferstandards können jedoch zu einer Verringerung der statistischen Aussagekraft dieser *degrees of equivalence* führen. Diese Verringerung wurde erstmals mittels einer statistischen Analyse quantifiziert, womit eine Festlegung der maximal tolerierbaren Größe der Instabilität bei der Durchführung von Ringvergleichen ermöglicht wird. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de, B. Mickan, FB 1.4, bodo.mickan@ptb.de)

GUM: Past, Present and Future

Im Rahmen des workshops „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM): Past, Present and Future“ den das NPL Ende 2013 veranstaltete, wurden aktuelle Entwicklungen im Rahmen der bevorstehenden Revision des GUMs diskutiert und 2014 in einem Sonderband der Zeitschrift *Metrologia* veröffentlicht. Die PTB hat in einem eingeladenen Beitrag die Unterschiede des aktuellen GUMs mit einer vollständigen Bayes'schen Unsicherheitsanalyse illustriert und dabei insbesondere die Vorteile des letztgenannten Zugangs aufgezeigt. (C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

Neues Verfahren zur Lösung von rechenintensiven inversen Problemen

Die Lösung statistischer inverser Probleme mit Hilfe von Sampling-Methoden erfordert eine vielfache Berechnung des Vorwärtsmodells. Rechenintensive Anwendungen wie die Scatterometrie können daher nicht ohne Approximationen behandelt werden. An der PTB ist es gelungen, ein Verfahren zu entwickeln, das es ermöglicht, die Bayes'sche Methode auf das inverse Problem in der Scatterometrie anzuwenden. Dieses Verfahren ist auch auf andere Systeme anwendbar. (S. Heidenreich, FB 8.4, sebastian.heidenreich@ptb.de)

Verbesserung der Birge-Methode

Die sogenannte Birge-Methode wird in der Metrologie benutzt, um die Unsicherheiten inkonsistenter Messergebnisse für die gleiche Messgröße zu erweitern. Dabei werden alle angegebenen Unsicherheiten mit dem gleichen Faktor vergrößert, der durch eine Konsistenzbedingung der Daten ermittelt wird. Eine statistische Untersuchung dieses Vorgehens hat gezeigt, dass der verwendete Faktor zu klein ist und damit auch zu einer systematischen Unterschätzung des aus den Messergebnissen ermittelten ausgeglichenen Wertes für die Messgröße führt. Eine entsprechende Verbesserung ist durch eine statistische Analyse erarbeitet und veröffentlicht worden. (O. Bodnar, FB 8.4, olha.bodnar@ptb.de)

Virtuelles Experiment für Nahfeldgoniophotometrie

Die kamerabasierte Nahfeldgoniophotometrie ermöglicht die Bestimmung der Leuchtdichteverteilung von Leuchten und Lampen, wie sie z. B. für die Konstruktion von Reflektoren benötigt wird. Zur Charakterisierung der Genauigkeit dieser komplexen Messtechnik wurde im Rahmen des MNPQ-Projekts 04/09 ein Computermodell entwickelt. Mithilfe dieses Modells konnten nun wesentliche Einflussfaktoren identifiziert werden, die einen maßgeblichen Beitrag zur resultierenden Messunsicherheit liefern. Darüber hinaus konnte die Zuverlässigkeit des virtuellen Experiments durch einen Vergleich mit im FB 4.1 durchgeführten realen Messungen aufgezeigt werden. (F. Schmähling FB 8.4, franko.schmaehling@ptb.de)

Einheitliche Bayes'sche Auswertung von immunologischen Tests einer Vergleichsstudie

Die ELISA-Tests der internationalen Vergleichsstudie CCQM P58.1 wurden in der PTB mit einer einheitlichen Bayes'schen Methode ausgewertet. Insbesondere für 3 der ELISAs gelang dies erst durch Einbringen von Zusatzwissen (in Form von a-pri-

ori-Verteilungen), da diese Tests schlecht gestellte Regressionsprobleme beinhalten. Darüber hinaus führten die Prioren (im Vergleich zu den konventionellen laborspezifischen Auswertungen) zu zuverlässigeren Unsicherheiten, insbesondere bei kleinen Konzentrationen des Herzinfarktmarkers Troponin I. (K. Klauenberg, FB 8.4, katy.klauenberg@ptb.de)

Fortpflanzung von Unsicherheiten bei Strömungen

Strömungen werden von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst. Hierzu zählen unsichere Anfangs- und Randbedingungen (z. B. für Temperatur, Druck, Geschwindigkeitsprofil), Herstellungstoleranzen und -ungenauigkeiten (z. B. Rauigkeiten, Winkel, Radian), die wiederum die Messunsicherheit von Durchflussmessungen beeinflussen können. Im Rahmen des EMRP-Projektes NEW04 wurde die Polynomial-Chaos-Methode (Wiener, 1938) auf eine Rohrströmung und eine Gasdüse angewandt. Damit konnte der Einfluss unsicherer Eingangsdaten auf praxisrelevante Ausgangsgrößen quantifiziert werden. (S. Schmelter, FB 8.4, sonja.schmelter@ptb.de)

Start des EMRP-Projekts „Sensor Network Metrology for the Determination of Electrical Grid Characteristics“

Mitte 2014 wurde das EMRP-Forschungsvorhaben „Sensor Network Metrology for the Determination of Electrical Grid Characteristics“ gestartet. Zusammen mit dem Projektkoordinator NPL und neun weiteren Partnern sollen in diesem Vorhaben neue Messverfahren für Sensornetzwerke und Methoden zur Netzbeobachtung entwickelt werden. Dazu gehören Algorithmen zur Schätzung des Netzzustandes in unvollständig gemessenen Netzstrukturen und zur optimalen Anordnung von Messsensoren sowie Algorithmen zur Verarbeitung der Messdaten von intelligenten Messgeräten und Synchrophasoren (PMU). Dieser Bereich wird in der PTB vom Fachbereich 8.4 bearbeitet. Weiterhin sollen die Auswirkungen von Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz von Sensornetzwerken unter besonderer Berücksichtigung neuer Netztopologien der veränderten dynamischen Anforderungen an die Messtechnik und die Messstrategien untersucht und bewertet werden. Dieser Komplex „Sicherheit und Standardisierung“ wird federführend vom Fachbereich 8.5 bearbeitet. (J. Neumann, FB 8.5, joerg.neumann@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Mikrofluidische Sensoren für kombinierte optische und elektrische Differenzierung von Partikeln

Mikrofluidische Sensoren für die Zählung von Partikeln werden gegenwärtig weltweit untersucht. Von der PTB werden Sensoren untersucht, die mit unterschiedlichen lithografischen Methoden (z. B. Glasätztechnik) hergestellt werden. Neben der Messung optischer Streulicht- und Fluoreszenzsignale gestatten mit Elektroden ausgestattete Strukturen auch die Messung von Impedanzänderungen. Für die Optimierung der Leukozytendifferenzierung werden beispielsweise gegenwärtig Impedanzänderungen im Frequenzbereich von 0,5 MHz bis 100 MHz untersucht, mit dem Ziel, die Messung des Immunstatus zu verbessern. Die dabei gewonnenen Ergebnisse fließen in das Design neuartiger Durchflussküvetten ein, die im Rahmen eines Technologietransfer-Projektes (MNPQ-Vorhaben) mit der Firma Sysmex-Partec zur Erweiterung etablierter Messmöglichkeiten eingesetzt werden können. (P. Simon, FB 8.3, peter.simon@ptb.de)

Neues EMRP-Projekt ENG58 zur Messung von Mehrphasenströmungen

Die Hälfte des Energieverbrauches der Welt wird durch Öl und Gas abgedeckt. Bei deren Gewinnung treten mehrphasige Fluidströmungen auf, deren Strömungsmuster je nach Zusammensetzung und Prozessbedingungen variieren kann. Das Projekt zielt auf eine Reduktion der Messunsicherheit, die derzeit, insbesondere unter Feldbedingungen, bis zu 20 % betragen kann. Dazu werden in der Arbeitsgruppe 8.41 numerische Modelle zur Strömungssimulation (CFD) für verschiedene Prozessbedingungen und Materialzusammensetzungen entwickelt und der Beitrag der daraus resultierenden Parametervariationen zur Messunsicherheit quantifiziert. (R. Model, FB 8.4, regine.model@ptb.de)

EMRP-Projekt IND09 „Rückführbare dynamische Kalibrierung für mechanische Größen“

Das 2011 von 9 europäischen Partnern gestartete EMRP-Projekt IND09 wurde im August dieses Jahres erfolgreich abgeschlossen. Das Projekt legte für die mechanischen Größen Kraft, Druck und Drehmoment die Grundlagen für die Etablierung einer rückführbaren dynamischen Kalibrierung. Der Fachbereich 8.4 trug an diesem Projekt durch die Entwicklung von Parameterschätzverfahren, Verfahren zur statistischen Bestimmung von Unsicherheitsbudgets und die Entwicklung relevanter Soft-

ware bei. (S. Eichstädt, FB 8.4, sascha.eichstaedt@ptb.de)

Neue Bewertung und Interpretation von Messdaten in der multidimensionalen Reflektometrie

Im Rahmen eines EMRP-Projektes zur Charakterisierung visueller optischer Eigenschaften von Oberflächen wurde eine neuartige Metrik zur Bewertung und Interpretation multidimensionaler Messdaten in der Reflektometrie entwickelt. Die Metrik erlaubt es, Ähnlichkeiten und Unterschiede der optischen Eigenschaften von Oberflächen in einer Art zu quantifizieren, die der menschlichen Wahrnehmung entspricht. Damit kann die visuell durchgeführte Beurteilung optischer Eigenschaften von Oberflächen auf ein messbares, objektives Kriterium zurückgeführt werden. (M. Langovoy, FB 8.4, mikhail.langovoy@ptb.de)

Analytische Jacobi-Matrizen für das Tilted-Wave-Interferometer

Im Rahmen des EMRP-Projektes IND10 wurde die bisherige numerische Bestimmung der notwendigen Jacobi-Matrizen zur Lösung des inversen Problems beim Tilted-Wave-Interferometer durch eine analytische Bestimmung ersetzt. Je nach Anzahl der Schätzparameter führt dies zu einer Beschleunigung der Lösung des inversen Problems um einen zwei- bis fünfstelligen Faktor. Diese Verbesserung führt nicht nur für die Anwender zu einer erheblich Zeitersparnis, sondern ermöglicht auch systematische Untersuchungen des Verfahrens. (I. Fortmeier, FB 8.4, ines.fortmeier@ptb.de)

Feldversuchsphase für OBM II „Laden von Elektrofahrzeugen – Mobiles Messen“

Das Forschungsvorhaben „On-Board Metering“ (OBM) mit dem Ziel des Aufbaus einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität ist in die Feldversuchsphase eingetreten. Besonders hervorzuheben sind zwei Applikationen der im Feldtest verwendeten Software, die im Rahmen von OBM II entwickelt wurde. Die erste ist ein Verifikationstool, das es dem Letztverbraucher und dem Ladepunktanbieter ermöglicht, die Korrektheit ihrer Rechnung nachzuvollziehen. Die zweite Applikation ist eine auf Servern der PTB bereitgestellte Web-Anwendung zur statistischen Auswertung der von den mobilen Zählern gemessenen Daten wie, z. B. Ladevorgangsdauer oder konsumierte Energiemenge. Die Applikation ist so angelegt, dass sich die Datenbank im Laufe der Feldversuche automatisch füllt und somit die Datengrundlage für eine statistische Auswertung der zeitlich-räumlichen Nutzung stetig wächst. Dazugehörige eichrechtliche

Fragen der Markt- und Verwendungsüberwachung wurden mit den Landeseichbehörden geklärt und technisch umgesetzt. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)

Promotionsprojekt zur Betriebssystemabsicherung in Messgeräten

Standard-Betriebssysteme und ihre Programme stellen ein Risiko im gesetzlichen Messwesen dar, da deren Schwachstellen auch in der Software von Messgeräten vorliegen. Gezielte Software-Manipulationen am Messgerät werden durch diese erleichtert. Das Ziel dieses Projektes ist es, eine Systemarchitektur zu kreieren, die die Standardbetriebssysteme kapselt und die gesamte Struktur des Systems modularisiert, um Schwachstellen und Angriffspunkte so weit wie möglich zu isolieren. Dies wird durch den Einsatz von sogenannten Mikrokernen und den Einsatz von Virtualisierungstechniken realisiert. Die in diesem Projekt bisher erstellte Systemarchitektur basiert auf einem modularen Design, bei dem die einzelnen Module die Forderungen der Messgeräte-Richtlinie der Europäischen Union (MID) durch Anwendung des WELMEC 7.2 Software Guides abbilden. Die Architektur liefert ein Rahmenwerk, um alle messrechtlich relevanten Funktionen sicher durchzuführen. Damit wird im Idealfall der Bereich der Software, der rechtlich nicht relevant ist, gegenüber dem rechtlich relevanten maximal erweitert. Dadurch entstehen dem Messgerätehersteller bei einem Softwarewechsel wesentlich geringere Kosten, und der Marktüberwachung wird gleichzeitig entsprechende Sicherheit garantiert. Insgesamt sind die Kosten für den Hersteller bei Umsetzung dieses Konzeptes niedrig, da frei verfügbare Softwareprodukte zum Einsatz kommen. (D. Peters, FB 8.5, daniel.peters@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Erwärmung von Hüftimplantaten bei MRT-Untersuchungen

Im Rahmen des EMRP-Projekts HLT05 „MRI Safety“ nahm ein Wissenschaftler des Fachbereichs 8.1 an einem Wissenschaftleraustauschprogramm (RMG) mit dem Ziel des Know-how-Transfers teil. Während des dreimonatigen Gastaufenthalts in der Gruppe von Prof. Jeffrey Hand am King's College London wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, um die Erwärmung von Hüftimplantaten bei MRT-Untersuchen zu bestimmen. Variationen am Modell, wie z. B. Material und Lage des Implantats, führen zu einer verbesserten Risikoeinschätzung. Der in London begonnene, enge Erfahrungsaustausch wird auch nach der Rückkehr an die PTB

fortgeführt. (R. Brühl, FB 8.1, ruediger.bruehl@ptb.de)

MR-Spektroskopie an die Anatomie angepasst

In der quantitativen MR-Spektroskopie (MRS) des Gehirns entspricht es dem aktuellen Stand der Technik, das Messsignal aus einem quaderförmigen Zielvolumen (Voxel) zu gewinnen, das in der interessierenden Hirnregion platziert wurde. Allerdings ist ein quaderförmiges Volumen nicht an die Anatomie des Gehirns angepasst, sodass solche MRS-Voxel entweder sehr klein ausfallen müssen oder in erheblichem Maße Bereiche außerhalb des Zielareals einschließen. In der Arbeitsgruppe In-vivo-MRT wurde jetzt eine neue MRS-Sequenz entwickelt, die es in zwei Dimensionen erlaubt, anatomisch angepasste Volumina anzulegen. Durch ein Zwei-Schuss-Verfahren zur Lokalisierung auch in der dritten Raumrichtung ist es gelungen, das MR-Signal mit einer sehr kurzen Echozeit auszulesen. Über die bessere anatomische Anpassung der Zielvolumina hinaus können damit auch Metabolite mit kurzer Spin-Spin-Relaxationszeit detektiert werden. (P. Waxmann, FB 8.1, patrick.waxmann@ptb.de)

Funktionelle Magnetresonanz-Spektroskopie am 7T-Tomografen erfasst dynamische Konzentrationsänderungen wichtiger Metabolite im Gehirn

MR-Spektroskopie (MRS) im Ultrahochfeld bietet neben höherem Signal-Rauschverhältnis noch den zusätzlichen Vorteil der höheren spektralen Auflösung. Dies wurde in einer Studie am 7-Tesla-MRT an der Berliner Ultrahochfeld-Facility ausgenutzt, um dynamische Veränderungen von Metabolitkonzentrationen während wechselnder funktioneller Stimulation zu bestimmen. In der Studie wurde in Probanden nacheinander jeweils ein Areal in der rechten sowie der linken Gehirnhälfte visuell stimuliert, doch wurden die MR-Spektren immer nur lokalisiert in der rechten Hälfte akquiriert. Statistisch signifikante Konzentrationsänderungen infolge der alternierenden Stimulation wurden für Laktat und GABA (Gamma-Aminobuttersäure) beobachtet, während alle anderen nachgewiesenen Metabolite keinen signifikanten Effekt zeigten. Das positive Ergebnis dieser Proof-of-Principle-Studie ist umso bemerkenswerter, als sowohl Laktat als auch GABA nur mit äußerst geringen Konzentrationen im Gehirn vorhanden sind. Dies bestätigt erneut, dass gerade MRS überproportional von der ultrahohen Feldstärke profitiert. (R. Mekle, FB 8.1, ralf.mekle@ptb.de)

Messungen mit EEG und MRS geben Aufschluss über Mechanismen der multisensorischen Integration im Gehirn

Um die Arbeitsweise des Gehirns bei der sogenannten multisensorischen Integration messtechnisch zu erfassen, wurden Versuchspersonen in Kooperation mit der Charité-Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie mit den Methoden Elektroenzephalografie (EEG) und Magnetresonanz-Spektroskopie (MRS) untersucht. Bei der Verarbeitung von Sinnesreizen unterschiedlicher Natur (akustisch, visuell etc.) spielt der supratemporale Gyrus (STG) eine wichtige Rolle. In diesem Hirnareal wurde die oszillatorische Gammabandaktivität mithilfe der EEG und die Konzentration des inhibitorischen Neurotransmitters GABA (Gamma-Aminobuttersäure) mittels MR-Spektroskopie am 3-Tesla-MRT der PTB gemessen, während den Versuchspersonen ein optisch-akustisches Paradigma präsentiert wurde, das geeignet ist, Sinnestäuschungen („Double Flash Illusion“) hervorzurufen. Die Resultate der ersten Messreihe zeigen Korrelationen sowohl zwischen GABA-Konzentration im STG und Illusionsrate als auch zwischen GABA-Konzentration und Stärke der Gammabandaktivität. Diese Ergebnisse geben den Neurowissenschaftlern wichtige Hinweise auf die biochemischen Mechanismen der multisensorischen Integration. (R. Mekle, FB 8.1, ralf.mekle@ptb.de)

MR-spektroskopischer Nachweis von Stoffwechsellumstellung durch ketogene Diät

Unterzieht man sich einer ketogenen Diät, d. h. eine Ernährung mit einem sehr geringen Kohlenhydrat- und hohen Fettanteil bei insgesamt begrenzter Kalorienzufuhr, dann passt sich der Stoffwechsel im Körper an, um die Energieversorgung insbesondere des Gehirns von Glucose auf Ketonkörper (Acetoacetat, 3-Hydroxybutyrat, Aceton) umzustellen. Ketogene Diät war früher das häufig einzige Heilmittel bei schweren neurologischen Erkrankungen wie Epilepsie und wird heute zunehmend als Therapiemaßnahme bei verschiedenen neurologischen Störungen untersucht. In Kooperation mit der Charité-Neurologie wurden Magnetresonanz-Spektren aus dem Gehirn junger Probanden gemessen, die sich im Selbstversuch einer zweiwöchigen ketogenen Diät, gefolgt von einer gleichlangen Fastenphase, unterzogen hatten. Dabei konnten die durch die Diät vermehrt gebildeten Ketonkörper im Gehirn als neue Resonanzlinien im MR-Spektrum nachgewiesen werden. Dieser methodische Ansatz kann jetzt sowohl zur Erforschung von Stoffwechselre-

aktionen als auch zur Therapieüberwachung eingesetzt werden. (F. Schubert, FB 8.1, florian.schubert@ptb.de)

Abschluss des vom BMBF geförderten Verbundprojektes „Bernstein Fokus: Neurotechnologie Berlin“

Ein Teilziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung einer neuartigen Messmethode zur direkten Darstellung von Hirnströmen mit der Magnetresonanztomografie (MRT) im niedrigen Magnetfeld. Mittels Phantomstudien wurden an einem dafür neuentwickelten rauscharmen SQUID-Messplatz die experimentellen Voraussetzungen für einen MRT-Nachweis von Hirnströmen ermittelt und validiert. In einer Promotionsarbeit werden nun diese Rahmenbedingungen messtechnisch umgesetzt, um diese künftig in In-vivo-Messungen einzusetzen. (N. Höfner, FB 8.2, nora.hoefner@ptb.de)

Entwicklung eines neuen robusten Multikanal-SQUID-Systems für biomagnetische Anwendungen

In Zusammenarbeit der PTB mit der Magnicon GmbH wird zurzeit ein Multikanal-SQUID-System entwickelt, das für ein breites Spektrum von Anwendungen eingesetzt werden kann. In der ersten Phase wurde dazu ein Prototyp aufgebaut, der als Basismodul für das Gesamtsystem dient. Verwendung finden die im Fachbereich 7.2 der PTB entwickelten SQUID-Stromsensoren, welche induktiv mit supraleitenden Aufnahmespulen verschiedener Geometrien verbunden sind. Dieses Konzept erlaubt den Betrieb in gepulsten Feldern von einigen 10 mT, ohne dabei die Empfindlichkeit der SQUIDs zu beschränken. Da das System in der extrem störungsfreien Umgebung des BMSR-2 der PTB betrieben werden soll, wurde besonderer Wert auf minimale zusätzliche Feldverzerrungen durch das SQUID-System bei der Entwicklung gelegt. (R. Körber, FB 8.2, rainer.koerber@ptb.de)

Mößbauerspektrometrie für die strukturelle Charakterisierung von magnetischen Eisenoxid-Nanopartikeln für ihre Anwendung in der Biomedizin

Für die Bestimmung der strukturellen Zusammensetzung von Eisenoxid-Nanopartikeln eignet sich hervorragend die temperaturabhängige ^{57}Fe -Mößbauerspektroskopie, mit der sich die Fe-Oxidationsstufen und Anteile unterschiedlicher Eisenphasen in Nanopartikelproben identifizieren und quantifizieren lassen. Für diese Aufgaben wurde im Fachbereich *Biosignale* ein Mößbauer-Spektrometer in Betrieb genommen. Dieses Gerät ist eine wich-

tige Ergänzung der magnetischen Messtechnik zur Charakterisierung von Eisenoxid-Nanopartikeln, die derzeit für Anwendungen in neuartigen medizinischen Therapie- und Diagnoseformen entwickelt werden. (F. Wiekhorst, FB 8.2, frank.wiekhorst@ptb.de)

Umfrage zu Nukleinsäureamplifikationstests zum schnellen Nachweis von Krankheitserregern

Nukleinsäuretests zum Nachweis von Krankheitserregern sind in der Klinik Routine und werden für ein breites Spektrum von Krankheitserregern angewendet. Neue Technologien und Entwicklungen führen dabei zu kürzeren Testzeiten, die so eine schnellere Behandlung ermöglichen. Im Rahmen des EMRP-Projektes „INFECT-MET“ wurde eine Umfrage unter Herstellern und Anwendern von Nukleinsäureamplifikationstests durchgeführt, wobei insbesondere der Bedarf und der Einsatz neuer Technologien wie z. B. isothermale Amplifikation oder schnelle Polymerase-Ketten-Reaktion (rapid PCR) untersucht wurden. Die Ergebnisse der Umfrage werden in der Zeitschrift „GMS Zeitschrift zur Förderung der Qualitätssicherung in medizinischen Laboratorien“ veröffentlicht. (M. Hussels, FB 8.3, martin.hussels@ptb.de)

Vergleichsmessungen zur Zellkonzentrationsbestimmung von Erythrozyten und Leukozyten

Bisher bestimmt die PTB die Zellkonzentrationen in Ringversuchen zum Kleinen Blutbild für die Qualitätssicherung der labormedizinischen Untersuchungen in Deutschland. Um diese Aktivitäten an akkreditierte Laboratorien abgeben zu können, unterstützt die PTB u. a. das Städtische Klinikum Karlsruhe. Ein in der PTB entwickelter Prototyp eines optischen Durchflusszytometers wurde erfolgreich im Klinikum installiert. Vergleichsmessungen beim Kleinen Blutbild zeigen gute Übereinstimmungen zu den Ergebnissen, die in Ringversuchen mit dem Referenzmessgerät an der PTB durch Impedanzteilchenzählung ermittelt wurden. (M. Kammel, FB 8.3, martin.kammel@ptb.de)

Charakterisierung und Vergleich von Geräten zur zeitaufgelösten funktionellen optischen Bildgebung des Gehirns

Die Leistungsfähigkeit derartiger Geräte von vier Partnereinrichtungen wurde im Rahmen des EU-Projektes „nEUROpt“ anhand zweier Protokolle bewertet und verglichen. Das erste Protokoll („Basic Instrumental Performance Protocol“) beinhaltet eine Reihe grundlegender Tests zur direkten Charakterisierung instrumenteller Eigenschaften, insbesondere der Empfindlichkeit des Detektionssystems

und der zeitlichen Gerätefunktion. Das zweite Protokoll („nEUROPt Protocol“) betrifft die räumliche Auflösung, Empfindlichkeit und Genauigkeit bei der Quantifizierung von Absorptionsänderungen im Gehirn. Dazu wurden lokalisierte Absorptionsänderungen mittels kleiner Absorptionskörper in flüssigen Phantomen modelliert und verschiedene Größen, z. B. die Ortsabhängigkeit des Kontrastes, unter definierten Bedingungen gemessen. Zudem wurden Zweischichtphantome mit variablem Absorptionskoeffizienten eingesetzt, um insbesondere die Tiefenselektivität zu quantifizieren und für verschiedene Geräte und Auswertelgorithmen direkt miteinander zu vergleichen. Dies ist von Bedeutung für die Separation von Signalen funktioneller Hirnaktivierung von systemischen Veränderungen in der Haut. Die beiden Protokolle dienen der Validierung und Qualitätssicherung und unterstützen Design und Optimierung von Geräten zur diffusen optischen Bildgebung. Die Ergebnisse wurden in zwei Artikeln im Journal of Biomedical Optics publiziert. (H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

Separation zerebraler und oberflächlicher hämodynamischer Signale mittels zeitaufgelöster funktioneller Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS)

Bei optischen Messungen der Hirnaktivierung sind zerebrale hämodynamische Signale häufig von oberflächlichen Signalen überlagert. Wir haben eine neue Methode zu deren Trennung entwickelt, die auf zeitaufgelösten fNIRS-Messungen und einem Zweischichtmodell des Kopfes beruhen. Die für die Rekonstruktion der Absorptionsänderungen in den beiden Schichten benötigten Empfindlichkeitsfaktoren wurden ausgehend von individuellen, aus Messungen ermittelten Streu- und Absorptionskoeffizienten berechnet. Die Methode wurde an einem flüssigen Zweischichtphantom mit variablem Absorptionskoeffizienten erprobt und bei der Auswertung von In-vivo-Messungen zur kognitiven und motorischen Hirnaktivierung erfolgreich eingesetzt. Die im Rahmen einer Promotionsarbeit (Dr. A. Jelzow) erzielten Ergebnisse wurden in Biomedical Optics Express veröffentlicht. (H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

Referenzwerte für optische Eigenschaften flüssiger Phantome

Eine multizentrischen Studie mit 9 Partnereinrichtungen aus 6 Ländern, die vom Politecnico di Milano geleitet wurde, verfolgte das Ziel einer genauen Charakterisierung der für streuende und absorbierende Flüssigphantome in der diffusen optischen Spektroskopie und Bildgebung häufig eingesetzten Materialien Intralipid und Tusche. Mit verschie-

denen Messmethoden wurden an gleichen Ausgangsmaterialien der intrinsische Absorptionskoeffizient der Tusche und der intrinsische reduzierte Streukoeffizient von Intralipid ermittelt. Im FB 8.4 wurden mittels eines geeigneten statistischen Modells zusammengefasste Referenzwerte für diese Größen bei drei nahinfraroten Wellenlängen bestimmt. Die Unsicherheit war 2 % oder besser für das absorbierende und 1 % für das streuende Material. Die Ergebnisse der Studie wurden in Biomedical Optics Express veröffentlicht. (H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

Fluoreszenzkamera für die intraoperative Wächterlymphknotendetektion

In der Arbeitsgruppe *Gewebeoptik und Molekulare Bildgebung* wurde eine Fluoreszenzkamera entwickelt und aufgebaut, die das Auffinden von Wächterlymphknoten bei gynäkologischen Krebsarten ermöglichen soll. Mithilfe dieser per Hand über das Gewebe zu führenden Kamera wird die Ausbreitung des in der Nähe des Karzinoms in das Gewebe injizierten Fluoreszenzfarbstoffs Indocyaningrün durch die Lymphgefäße zu den Lymphknoten beobachtet, die in unmittelbarer Nähe des Karzinoms liegen. Neben dem Fluoreszenzbild wird mit dem kompakten Kamerakopf auch die Gewebereflexion erfasst, sodass die Fluoreszenz aus den Lymphknoten direkt auf dem Gewebebild dargestellt werden kann. Die Kamera wurde erfolgreich an Phantomen getestet. Gegenwärtig laufen die Vorbereitungen für die klinische Erprobung des neuen Verfahrens an der Klinik für Gynäkologie der Charité Universitätsmedizin Berlin. (L. Szyk, FB 8.3, lukasz.szyk@ptb.de)

Mikroskopie an fluoreszenz-markierten Peptiden in lebenden Zellen

Unter den biologischen Molekülen bilden die Peptide eine interessante Gruppe, da sie u. a. als Botenstoffe vielfältige Aufgaben erfüllen. Die Beziehungen zwischen ihrer Struktur und ihren Wirkungen in biologischen Systemen sind Gegenstand des EMRP-Projektes „Metrology for biomolecular origin of disease“. Es wird seit Juni 2012 von einem Konsortium aus Partnern in Großbritannien, Deutschland und dem Joint Research Centre der Europäischen Kommission bearbeitet. Die Arbeiten der PTB-Arbeitsgruppe 8.31 betreffen die Wechselwirkung von Peptiden mit Zellmembranen. Als Methoden kommen Weitfeld-Fluoreszenzmikroskopie und konfokale Mikroskopie zum Einsatz. Untersucht werden die lokalen Konzentrationen der markierten Moleküle an der Zellmembran und ggf. im Inneren der Zellen sowie die Geschwindigkeit, mit der die Moleküle

sich an Membranen anlagern. Die Untersuchungen unterstützen daneben die NMR-Biosensorentwicklung in der AG *MR-Messtechnik* (8.11). Die Fluoreszenzmikroskopie ermöglicht hier die Zuordnung von ^{129}Xe -NMR-Signalen markierter Peptide zu unterschiedlichen Anordnungen dieser Peptide in Zellproben. (O. Hirsch, FB 8.3, ole.hirsch@ptb.de)

Kombination der Nahinfrarotspektroskopie mit invasiven Verfahren für die Untersuchung physiologischer Vorgänge in der Kleintiere

Das an der PTB entwickelte nahinfrarotspektroskopische Verfahren zur Überwachung der Hämoglobin-Konzentration und der Sauerstoffsättigung des Blutes in der Niere von Kleintieren mithilfe eines Faseroptischen Sensors wurde am Institut für Vegetative Physiologie der Charité Berlin mit invasiven Methoden zur lokalen Messung der Gewebeoxygenierung und des Blutflusses kombiniert. In einer ersten Gruppe von Untersuchungen wurden die Auswirkungen von arteriellen und venösen Gefäßverschlüssen erforscht, bei denen sich primär das Blutvolumen im Gewebe ändert, wodurch eine Störung der Sauerstoffversorgung bedingt wird. In einer zweiten Gruppe von Untersuchungen wurden der Sauerstoffgehalt oder der Kohlendioxidgehalt in der Atemluft geändert, sodass primär bereits die Sauerstoffsättigung des in die Nieren einströmenden Blutes geändert ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die Nahinfrarotspektroskopie die physiologisch zu erwartende Hämodynamik und Oxygenierung für alle Untersuchungen korrekt beschreibt, während die invasive Flussmessung bei einer Änderung des Blutvolumens gestört wird. Durch die kombinierte Anwendung von NIR-Spektroskopie und invasiven Verfahren können weiterführende Informationen wie die unterschiedliche zeitliche Charakteristik der lokalen Gewebeoxygenierung und der Oxygenierung des Hämoglobins erfasst werden. (D. Grose-nick, FB 8.3, dirk.grosenick@ptb.de)

EMRP-Projekt ENG63 „Metrology für Sensor-Netzwerke zur Charakterisierung elektrischer Netze“

Am 1.6.2014 wurde im Rahmen der europäischen Partnerschaft das EMRP-Projekt ENG63 gestartet. Der Fokus des Projekts liegt in der Entwicklung von Schätzverfahren für den Netzzustand auf der Grundlage eines verbesserten dynamischen Modells der Netzauslastung. Dabei werden insbesondere Mittel- und Niederspannungsnetze betrachtet, welche im Allgemeinen unvollständig mit Messstellen ausgestattet sind. Als Ergebnis wird ein neues Zustandsschätzverfahren erarbeitet und im Rahmen

des Projekts auf reale Stromnetze angewendet werden. (S. Eichstädt, FB 8.4, sascha.eichstaedt@ptb.de)

Synchronisation von beweglichen Oszillatoren

Synchronisation ist ein allgegenwärtiges Phänomen, welches vielfach mittels sogenannter gekoppelter Phasenoszillatoren beschrieben und studiert wurde. Nahezu alle Studien nehmen dabei an, dass sich die einzelnen Oszillatoren in Ruhe befinden. Die Frage nach dem Einfluss der Bewegung der Oszillatoren auf das Synchronisationsverhalten wurde anhand eines teilchenbasierten Modells in Verbindung mit einer Feldtheorie untersucht, wobei gezeigt wurde, dass die aktive Bewegung von Oszillatoren – im Vergleich zu passiver thermischer Diffusion – die Synchronisation entscheidend begünstigt. Diese Ergebnisse sind zum Verständnis biologischer Systeme relevant, wie z. B. das Entstehen von kollektiven Bewegungsmustern in Bakterienkolonien oder die Synchronisation von Flagellen, die die koordinierte Bewegung von Mikroorganismen ermöglicht. (R. Großmann, FB 8.4, robert.grossmann@ptb.de)

Modellierung dichter Bakteriensuspensionen

Systeme selbst-angetriebener Teilchen, welche die Energie ihrer Umgebung zur aktiven Bewegung nutzen, sind sowohl Forschungsobjekte der Statistischen Physik des Nichtgleichgewichts als auch der Biologie, z. B. für Suspensionen von Mikroschwimmern. Viel Interesse gefunden hat das Phänomen von Turbulenz auf mesoskopischen Skalen (engl. meso-scale turbulence), welches experimentell in dichten Bakteriensuspensionen beobachtet wurde. In Zusammenarbeit mit der Humboldt-Universität Berlin wurde an der PTB ein Minimalmodell für die Entstehung von Turbulenz in aktiver Materie entwickelt. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass eine Konkurrenz von kurz- und langreichweitigen Wechselwirkungen für die Entstehung von Mesoskalen-Turbulenz notwendig ist. (R. Großmann, FB 8.4, robert.grossmann@ptb.de)

Breit anwendbare Priors für ELISA-Tests

Für die Bayes'sche Analyse von immunologischen Tests hat die PTB A-priori-Verteilungen weiterentwickelt. Dies geschah im Rahmen der Betrachtung von Regressionsproblemen für das EMRP-Projekt „Novel mathematical and statistical approaches to uncertainty evaluation“. Es konnte gezeigt werden, dass die neuen, informativen Priors für ELISAs breit anwendbar sind und die Konzentrationsschätzungen verbessern, indem sie schlecht gestellte Probleme regularisieren und zu kleineren Unsicherheiten sowie robusten Schätzwerten führen. (K. Klauenberg, FB 8.4, katy.klauenberg@ptb.de)

Vorsitzwechsel beim europäischen Harmonisierungsgremium für Software

Der Fachbereich 8.5 *Metrologische Informationstechnik* hat weiterhin den Vorsitz in der Arbeitsgruppe WG7 „Software“ der europäischen Harmonisierungsorganisation für das gesetzliche Messwesen (WELMEC) inne. In Ihrer letzten Sitzung ging der Vorsitz im Rahmen einer Wahl der Mitglieder von Prof. Dr. Dieter Richter an Dr. Florian Thiel über. Der Vorsitz ist seit über 20 Jahren in der Hand der PTB. Prof. Dr. Dieter Richter hatte diese Aufgabe für 9 Jahre bis zu seiner Pensionierung übernommen. Davor hatte bereits der amtierende Vizepräsident der PTB, Dr. Roman Schwartz, diese Position für 10 Jahre inne. Die Arbeitsgruppe WG7 „Software“ der WELMEC setzt sich aktuell aus Mitgliedern von 17 europäischen Mitgliedstaaten und Vertretern europäischer Industrieverbände zusammen. Die WG7 setzt z. B. Anforderungen aus EU-Richtlinien in harmonisierte technische Vorgaben um. (F. Thiel, FB 8.5, florian.thiel@ptb.de)

Wenn Experiment und Simulation an ihre Grenzen stoßen

Im zunehmenden Maße werden Messgeräte, die im gesetzlichen Messwesen zum Einsatz kommen, komplexer. Nicht alle messtechnischen Prüfungen können dann im Fachlabor der PTB durchgeführt werden. Dann müssen andere Verfahren wie die Quellcodeanalyse zum Einsatz kommen. Insbesondere wenn sich die zu prüfenden Systeme nur begrenzt variieren lassen, die notwendigen Tests eine Gefährdung für die Prüfer oder Dritte bedeuten würden oder wenn seltene Ereignisse untersucht werden sollen, kommen vermehrt Simulationen ins Spiel. Jedoch selbst diese können nicht alle Szenarien geeignet abdecken. Wenn Simulationstools an ihre Grenzen stoßen und Experimente versagen oder nicht zumutbar sind, hilft in den meisten Fällen nur eine Software-Prüfung. Im Rahmen einer detaillierten Quellcodeanalyse findet dann z. B. ein Vergleich der gesetzlichen Vorgaben mit dem von der Software gelieferten Ergebnis statt, die auf Grundlage der vorgegebenen Testparameter generiert wurden. Auf diese Weise lassen sich gefährliche Randbedingungen oder sehr spezielle Tests mit großer Detailtiefe durchführen. Diese Vorgehensweise stellte sich als effektiv heraus. Potenzielle Schwachstellen im Hinblick auf die gesetzlichen Anforderungen können erkannt werden. (D. Saborrosch, FB 8.5, doris.saborrosch@ptb.de)

Die „Cloud“ im gesetzlichen Messwesen

Ladestationen für Elektrofahrzeuge beinhalten meist einen geeichten Zähler. Bei einer aktuellen Realisierung versenden diese Zähler ihre Daten an einen zentralen Server. Ladedaten werden dabei in einer Datenbank auf diesem Server abgelegt und können vom Kunden jederzeit über ein Web-Portal eingesehen werden. Von der Korrektheit der Rechnung kann sich der Kunde mittels eines Verifikationsprogramms überzeugen. Der Zählerstand wird daher nicht mehr an der Ladesäule, sondern dem Kunden über das Portal des Energieversorgers, z. B. über sein Smartphone, angezeigt. Auch ein Abbild des Typschildes mit der Eichmarke und der Eichgültigkeitsdauer kann angezeigt werden. Neben der Aufgabe der Speicherung der Messwerte bietet der Server einen Zeitservice an: Alle Zähler im Netz werden von diesem Server auf die gesetzliche Zeit synchronisiert. Das System erlaubt einen Ausbau bis zu einigen tausend Ladesäulen. Die PTB hat Zulassungsanforderungen an diesen Server entwickelt und angewendet. Der Server wird von der zuständigen Eichbehörde überwacht. (U. Grottker, FB 8.5 ulrich.grottker@ptb.de)

IT-Sicherheitsgutachten für Geldspielgeräte

Die Besonderheiten der überwiegend IT-basierten Spielgeräte stellen bei der Zulassungsprüfung qualitativ neue Ansprüche an das Sicherheitskonzept der Spielgerätesoftware und der Daten, die vom Spielgerät generiert werden. Von zentraler Bedeutung ist dabei das Sicherheitsgutachten einer vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnologie anerkannten oder gleichwertigen Stelle, das zusammen mit dem Zulassungsantrag vom Antragsteller vorzulegen ist und im Rahmen der neuen Spielverordnung (SpielV) gefordert wird. Es wurden Kriterien für die Prüfung und Bewertung der Sicherheit von Geldspielgeräten in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte und Integrierte Sicherheit (AISEC) ermittelt und mögliche Angriffsszenarien bezüglich der Software, der erfassten Daten, der personenunabhängigen Identifikationsmittel, der Hardware und weiterer zu beachtender Aspekte in die vom Fachbereich 8.5 zu erarbeitende Technische Richtlinie aufgenommen, die bei der Erstellung von Sicherheitsgutachten zu bewerten sind. Das Notifizierungsverfahren bei der Europäische Kommission zur Prüfung der Sechsten Verordnung zur Änderung der Spielverordnung endete am 22. September 2014. Es ist zu erwarten, dass die Änderung der Spielverordnung noch im Jahr 2014 in Kraft treten wird. (R. Kuschfeldt, FB 8.5, reiner.kuschfeldt@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Europäisches Projekt zur Standardisierung der Charakterisierung magnetischer Nanopartikel

Das im November 2013 gestartete europäische Projekt „Nanometrology Standardization Methods for Magnetic Nanoparticles (NanoMag)“ hat das Ziel, die Methoden zur Herstellung und Charakterisierung magnetischer Nanopartikel international zu vereinheitlichen und zu standardisieren. Magnetische Nanopartikel werden zunehmend im biomedizinischen Bereich zur Zellsortierung, zur medizinischen Bildgebung und bei der Therapie von Krebserkrankungen eingesetzt. Die PTB koordiniert in diesem Projekt die Arbeiten zur Charakterisierung der Nanopartikelsysteme und leitet die Erstellung von Standardisierungskonzepten für die Messmethoden. (O. Posth, FB 8.2, oliver.posth@ptb.de)

Workshop MATHMET 2014 „Mathematik und Statistik für die Metrologie“

Gemeinsam mit NIST und EURAMET hat die PTB 2014 einen internationalen Workshop zu aktuellen mathematischen und statistischen Fragestellungen in der Metrologie veranstaltet. Themen des Workshops waren unter anderem die Bestimmung von Messunsicherheiten, die Analyse von Ringvergleichen, mathematische Modellierung und inverse Probleme oder statistische Analysen in der Chemie und Bioanalytik. Mit 14 eingeladenen Vorträgen renommierter Wissenschaftler aus Europa und Übersee sowie 29 von einem internationalem „Scientific Committee“ ausgewählten „Contributed Talks“ wurden aktuelle Entwicklungen auf den oben genannten Gebieten vorgestellt und diskutiert. (M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de, C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

Kuratorium

Präsident des Kuratoriums

MinDir Detlef Dauke

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin

Stellvertretender Präsident des Kuratoriums

Prof. Dr. Wolfgang Ertmer

Institut für Quantenoptik,
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr. Gisela Anton

Physikalisches Institut IV der Universität Erlangen

Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Auweter-Kurtz

German Aerospace Academy, Böblingen

Dr. Norbert Burger

Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und
Wasserfach e. V., Köln

Prof. Dr. Cornelia Denz

Institut für Angewandte Physik der Westfälischen
Wilhelms-Universität Münster

Prof. Dr. Olaf Dössel

Institut für Biomedizinische Technik,
Karlsruher Institut für Technologie

Dr. Matthias Fankhänel

BASF SE, Ludwigshafen

Dr. Hermann Gerlinger

Carl Zeiss AG, Oberkochen

Dr. Petra Gowik

Bundesamt für Verbraucherschutz und
Lebensmittelsicherheit, Berlin

Prof. Dr. Axel Haase

Zentralinstitut für Medizintechnik,
Technische Universität München, Garching

Ehrenkurator

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Theodor W. Hänsch

Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching
und Ludwig-Maximilians-Universität, München

Klaus Helmrich

Siemens AG, München

Prof. Dr. Klaus-Peter Jäckel

Oberkirch

Prof. Dr.-Ing. Anke Kaysser-Pyzalla

Helmholtz-Zentrum Berlin

Prof. Dr. Wolfgang Ketterle

Massachusetts Institute of Technology, USA

Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Kowalsky

Institut für Hochfrequenztechnik
Technische Universität Braunschweig

Dr. Gerald Linke

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn

Veronika Martens

Sartorius AG, Göttingen

Prof. Dr. Jürgen Mlynek

Helmholtz-Gemeinschaft, Berlin

Dr.-Ing. Eberhard Petit

Landesbetrieb Mess- und Eichwesen Nordrhein-West-
falen

Prof. Dr. Dr. h. c. Roland Sauerbrey

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

Prof. Dr.-Ing. Joachim Scheuren

Müller-BBM GmbH, Planegg

Dr. Thomas Sesselmann

Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut

Prof. Dr. Lothar Siekmann

Institut für Klinische Biochemie, Universität Bonn

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Joachim Treusch

Bremen

Ehrenkurator

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Klaus von Klitzing

Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

Peter von Siemens

München

Ehrenkurator

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Heinz-Georg Wagner

Göttingen

Prof. Dr. Martin Winterkorn

Volkswagen AG, Wolfsburg

Prof. Dr. Ulrike Woggon

Institut für Optik und Atomare Physik der Technischen
Universität Berlin

Präsidium		
Präsident	Vizepräsident	Mitglied des Präsidiums
Prof. Dr. J. Ullrich ☎ 1000	Dr. R. Schwartz ☎ 2000	Dr. J. Stenger ☎ 3000

Fachbereich PST Präsidentialer Stab
Dr. R. Wynands ☎ 1009

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Dr. Dr. J. Simon ☎ 3005

Abteilung 1 Mechanik und Akustik
Dr. F. Härtig ☎ 1010

Abteilung 2 Elektrizität
Dr. U. Siegner ☎ 2010

Abteilung 3 Chemische Physik und Explosionsschutz
*Dr. R. Schwartz ☎ 2000

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
Prof. Dr. S. Kück ☎ 4100

Fachbereich 5.1 Oberflächenmesstechnik
Dr. L. Koenders ☎ 5100

Fachbereich 1.2 Festkörpermechanik
Dr. R. Kümme ☎ 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
Dr. T. Bruns ☎ 1300

Fachbereich 2.3 Elektrische Energiesmesstechnik
Dr. M. Kahmann ☎ 2300

Fachbereich 3.3 Thermophysikalische Größen
Prof. Dr. R. Fernandes ☎ 3300

Fachbereich 4.3 Quantenoptik und Längeneinheit
Dr. H. Schnatz ☎ 4300

Fachbereich 5.3 Koordinatenmesstechnik
Dr. K. Kniel ☎ 5300

Fachbereich 1.4 Gase
Dr. H. Többen ☎ 1400

Fachbereich 2.4 Quantenelektronik
Dr. A. Zorin ☎ 2400

Fachbereich 3.4 Physikalische Chemie
*Dr. B. Güttler ☎ 3100

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 Explosionsschutz in der Energietechnik
Dr. U. Klausmeyer ☎ 3500

Fachbereich 4.5 Zeit und Frequenz
Dr. E. Peik ☎ 4400

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 Explosionsschutz Sensorik und Messtechnik
Dr. U. Johannmeyer ☎ 3600

Fachbereich 4.6 Zeit und Frequenz
Dr. E. Peik ☎ 4400

Fachbereich 5.6 Wissenschaftlicher Gerätebau
Prof. Dr. F. Löffler ☎ 5500

Fachbereich 1.7 Akustik und Dynamik
Prof. Dr. W. Scholl ☎ 1700

Fachbereich 3.7 Grundlagen des Explosionsschutzes
Dr. M. Beyer ☎ 3700

Ausschüsse

QUEST Institut an der PTB
Prof. Dr. P. O. Schmidt ☎ 4700

Personal	A-PE	Prof. Dr. Löffler	☎ 5500
Investitionen	A-IV	Dr. Schwartz	☎ 2000
IT-Infrastruktur	A-IT	Dr. Hackel	☎ 8400
Metrologische Dienstleistungen	A-MD	Dr. Schwartz	☎ 2000
Internationale Zusammenarbeit	A-IZ	Dr. Stenger	☎ 3000
Qualitätsmanagement	A-QM	Dr. Stoll-Malke	☎ 8330
Forschungsprogramme	A-FP	Dr. Stenger	☎ 3000



Organigramm

Stand: 1. Dezember 2014

Konformitätsbewertungsstelle
Dr. R. Schwartz
☎ 2000

Vertreter d. Präsidenten in Berlin
Dr. G. Ulm
☎ (Ch) 7312

Qualitätsmanager
Dr. K. Stoll-Malke
☎ 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
*Dr. G. Ulm
☎ (Ch) 7343

Abteilung Q
Wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben
Dr. P. Ulbig
☎ 8010

Abteilung Z
Verwaltungsdienste
C. Tampier
☎ 9010

Fachbereich 6.1
Radioaktivität
Dr. D. Arnold
☎ 6100

Fachbereich 7.1
Radiometrie mit Synchrotronstrahlung
Prof. Dr. M. Richter
☎ (Ad) 7100

Fachbereich 8.1
Medizinische Messtechnik
Dr. B. Ittermann
☎ (Ch) 7318

Referat Q.11
Wissenschaftliche Bibliotheken
Dr. J. Meier
☎ 8131

Referat Z.11
Haushalt und Beschaffung
M. Wasmuß
☎ 9110

Fachbereich 6.2
Dosimetrie für Strahlentherapie und Röntgendiagnostik
Dr. U. Ankerhold
☎ 6200

Fachbereich 7.2
Kryophysik und Spektrometrie
Dr. T. Schurig
☎ (Ch) 7290

Fachbereich 8.2
Biosignale
Dr. L. Trahms
☎ (Ch) 7213

Fachbereich Q.3
Gesetzliches Messwesen und Technologietransfer
Dr. D. Ratschko
☎ 8300

Referat Z.12
Personal
S. Wiemann
☎ 9120

Fachbereich 6.3
Strahlenschutzdosimetrie
Dr. P. Ambrosi
☎ 6300

Fachbereich 7.3
Detektorradiometrie und Strahlungsthermometrie
Dr. J. Hollandt
☎ (Ch) 7369

Fachbereich 8.3
Biomedizinische Optik
Prof. Dr. R. Macdonald
☎ (Ch) 7542

Fachbereich Q.4
Informationstechnologie
Dr. S. Hackel
☎ 8400

Referat Z.13
Justizariat
M. Gahrens
☎ 9130

Fachbereich 6.4
Ionen- und Neutronenstrahlung
Dr. F. Wissmann
Dr. H. Schuhmacher
☎ 6400 / 6500

Fachbereich 7.4
Temperatur
Dr. J. Fischer
☎ (Ch) 7473

Fachbereich 8.4
Mathematische Modellierung und Datenanalyse
Prof. Dr. M. Bär
☎ (Ch) 7687

Fachbereich Q.5
Technische Zusammenarbeit
Dr. M. Stoldt
☎ 8200

Referat Z.14
Organisation und Controlling
Dr. J. Jaspers
☎ 9140

Fachbereich 6.5
Kernphysikalische Anwendungen
*Dr. H. Janßen
☎ 6010

Fachbereich 7.5
Wärme und Vakuum
Dr. T. Lederer
☎ (Ch) 7230

Fachbereich 8.5
Metrologische Informationstechnik
Dr. F. Thiel
☎ (Ch) 7529

Gruppe Q.6
Technische Infrastruktur
*Dr. P. Ulbig
☎ 8010

Referat Z.15
Verwaltung Berlin
A. Lubinus
☎ (Ch) 7449

Fachbereich 6.6
Grundlagen der Dosimetrie
Dr. H. Rabus
☎ 6600

Fachbereich IB.T
Technisch-wissensch. Infrastruktur Berlin
Dr. F. Melchert
☎ (Ch) 7446

Referat Q.61
Arbeitsschutz- und Sicherheitsmanagement
M. Frühauf
☎ 9170

Referat Z.16
Innerer Dienst
A. Grote
☎ 9160

Referat 6.71
Betrieblicher Strahlenschutz
Dr. R. Simmer
☎ 6710

Referat Q.62
Technischer Dienst Braunschweig
U. Deventer
☎ 9210

Referat Z.17
Ausbildung
B. Weihe
☎ 9240

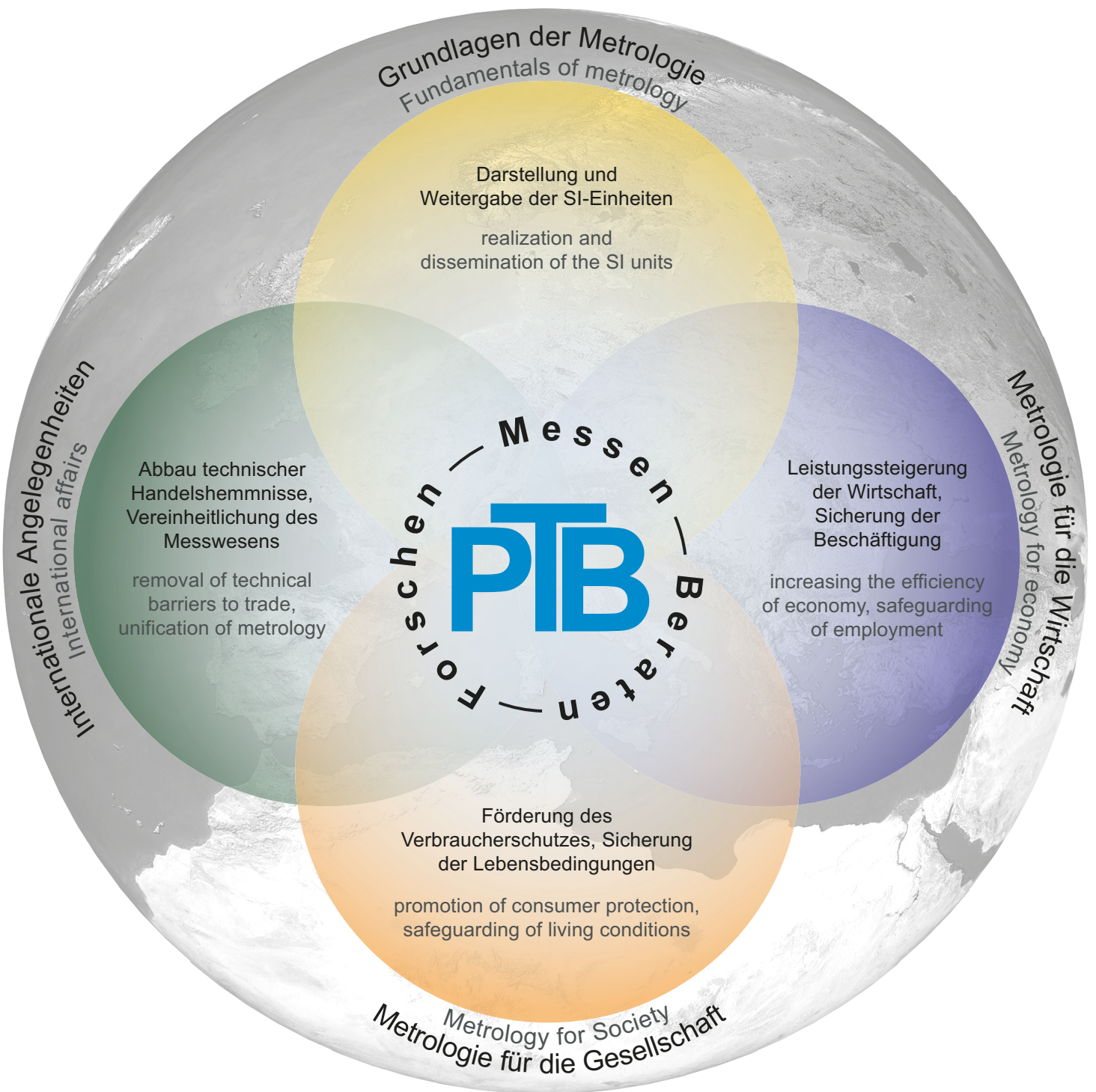
Referat Q.63
Werkfeuerwehr
B. W. Klose
☎ 9020

Referat Z.18
Administrative IT-Anwendungen
M. Battikh
R. Ohl
☎ 3597 / 8430

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

Arbeitsgebiete und Ziele



Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) – das nationale Metrologie-Institut mit wissenschaftlich-technischen Dienstleistungsaufgaben

Für einen modernen Industriestaat ist eine leistungsfähige Infrastruktur für das Messen, Normen, Prüfen und für die Qualitätssicherung eine Grundvoraussetzung. Nur eine optimierte messtechnische Infrastruktur ermöglicht den richtigen Einsatz der Technik zum Wohle des Menschen, die effektive und umweltschonende Nutzung von Energie und Rohstoffen sowie den Austausch von Gütern, auch über Ländergrenzen hinweg. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig und Berlin, die zum Dienstbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gehört, ist in der Bundesrepublik Deutschland mit dieser Aufgabe betraut.

Der Existenz von Bundesanstalten liegt ein staatlicher Auftrag zugrunde, festgelegt in Gesetzen und Verordnungen. Im Falle der PTB ist dies ein Auftrag von Verfassungsrang, abgeleitet aus der originären Verantwortung des Staates für die Einheitlichkeit des Messwesens sowie für die Sicherheit und den Schutz des Bürgers. Dabei geht es auch um das Vertrauen, das jeder Einzelne, ob als Verbraucher, Behörde oder Firma, in die Zuverlässigkeit und Unparteilichkeit von Messungen haben muss. Der spezifische staatliche Auftrag für die PTB ist es, eine international akzeptierte leistungsfähige messtechnische Infrastruktur für Gesellschaft, Handel und Wirtschaft gleichermaßen bereitzustellen. Forschung und Technologieentwicklung dienen dazu, diesen Auftrag verantwortungsvoll und kompetent auszuführen.

Der Anteil an Forschung und Entwicklung über alle vier Arbeitsgebiete beträgt rund zwei Drittel aller PTB-Aktivitäten.

Grundlagen der Metrologie

Der Bereich „Grundlagen der Metrologie“ umfasst die in der Satzung verankerten Arbeiten zur Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten und der gesetzlichen Zeit. Hierzu gehören insbesondere die Entwicklung und Bereitstellung von Primärnormalen und Normalmesseinrichtungen und der gegebenenfalls für die Weitergabe der Einheiten benötigten Sekundär- und Transfernormale. Mission ist „die Schaffung des Fundaments für das nationale Messwesen, das den heutigen und für die Zukunft absehbaren Anforderungen genügt“.

Eine besondere Herausforderung stellen die Arbeiten zur Rückführung von SI-Einheiten auf Fundamentalkonstanten dar, wie dies für Sekunde, Meter, Volt und Ohm bereits gelungen ist, da man – zumindest nach unserem heutigen Verständnis der Physik – dann von einer von Ort und Zeit unabhängigen Realisierung der jeweiligen Einheit ausgehen kann. Durch den Beschluss des Comité International des Poids et Mesures (CIPM), vorbereitende Maßnahmen zur Neudefinition der Einheiten Ampere, Kelvin, Kilogramm und Mol auf der Basis von Fundamentalkonstanten einzuleiten, haben diese Arbeiten zusätzlich an Aktualität und Bedeutung gewonnen. Aber auch bei der Darstellung von Einheiten auf der Basis klassischer Prinzipien, z. B. für die dimensionelle Messtechnik, steigen die Anforderungen an die tolerierbaren Unsicherheiten stetig, sodass Technologien verbessert bzw. neuentwickelt und genutzt werden müssen. Zunehmende Bedeutung gewinnt die Rückführung von Messungen in der analytischen und speziell klinischen Chemie auf international anerkannte Normale oder Normalmesseinrichtungen, die für ausgewählte organische und anorganische Analyte in der PTB und ihren Kooperationspartnern (BAM, UBA, DGKL) entwickelt bzw. betrieben werden. Von besonderer gesellschaftlicher Bedeutung ist die Entwicklung von Normalen und Normalmesseinrichtungen für die medizinische Diagnostik und Therapiekontrolle, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung, die Ultraschall-Diagnostik oder optische, bioelektrische, biomagnetische und NMR-Diagnoseverfahren.

Ganz offensichtlich ist der Anteil an Forschung und Entwicklung in dem Bereich „Grundlagen der Metrologie“ besonders hoch, weit gespannt und deckt wesentliche Bereiche der modernen Natur- und Ingenieurwissenschaften ab. Die Ergebnisse bilden nicht nur die Voraussetzung für die Entwicklung und Realisierung genauer Normale, sondern liefern

auch – oft in Kooperation mit universitären und außeruniversitären Partnern – wesentliche Erkenntnisse für die Natur- und Ingenieurwissenschaften im Allgemeinen.

Metrologie für die Wirtschaft

Für eine exportorientierte Volkswirtschaft wie die der Bundesrepublik Deutschland ist eine hochentwickelte metrologische Infrastruktur sowie die Verfügbarkeit metrologischen Know-hows auf höchstem Niveau zur Unterstützung der Entwicklung neuer Technologien eine unabdingbare Voraussetzung.

Die PTB hat seit ihrer Gründung im Jahre 1887 zum Nutzen der deutschen Wirtschaft nicht nur die Basiseinheiten durch metrologische Grundlagenforschung dargestellt, sondern durch technische Entwicklungen von Normalen, Normalmessgeräten und erprobten Messverfahren Grundlagen für genaue und zuverlässige Messungen und Prüfungen in Industrie und Handel geschaffen. Die Durchdringung der Produktionsprozesse mit einer Messtechnik, die allen internationalen Ansprüchen gerecht wird, ist eine entscheidende Voraussetzung für zuverlässig funktionierende Qualitätsmanagementsysteme in der Wirtschaft. Dabei ist es unverzichtbar, alle Messergebnisse auf das SI zurückzuführen.

Die Weitergabe der Einheiten wird durch die Akkreditierungen des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD; seit 1. 1. 2010 Teil der DAkkS) größtenteils auf die Ebene der industriellen Messtechnik verlagert. Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden durch die Akkreditierungsstelle kompetent überwacht und in nationalen und internationalen Gremien vertreten.

Wissenschaft und Wirtschaft enger zu verzahnen ist eine politische Forderung, die von der PTB ernst genommen wird. Bei allen Forschungs- und Entwicklungsergebnissen prüft die PTB daher, ob diese auch als Schutzrechte, Patente bzw. Gebrauchsmuster oder durch Know-how-Verträge für eine Vermarktung durch Innovationen in Anspruch genommen werden können. Eine wichtige Rolle im Know-how-Transfer von der PTB in die deutsche Wirtschaft übernehmen Seminare und Fachtagungen, die wissenschaftlich-technische Entwicklungen wichtiger Arbeitsgebiete der PTB zum Thema haben. Speziell auf die Bedürfnisse von kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) ist das Mittelstandsforum der PTB ausgerichtet. Es stellt eine Internet-Plattform dar, welche die Dienstleistungsangebote der PTB

einschließlich der Patentdatenbank in übersichtlicher Form aufzeigt und insbesondere auch Kunden, die mit der Struktur der PTB nicht vertraut sind, Navigationshilfen anbietet, die zu den richtigen Informationen und Ansprechpartnern führen.

Metrologie für die Gesellschaft

In weiten Bereichen des täglichen Lebens besteht ein besonderes öffentliches Interesse an richtigen Messergebnissen und zuverlässigen Messeinrichtungen. Die Metrologie für die Gesellschaft umfasst daher überwiegend Aufgaben, die gesetzlich geregelt sind. In einer Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen sind der PTB verschiedene Tätigkeiten zugewiesen; in vielen dieser Rechtsvorschriften wird sie als einzige Stelle genannt. Hierin liegt eine besondere Verantwortung. Es ist Aufgabe der PTB, „Messtechnik und -verfahren zum angemessenen Schutz der Verbraucher im geschäftlichen und amtlichen Verkehr, der arbeitenden Bevölkerung im beruflichen Umfeld, zum Erhalt und der Wiederherstellung der Gesundheit, für die persönliche und industrielle Sicherheit sowie zum Schutz der Natur und Umwelt“ zur Verfügung zu stellen und einzusetzen.

Ein Schwerpunkt in diesem Bereich ist die Bauartzulassung bzw. Baumusterprüfung von Messgeräten im Rahmen nationaler oder europäischer Rechtsvorschriften, zum Beispiel auf den Gebieten Energiemesstechnik für elektrische Energie, Gas und Wasser (Wärme, Kälte), Sicherheit im Straßenverkehr (Geschwindigkeitsüberwachung, Atemalkohol), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und Umweltmesstechnik (Absolutmessungen in der Schadstoff- und Spurenanalyse, Lärmschutz etc.). Die meisten Bauartzulassungen erfüllt die PTB auf der Grundlage des Eichgesetzes. Bedingt durch die Umsetzung der Europäischen Messgeräte Richtlinie (MID) werden das Eichgesetz und die Eichordnung novelliert. Die PTB ist inzwischen als Benannte Stelle nach europäischem Recht anerkannt, sodass den Kunden aus der Industrie die von der MID geforderten Konformitätsbewertungsverfahren angeboten werden können.

Die PTB ist gemäß Medizinproduktegesetz zuständig für die Sicherstellung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Medizin. So entwickelt die PTB neue oder verbessert bereits existierende Messverfahren für Diagnostik und Therapiekontrolle. Zum anderen leistet die PTB entscheidende Beiträge durch Entwicklung von Normalen und Normalmeseinrichtungen, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung oder für medizinische

Geräte mit Messfunktion, sowie durch Arbeiten zur Rückführung von analytischen Messungen in der klinischen Chemie auf die SI-Einheiten bzw. Normalmessverfahren.

In Absprache und Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ist die PTB auf den wirtschaftlich und vor allem gesellschaftlich wichtigen Gebieten der physikalischen Sicherheitstechnik und des Explosionsschutzes elektrischer Betriebsmittel tätig. Aufgrund ihrer Kompetenz fällt ihr dabei eine internationale Referenzfunktion zu. Gleiches gilt für die Arbeiten auf dem Gebiet des Strahlenschutzes.

Internationale Angelegenheiten

Mit der Gründung der Meterkonvention im Jahre 1875 wurde auf höchster staatlicher Ebene manifestiert, dass Metrologie eine internationale Angelegenheit ist. Durch die zunehmende Globalisierung von Wirtschaft und Handel hat diese Aufgabe in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Im Geschäftsbereich „Internationale Angelegenheiten“ ist es Aufgabe der PTB, „zur internationalen Einheitlichkeit des Messwesens und damit zum Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse beizutragen“. Hierzu dienen Kooperationen mit anderen nationalen Metrologieinstituten, maßgebliche Mitarbeit in den internationalen Gremien und technisch-ökonomische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern.

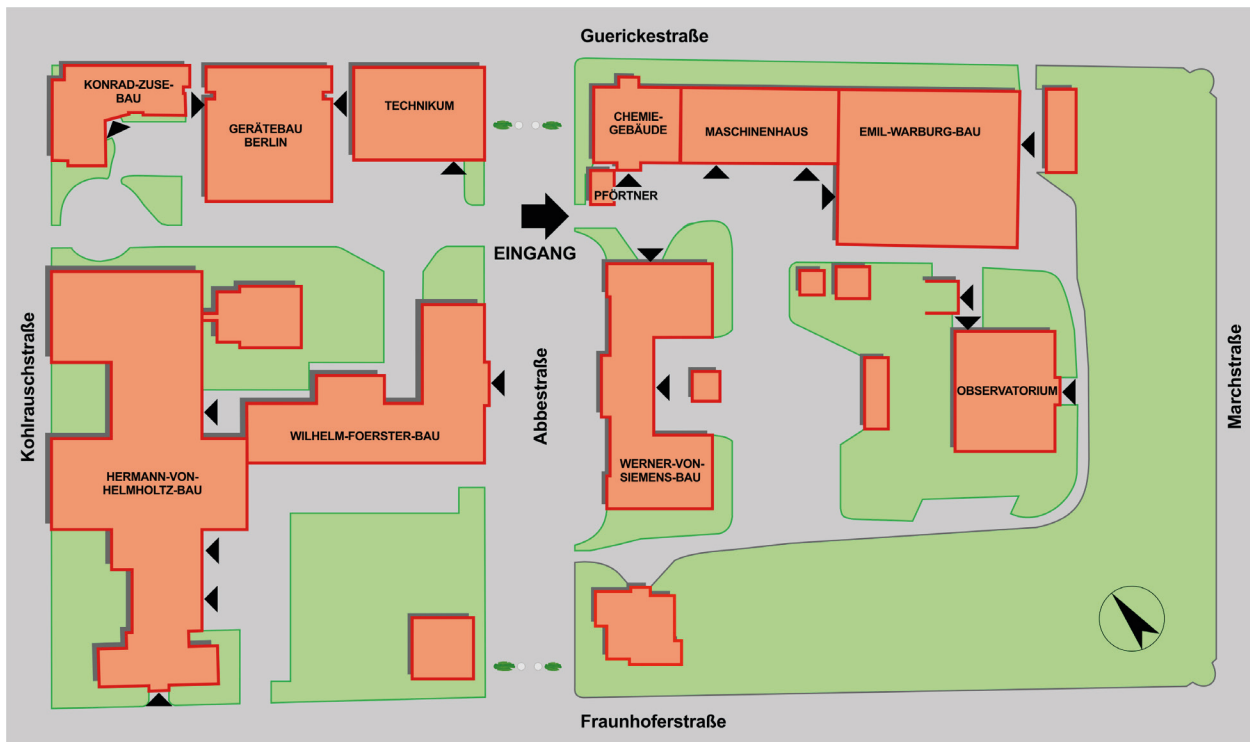
Wesentliches Element der Kooperation mit Partnerinstituten sind internationale „Key Comparisons“ von Normalen und Normalmesseinrichtungen und sich daraus ableitende F&E-Arbeiten. Im Rahmen der internationalen Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Messergebnissen und Zertifikaten der nationalen Metrologieinstitute und der akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien kommt diesen Vergleichen besondere Bedeutung zu.

Die Anforderungen an die Metrologie werden in Zukunft sowohl vom Umfang als auch von der Komplexität her stetig wachsen, sodass ein einzelnes Institut nicht sämtlichen Ansprüchen auf Dauer genügen kann. Koordination und Kooperation bei F&E und Dienstleistungen sind daher unumgänglich. Die rechtsfähige europäische Metrologieorganisation EURAMET stellt hier die erforderlichen Strukturen zur Durchführung eines europäischen Metrologieforschungsprogramms zur Verfügung.

Neben ihrem europäischen Engagement arbeitet die PTB ebenfalls maßgeblich in allen internationalen Metrologieorganisationen mit, zu einem erheblichen Teil in leitender Funktion. Außerdem leistet die PTB einen wesentlichen Beitrag zur internationalen Normung durch Mitarbeit in Gremien von ISO, IEC, CEN, CENELEC. Die weltweite Angleichung von Anforderungen und Prüfvorschriften im gesetzlichen Messwesen dient dem Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse und damit der exportorientierten deutschen Messgeräteindustrie. Mit diesen Zielen arbeitet die PTB aktiv in OIML und WELMEC mit.

Einen erheblichen Umfang nimmt die Technische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern ein. Die PTB gibt ihre Erfahrungen weiter und leistet aktive Hilfe beim Aufbau der technischen Infrastruktur für die Metrologie sowie für das Normen-, Prüf- und Qualitätswesen einschließlich der Akkreditierung und der Zertifizierung. Die finanziellen Mittel werden überwiegend vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) sowie weiteren nationalen und internationalen Gebern, wie der EU und der Weltbank, zur Verfügung gestellt.

Geländeplan Berlin-Charlottenburg



Gebäude in Braunschweig

Gebäude (Building):

Abbe-Bau (V)
 Annahme und Versand
 (Delivery and Shipment) (A)
 Bessel-Bau (M)
 Bibliothek (Library) (K)
 Bothe-Bau (S)
 Bereitstellungslager (P)
 Bunsen-Bau (Q)
 Betriebswerkstätten
 (Workshops) (T)
 Chadwick-Bau (G)
 Elster-Geitel-Bau (S)
 Einstein-Bau (C)
 Explosionsprüfstand
 (Explosion test rig) (Q)
 Fahrbereitschaft
 (Driver pool) (R)
 Gauss-Bau (V)
 Gästehaus
 (Guest House) (V)
 Geiger-Bau (S)
 Glocker-Bau (T)
 Giebe-Bau (L)
 Gumlich-Haus (P)
 Hahn-Bau (L)
 Heisenberg-Bau (C)
 Helmholtz-Bau I (K)
 Helmholtz-Bau II (K)

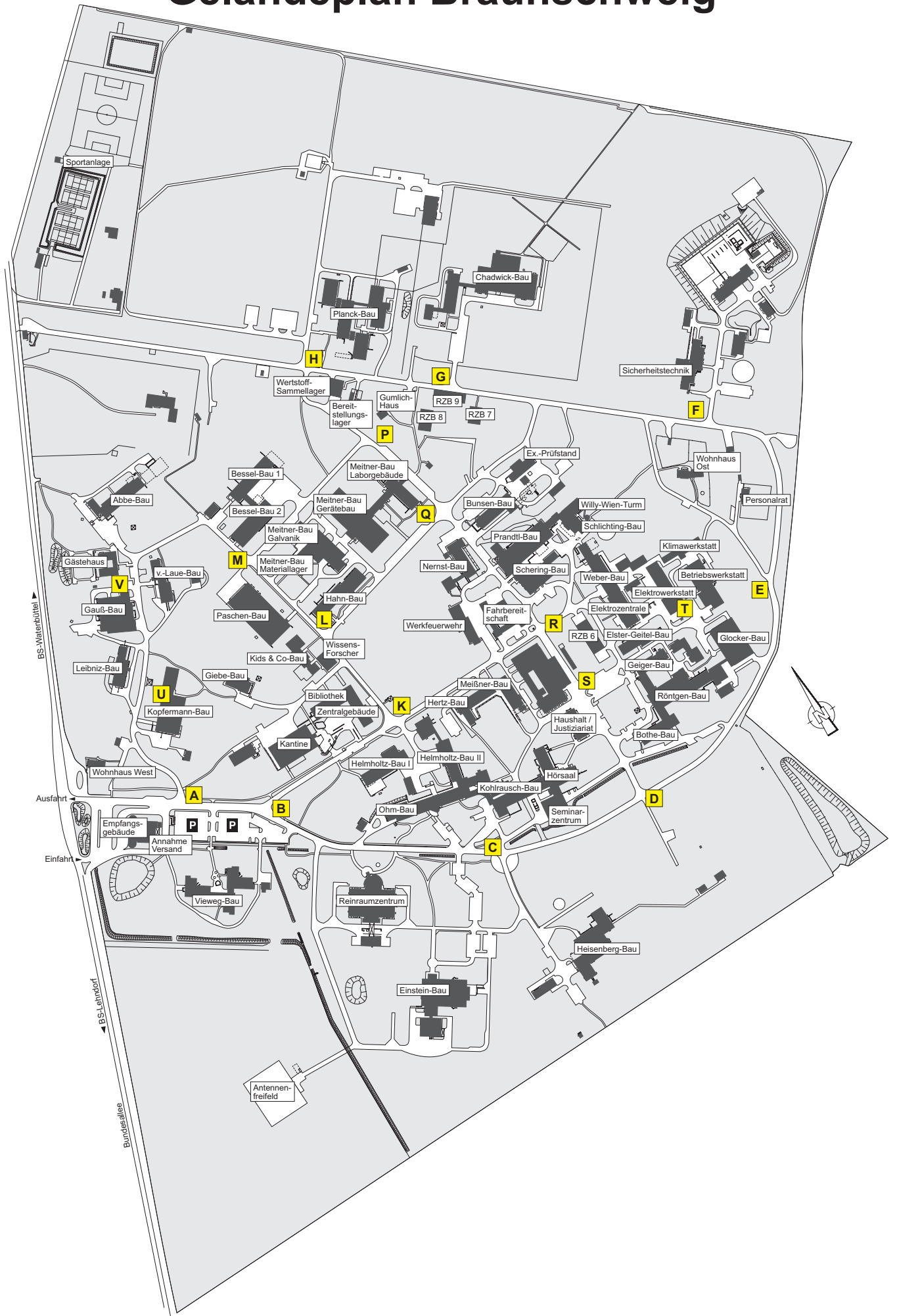
Hertz-Bau (K)
 Hörsaal (Auditorium) (C)
 Kasino (K)
 Kids & Co-Bau
 (Kita und Wissensforscher) (L)
 Kohlrusch-Bau (C)
 Kopfermann-Bau (U)
 v.-Laue-Bau (V)
 Leibniz-Bau (U)
 Meissner-Bau (K)
 Meitner-Bau Gerätebau (Q)
 Meitner-Bau Laborgebäude (Q)
 Meitner-Bau Galvanik (Q)
 Meitner-Bau Materiallager (Q)
 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)
 Willy-Wien-Turm (R)
 Zentralgebäude
 (Central Building) (K)

Einrichtungen / Institute auf dem Gelände (External Facilities and Institutions):

- Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS), Vieweg-Bau (B)
- EURAMET e.V., Zentralgebäude (Central Building) (K)
- QUEST@PTB, v.-Laue-Bau (V)
- Underwriters Laboratories (UL), Raumzellen-Bau 4 (Q)
- VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH, Weber-Bau (R)

Geländeplan Braunschweig





**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

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

Anschriften der PTB

Standort Braunschweig:
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Standort Berlin-Charlottenburg:
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Abbestraße 2–12
10587 Berlin

E-Mail: info@ptb.de
www.ptb.de

Impressum

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Braunschweig, April 2015
Satz, Gestaltung: PTB, Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Übersetzung: PTB-Sprachendienst
Druck: westermann druck GmbH, Braunschweig
Nachdruck mit Quellenangabe gestattet

ISSN 0340-4366