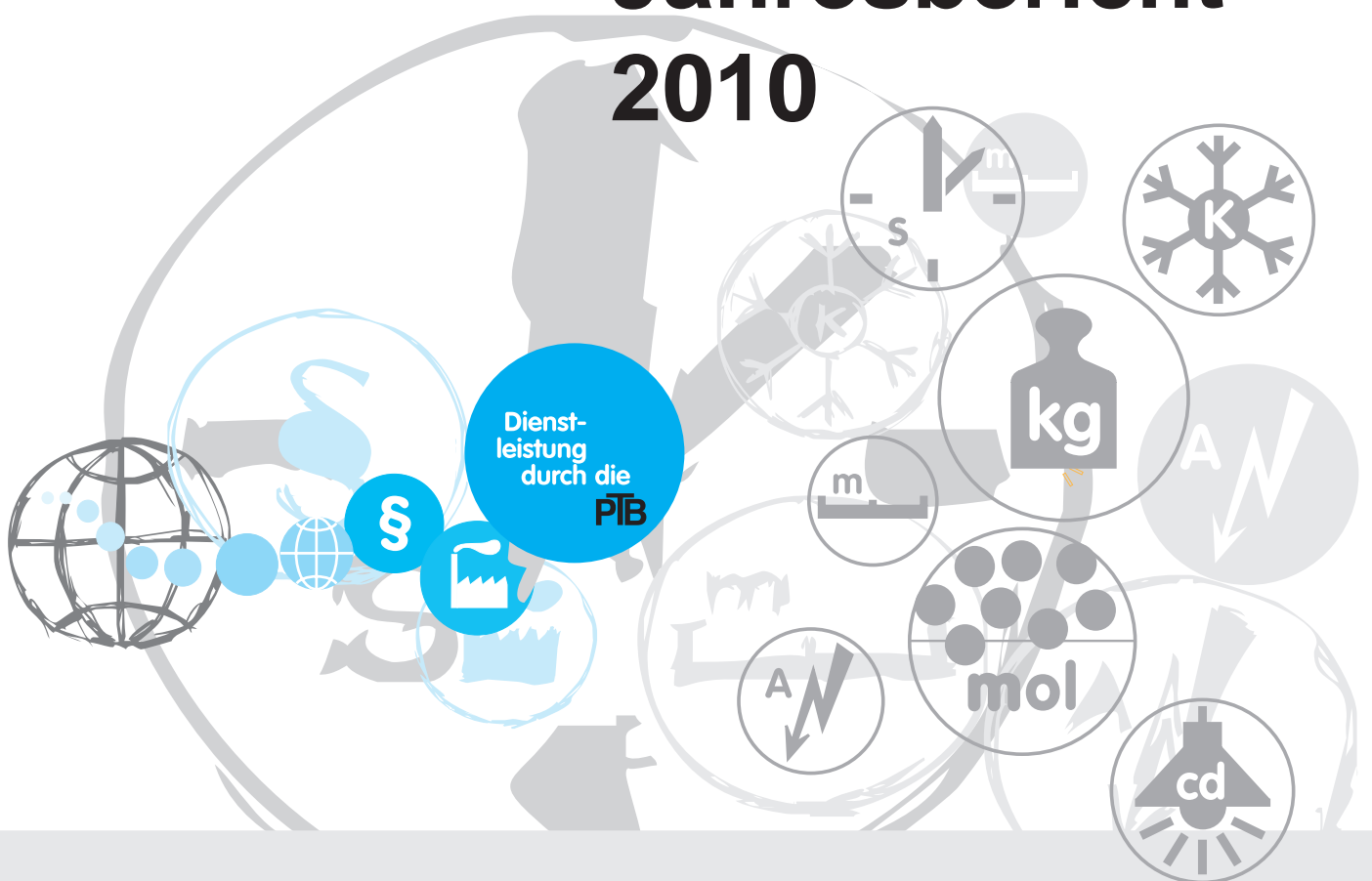


Physikalisch- Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin

Jahresbericht 2010



Vorwort

„Vorbildcharakter“, „FuE-Arbeiten sowie wissenschaftliche Dienstleistungen [...] von sehr guter, in Teilen exzellenter Qualität“, „Fachkompetenz und Qualität der Arbeiten der PTB-Mitarbeiter [sind] exzellent“: Nach solch außerordentlich positiven Beurteilungen im Rahmen der beiden Evaluationen in den Jahren 2002 und 2008 und der von beiden Kommissionen nachdrücklich ausgesprochenen Forderung nach einem Moratorium zur Beendigung des nun seit 18 Jahren andauernden Stellenabbaus gingen wir davon aus, dass dies nun erfolgen würde. Es kam leider völlig anders. Der Haushaltsplan für 2011 und die mittlere Finanzplanung bis 2014 sehen nicht nur eine Fortführung des Stellenabbaus von jährlich 1 %, sondern auch noch eine Erhöhung auf jährlich 1,9 % vor; das entspricht für den besagten Zeitraum etwa 100 Dauerstellen. Dies wird zur Folge haben, dass die PTB auch bisher erfolgreiche Tätigkeiten aufgeben muss – angesichts des Paktes für Bildung und Forschung der Bundesregierung eine schwer nachzuvollziehende Konsequenz.

Dass dieser nun vorliegende Jahresbericht dennoch zu einer überzeugend positiven Bilanz kommt, ist dem ungebrochenen Engagement unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zu verdanken. Dafür bedanke ich mich ganz herzlich. Dieses Engagement spiegelt sich nicht zuletzt auch bei der Einwerbung von Drittmitteln wieder. Hier kommt dem Europäischen Metrologie-Forschungsprogramm (EMRP) nicht nur finanziell, sondern auch strategisch besondere Bedeutung zu; gibt es uns doch die Möglichkeit, sich in Kooperation mit unseren europäischen Partnerinstituten den derzeitigen und insbesondere zukünftigen Herausforderungen an die Metrologie zu stellen. Nachdem bereits zu Beginn des Jahres mit neun gemeinsamen Projekten zum Themenschwerpunkt „Energie“ begonnen werden konnte, wurden zum Ende des Jahres weitere 9 Projekte zum Themenschwerpunkt „Umwelt“ und 17 zum Thema „Industrie“ auf den Weg gebracht. Sie werden im Frühjahr 2011 beginnen.

Bei den Arbeiten zur Neudefinition der Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems (SI) auf der Basis von Naturkonstanten ist dem unter der Leitung der PTB stehenden internationalen Avogadro-Projekt ein entscheidender Durchbruch gelungen. Die Arbeiten in der PTB haben dazu maßgeblich beigetragen, insbesondere konnte die molare Masse des Isotopen-angereicherten ^{28}Si -Kristalls mit einer bisher noch nie erreichten relativen Unsicherheit von $1 \cdot 10^{-8}$ bestimmt werden. Insgesamt ist aber dennoch die Datenlage bezüglich der Bestimmung der Werte der jeweiligen Naturkonstanten nach wie vor nicht befriedigend, sodass die im Herbst dieses Jahres stattfindende Generalkonferenz der Meterkonvention voraussichtlich noch keine Änderung des SI beschließen wird.

Neben der metrologischen Forschung und Entwicklung ist natürlich unser hoheitlicher Dienstleistungsauftrag von zentraler Bedeutung und nimmt nach wie vor etwa 30 % unserer Ressourcen in Anspruch. Deutlich zugenommen haben auch die Aktivitäten im Bereich des Technologietransfers. Daher haben wir uns sehr gefreut, dass der Technologietransferpreis 2010 der IHK Braunschweig wieder einmal in die PTB ging. Die Kollegen Gerlach, Johannsmeyer und Uelken erhielten die Auszeichnung für die Entwicklung und den erfolgreichen Transfer eines eigensicheren Energieversorgungssystems hoher elektrischer Leistung im Explosionsschutz.

Nicht zuletzt auch aufgrund der zusätzlichen Mittel aus dem Konjunkturprogramm der Bundesregierung und der befristet erleichterten Baugenehmigungsverfahren konnten Sanierungs- und Bauvorhaben weitestgehend wie geplant durchgeführt werden. Im Institut Berlin erhält das Observatorium sein historisches „Outfit“ zurück und wird im Inneren an die Anforderungen eines modernen Laborgebäudes angepasst. Auf der anderen Seite der Abbe-Straße entsteht an der Stelle des ehemaligen E2/E3-Gebäudes das neue Technikum, das

wesentliche Teile der technischen Infrastruktur des Instituts Berlin aufnehmen wird. In Braunschweig nähert sich der Rück- und Umbau des ehemaligen Forschungsreaktors zur Nachnutzung durch den Wissenschaftlichen Gerätebau seiner Fertigstellung. Der Umbau des alten Gästehauses zum „Kids & Co-Bau“ konnte abgeschlossen werden und die „Kids“ (Kindertagesstätte und Wissensforscher) sind eingezogen. Der Baubeginn für den dringend erforderlichen Neubau „Explosionsschutz“ verzögert sich auf Grund des langwierigen Genehmigungsverfahrens leider erneut.

Dies ist nun der letzte Jahresbericht, zu dem ich ein Vorwort schreibe. Ich hatte die Ehre, die PTB 16 Jahre leiten zu dürfen. Ich danke allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in den Forschungs-, Dienstleistungs- und Verwaltungsbereichen der PTB sowie den Mitgliedern des Kuratoriums, die mich dabei unterstützt und dazu beigetragen haben, dass die PTB nach wie vor Garant und Wegbereiter der messtechnischen Infrastruktur in unserem Lande und eines der führenden Metrologieinstitute weltweit ist. Ich wünsche meinem Nachfolger schon jetzt viel Erfolg und nicht zuletzt Freude im Amt des Präsidenten der PTB.

E. Crehnel

Foreword

“Exemplary ...”, “... research and developmental work as well as scientific services [...] of very good, in part excellent quality ...”, “... professional competence and quality of the work of PTB’s employees [are] excellent ...”: After such extraordinarily positive assessments within the scope of the two evaluations in 2002 and 2008 and the request expressly pronounced by both commissions for a moratorium on the termination of the personnel cutbacks which have persisted for 18 years, we assumed that it would now be carried out. Unfortunately, what has happened is totally different. The budget for 2011 and the midterm financial planning until 2014 not only plan for a continuation of the personnel cutback of 1 % annually, but even for an increase of 1.9 % annually; that corresponds to about 100 permanent posts for the period in question. The implication of this is that PTB will have to also give up activities which have so far been successfully carried out – a consequence difficult to understand in view of the Government’s “pact for education and research”.

The fact that this present annual report nevertheless presents a compellingly positive statement is due to the continued commitment of our staff, and I would like to express my sincere thanks to all. This commitment is reflected not least also in the acquisition of third-party funds. This gives the European Metrology Research Programme (EMRP) special importance not only financially, but also strategically speaking; indeed it gives us the opportunity – in cooperation with our European partner institutes – to meet the present and, particularly, the future challenges for metrology. After it was possible already at the beginning of the year to start 9 joint projects with “energy” as thematic focus, towards the end of the year it was possible to launch 9 further projects with “environment” and 17 with “industry” as the thematic focuses. The projects will begin in spring 2011.

A crucial break-through has been achieved in the work for the redefinition of the International System of Units (SI) on the basis of

fundamental constants by the international Avogadro Project, which is under the direction of PTB. The work at PTB has contributed significantly to this. In particular, it was possible to determine the molar mass of the isotopically enriched ^{28}Si crystal with a never yet achieved relative uncertainty of $1 \cdot 10^{-8}$. Altogether however, the data with regard to the determination of the values of the respective fundamental constants is still insufficient, so that the General Conference of the Metre Convention being held in the autumn of this year will probably not yet decide on a final change of the SI.

In addition to the metrological research and development, our sovereign service task is naturally of central importance and still claims about 30 % of our resources. The activities in the area of technology transfer have also increased considerably. Thus we were very pleased that the Technology Transfer Prize 2010 of the Chamber of Industry and Commerce (IHK) Braunschweig once again went to PTB. The colleagues Gerlach, Johannsmeyer and Uelken received the award for the development and the successful transfer of an intrinsically safe energy supply system of high electrical power in explosion protection.

Not least due to the additional funds from the business activity support programme of the Federal Government and the – temporarily facilitated – proceeding on the granting of building permission it was possible to carry out most of the reconstruction and building projects as planned. At the Berlin Institute, the Observatory gets its historic “outfit” back and its interior is fitted to the requirements of a modern laboratory building. On the other side of Abbe Street, the new Technikum will replace the former E2/E3 Building and is going to accommodate essential parts of the Berlin Institute’s technical infrastructure. In Braunschweig, the dismantling and reconstruction of the former research reactor for its future use by PTB’s “Scientific Instrumentation” Department is approaching its completion. Furthermore, it was

possible to complete the reconstruction of the old guest house as the "Kids & Co. Building" and the kids (day care center and Wissensforscher ("KnowledgeSearchers")) have moved in. The start of construction for the urgently needed new "Explosion Protection" building has unfortunately been delayed again due to the drawn-out permit procedure.

This is now the last annual report for which I will write a foreword. I had the privilege of directing PTB for 16 years. I would like to thank all the staff in the research, service and administrative branches of PTB as well as the members of the Kuratorium who have supported me and have contributed to PTB still being a guarantor and a pioneer of the metrological infrastructure in our country and one of the leading metrology institutes worldwide. I wish my successor already now every success and, not least, pleasure in the Office of President of PTB.

E. Crehnel

Der gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2010. Den kompletten Jahresbericht mit Nachrichten und speziellen Listen finden Sie auf den Internetseiten der PTB (unter www.ptb.de im Bereich „Publikationen“).

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

Jahresbericht im Internet

- Vorwort
- Nachrichten des Jahres
- Aus den Abteilungen
 - Abteilungsleiterberichte
 - Nachrichten
 - Tätigkeitsbereiche
 - Forschungsvorhaben
 - Kooperationen
- Kuratorium
- Organigramm (Stand: Dezember 2010)
- Zahlen und Fakten
 - Aktuelle Statistiken
- Anhang
 - Arbeitsgebiete und Ziele
 - Seminare/Workshops/Konferenzen
 - Kolloquien
 - Zulassungen des Eichwesens
 - Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien
 - Externe Lehrtätigkeit
 - Promotionen
 - Projekte der Technischen Zusammenarbeit
- Datenbank Publica
 - Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Inhaltsverzeichnis

Vorwort • Foreword

Nachrichten des Jahres • News of the year

Fachabteilungen • Scientific Divisions 8

Theoretische Physik • Theoretical Physics 18

Kuratorium • Advisory Board 20

Präsidium • Presidential Board 22

Gesetzliches Messwesen • Legal Metrology 26

Technologietransfer • Technology Transfer 28

Technische Zusammenarbeit • Technical Cooperation 29

Promotionen • Doctorates 31

Zahlen und Fakten • Figures and facts 32

Berichte der Abteilungen

Mechanik und Akustik 41

Elektrizität 57

Chemische Physik und Explosionsschutz 71

Optik 81

Fertigungsmesstechnik 95

Ionisierende Strahlung 107

Temperatur und Synchrotronstrahlung 119

Medizinphysik und metrologische Informationstechnik 135

Anhang

Kuratorium 151

Organigramm 152

Arbeitsgebiete 154

Geländepläne 158

Nachrichten des Jahres • News of the year

Bestimmung der Avogadrokonstante mit angereichertem Silizium-28

Das internationale Avogadro-Projekt hat einen Meilenstein erreicht: Mithilfe eines Einkristalls aus hochangereichertem ^{28}Si ist jetzt die Avogadro-Konstante mit einer relativen Gesamtmessunsicherheit von $3 \cdot 10^{-8}$ so genau wie nie zuvor gemessen worden. Im Rahmen der Kilogramm-Neudefinition ermöglicht der Wert $N_{\text{A}} = 6,02214078(18) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ die zurzeit genaueste Realisierung dieser Einheit.

In einer Kooperation mit Forschungsinstituten in Russland starteten 2003 mehrere nationale Metrologieinstitute zusammen mit dem Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) den ehrgeizigen Plan, etwa 5 kg hochangereichertes ^{28}Si (99,99 %) als Einkristall für eine genaue Bestimmung der Avogadrokonstante herstellen zu lassen. Mit einem Röntgeninterferometer wurde am italienischen Metrologieinstitut (INRIM) der Gitterparameter entlang einer Verschiebestrecke von 50 mm schrittweise bestimmt und durch Vergleichsmessungen mit einem natürlichen Si-Kristall am amerikanischen NIST bestätigt. Das Kugelvolumen wurde optisch mit Interferometern unterschiedlicher Strahlgeometrien in den Arbeitsgruppen in der PTB und den Metrologieinstituten Australiens (NMI-A) und Japans (NMIJ) mit exzellenter Übereinstimmung gemessen. Die störende Oberflächenschicht, die im Wesentlichen aus Siliziumdioxid besteht, wurde mit Elektronen- und Röntgenstrahlen nach unterschiedlichen Verfahren von der PTB, dem NMIJ und dem schweizerischen METAS analysiert.

Die Massen der beiden Siliziumkugeln wurden sowohl am BIPM, am NMIJ und in der PTB im Vakuum an die internationalen Massenormale angeschlossen. In der PTB wurde die Masse der ^{28}Si -Kugel im Vakuum erstmals mit einer relativen Standardmessunsicherheit von $6,5 \cdot 10^{-9}$ bestimmt. Aufgrund ihrer im Vergleich zu Pt-Ir-Kilogrammprototypen und Stahlnormalen deutlich geringeren Dichte sind zur Vermeidung von Luftauftriebskorrekturen Massebestimmungen im Vakuum ($< 0,1 \text{ Pa}$) erforderlich, die bislang allerdings durch einen

Determination of the Avogadro constant with enriched silicon-28

The international Avogadro project has reached a milestone: With the aid of a single crystal of highly enriched ^{28}Si , the Avogadro constant has now been measured as exactly as never before with a relative overall standard uncertainty of $3 \cdot 10^{-8}$. Within the scope of the redefinition of the kilogram, the value $N_{\text{A}} = 6.02214082(18) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ permits the currently most exact realization of this unit.

In 2003, several national metrology institutes launched – together with the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) and in a cooperation with research institutes in Russia – the ambitious project of having approximately 5 kg of highly enriched ^{28}Si (99.99%) manufactured as a single crystal for an exact determination of the Avogadro constant. At the Italian metrology institute (INRIM), the lattice parameter was stepwise determined with an X-ray interferometer along a scan path of 50 mm and confirmed by comparison measurements with a natural Si crystal at the American NIST. In the respective working groups of PTB and at the metrology institutes of Australia (NMI-A) and Japan (NMIJ), the sphere volume was measured optically – with excellent agreement – by means of interferometers with different beam geometries. The disturbing surface layer, which mainly consists of silicon dioxide, was analyzed with electron beams and X-rays in accordance with different procedures of PTB, NMIJ and the Swiss METAS.

At the BIPM, at NMIJ and at PTB, the masses of the two silicon spheres were linked up in vacuum with the national mass standards. At PTB, the mass of the ^{28}Si sphere was determined in vacuum with a relative standard uncertainty of $6.5 \cdot 10^{-9}$. Due to its density, which is clearly smaller compared to Pt-Ir kilogram prototypes and steel standards, mass determinations in vacuum ($< 0.1 \text{ Pa}$) are required to avoid air buoyancy corrections. These determinations have so far, however, been affected by a relatively large uncertainty contribution of the sorption correction. Here, the use of new sorption artefacts made of a Pt-Ir alloy has brought a decisive improvement so that the total measurement

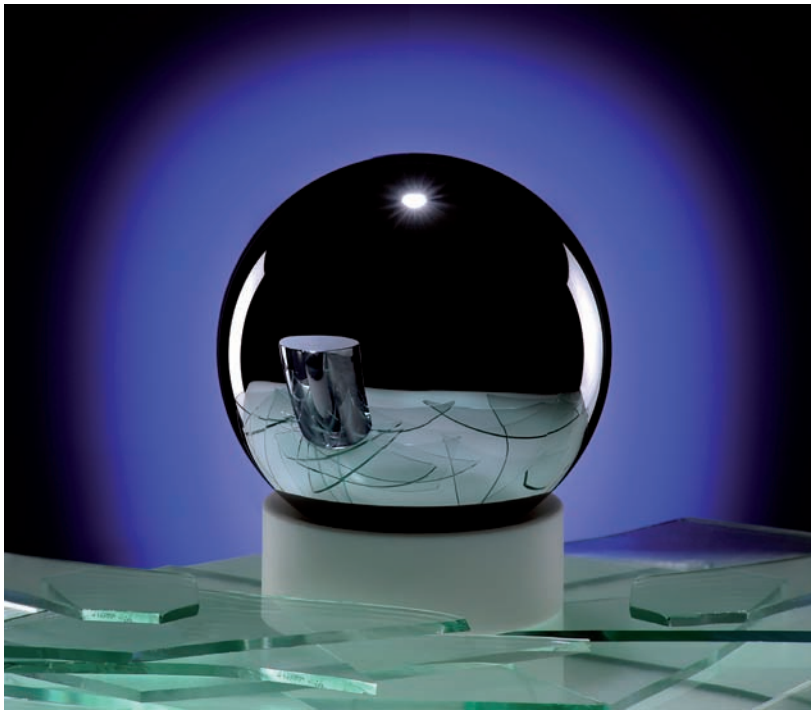


Bild 1: In der hochreinen Silizium-Kugel des Avogadro-Experiments spiegelt sich eine Kopie des internationalen Kilogramm-Prototyps, die letzte Verkörperung einer Einheit über einen physischen Körper. Die Kugel dagegen steht für die Definition auf der Grundlage von atomaren Eigenschaften bzw. Naturkonstanten.

Photo 1: The high-purity silicon sphere of the Avogadro experiment reflects a copy of the international kilogram prototype – the last embodiment of a unit via a physical body. The sphere, in contrast, stands for the definition on the basis of atomic properties or fundamental constants.

relativ großen Unsicherheitsbeitrag der Sorptionskorrektur beeinträchtigt waren. Hier hat der Einsatz neuer Sorptionskörper aus einer Pt-Ir-Legierung eine entscheidende Verbesserung gebracht, sodass die Gesamtmessunsicherheit der Masse der Si-Kugel unter Vakuumbedingungen ($6,5 \mu\text{g}$) jetzt im Wesentlichen von der Unsicherheit des verwendeten Kilogrammprototyps ($6 \mu\text{g}$) bestimmt wird.

Ausschlaggebend für die erfolgreiche Bestimmung der Avogadro-Konstante war schließlich, dass in der PTB eine neue massenspektrometrische Methode zur Bestimmung der molaren Masse (M) entwickelt werden konnte. Dabei werden Isotopenverhältnisse in der Nähe von 1 mit deutlich kleineren Unsicherheiten gemessen. Das Silizium wird hypothetisch in ein „virtuelles“ Element umgewandelt, das nur noch aus den beiden Isotopen mit geringerem Vorkommen (^{29}Si und ^{30}Si) besteht und deren Verhältnis ausschließlich gemessen wird. Der Gehalt dieses virtuellen Elements in der Matrix des tatsächlichen Elements (^{28}Si , ^{29}Si , und ^{30}Si) wird dann mit einer modifizierten Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie (IDMS) bestimmt. Mittlerweile konnte die molare Masse des ^{28}Si -Kristalls mit $u_{\text{rel}}(M) \leq 1 \cdot 10^{-8}$ bestimmt werden.

Insgesamt ist dieses Ergebnis ein Meilenstein auf dem Weg zu einer erfolgreichen Darstellung der neuen Kilogrammdefinition auf der Basis einer in ihrem Wert festgelegten Funda-

uncertainty of the mass of the Si sphere under vacuum conditions ($6.5 \mu\text{g}$) is now mainly determined by the uncertainty of the kilogram prototype used ($6 \mu\text{g}$).

What was decisive for the successive determination of the Avogadro constant was ultimately that a new mass-spectrometric method for the determination of the molar mass (M) could be developed at PTB. When this method is applied, isotopic ratios close to 1 are measured with clearly smaller uncertainties. The silicon is converted hypothetically into a “virtual” element which only consists of the two isotopes which occur less frequently (^{29}Si and ^{30}Si) and whose ratio is exclusively measured. The content of this virtual element in the matrix of the actual element (^{28}Si , ^{29}Si , and ^{30}Si) is then determined by means of modified isotope dilution mass spectrometry (IDMS). Meanwhile, the molar mass of the ^{28}Si crystal could be determined with $u_{\text{rel}}(M) \leq 1 \cdot 10^{-8}$.

All in all, this result is a milestone on the way towards a successful realization of the new kilogram definition on the basis of a fundamental constant whose value is fixed. At present, the agreement of this value with other possible realizations of the kilogram is not good enough to change the existing definition of the mass unit. The present state of the Avogadro project is, however, so promising that – on the basis of new measurements with improved sphere interferometers – the measurement uncertainty

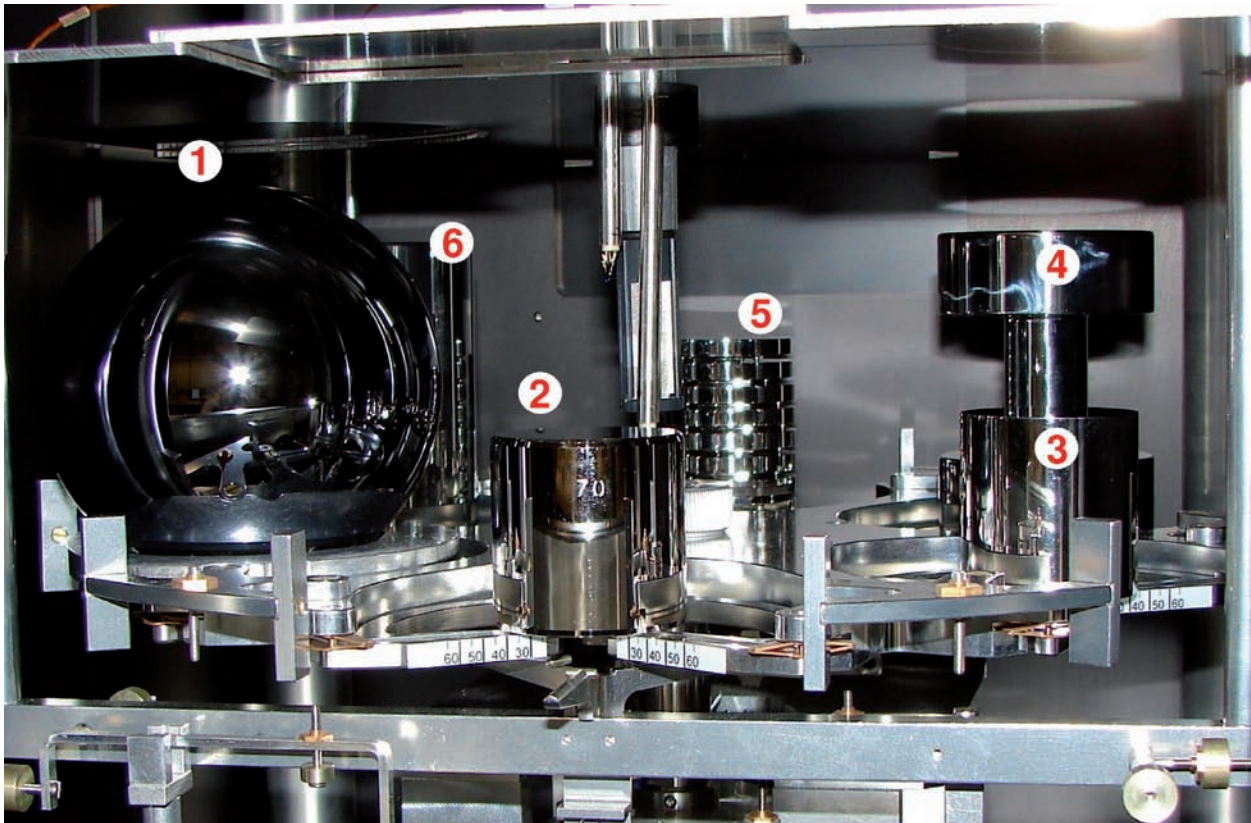


Bild 2: Blick in den Wägeraum während der Massebestimmung der ^{28}Si -Kugel AVO28-S8 (1) mit Kilogrammprototyp Nr. 70 (2), Platin-Iridium-Sorptionskörpern (3, 5) sowie Auftriebskörpern zur Bestimmung der Luftdichte (4, 6)

Photo 2: View into the weighing room during the mass determination of the ^{28}Si sphere AVO28-S8 (1) with kilogram prototype No. 70 (2), platinum-iridium sorption artefacts (3, 5) as well as buoyancy artefacts for the determination of the air density (4, 6).

mentalkonstante. Zurzeit ist aber die Übereinstimmung dieses Wertes mit anderen Darstellungen des Kilogramms nicht gut genug, um die bestehende Definition der Masseinheit zu ändern. Der gegenwärtige Status des Avogadroprojekts ist aber so vielversprechend, dass auf der Basis neuer Messungen mit verbesserten Kugelinterferometern an thermisch oxidierten Kugeln in naher Zukunft die vom BIPM verlangte Messunsicherheit von $2 \cdot 10^{-8}$ erreicht und sogar unterschritten werden wird.

of $2 \cdot 10^{-8}$ demanded by the Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM) will in the near future be achieved on thermally oxidized spheres and will probably even be undercut.



Erfolgreiche Kooperation der PTB mit Großwindkanal-Betreiber WindGuard

In vielen Bereichen der Industrie, wie beispielsweise in der Klima- und Umwelttechnik, der Meteorologie, der Luftfahrt oder in der Windenergiebranche, ist es von zentraler Bedeutung, die auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten zu kennen. Messgeräte zur Erfassung der Messgröße Strömungsgeschwindigkeit, wie z. B. Flügelrad-Anemometer, werden üblicherweise in Windkanälen kalibriert. Die PTB betreibt zur Darstellung und Weitergabe der Einheit Strömungsgeschwindigkeit zwei Windkanäle, wobei der größere, ein neu in Betrieb genommener Windkanal „Göttinger Bauart“ mit Vier-Quadranten-Steuerung, eine Düsenquerschnittsfläche von 0,1 m² aufweist.

Die PTB hat nun auch Zugang zu Großwindkanälen erhalten, in denen keine signifikanten Rückwirkungen von den zu kalibrierenden Anemometern verursacht werden. Basierend auf einer guten und vertrauensvollen Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren wurde Ende 2009 eine Kooperationsvereinbarung mit dem mittelständischen Unternehmen Deutsche WindGuard GmbH in Varel abgeschlossen. WindGuard ist Entwickler, Betreiber und Eigentümer von vier Windkanälen unterschiedlicher Funktion und Baugröße mit Düsenquerschnittsflächen von bis zu 11 m². Der neue Großwindkanal *Varel2*, der im Geschwindigkeitsbereich von 0,5 m/s bis 35 m/s Messungen mit Unsicherheiten kleiner als 0,05 m/s erlaubt, wurde 2010 mit PTB-Messtechnik bestückt, umfangreichen Vergleichsmessungen unterzogen und kann jetzt als „Referenzwindkanal“ für gemeinsame F&E-Aktivitäten, aber auch für internationale Vergleichsmessungen von der PTB genutzt werden.

Die Kooperation zwischen PTB und WindGuard liefert somit beste Voraussetzungen, erstmals genauere Untersuchungen von Anemometern unterschiedlicher Bauart und Funktionsweisen unter Referenzbedingungen durchzuführen mit dem Ziel, die Vergleichbarkeit von Kalibrierergebnissen in diesem Bereich sicherzustellen.

Successful cooperation of PTB with WindGuard, an operator of large wind tunnels

In many fields of industry – such as, for example, air-conditioning, environmental technology, meteorology, aviation or wind energy – knowledge of the occurring flow velocities is of substantial importance. Measuring instruments for detecting the measurand „flow velocity“, for example vane anemometers, are usually calibrated in wind tunnels.

PTB operates two wind tunnels for the realization and dissemination of the unit „flow velocity“. The larger of the two – a tunnel of „Goettingen design“ with four-quadrant-control which has recently been put into operation – has a nozzle cross-sectional area of 0.1 m².

Now, PTB also has access to large wind tunnels in which no significant interactions are caused by the anemometers to be calibrated. Based on a good and reliable cooperation in the past few years, a cooperation agreement with the medium-sized company Deutsche WindGuard GmbH in Varel was concluded at the end of 2009. WindGuard is the developer, operator and owner of four wind tunnels with different functions and of different designs with nozzle cross-sectional areas of up to 11 m². In 2010, the new large wind tunnel *Varel2*, which allows measurements with uncertainties of smaller than 0.05 m/s to be performed in the velocity range from 0.5 m/s to 35 m/s, was equipped with PTB measuring technology, submitted to extensive comparison measurements, and can now be used by PTB as a „reference wind tunnel“ for joint R&D activities, but also for international comparison measurements.

The cooperation between PTB and WindGuard thus provides the best preconditions for carrying out, for the first time, more exact investigations of anemometers of different designs and functions under reference conditions with the aim of ensuring the comparability of calibration results in this range.

Skalierbare quantisierte Ströme durch Parallelschaltung von Halbleiter-Einzelelektronenpumpen

Die Neudefinition einiger Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems durch die Festlegung von Fundamentalkonstanten wird für die nächsten Jahre ins Auge gefasst. Dabei soll das Ampere, die Einheit der Stromstärke, basierend auf der Elementarladung e definiert werden. Eine Möglichkeit für die Darstellung des Ampere gemäß der neuen Definition bieten Einzelelektronenpumpen, die daher zurzeit intensiv untersucht und weiterentwickelt werden. Betrieben bei einer Pumpfrequenz f , liefern Einzelelektronenpumpen einen quantisierten Strom $I = n \cdot e \cdot f$. Dabei ist n die pro Pumpzyklus transportierte Anzahl von Elementarladungen.

Für praktische Anwendungen sind quantisierte Ströme im Nanoampere-Bereich wünschenswert. Wird pro Pumpzyklus nur ein Elektron transportiert, muss dazu die Pumpfrequenz im Bereich von 10 GHz liegen. Bei solchen hohen Pumpfrequenzen kann sich jedoch die Unsicherheit der quantisierten Stromstärke erhöhen. Ein alternatives Konzept zur Erhöhung der Stromstärke setzt daher darauf, bei moderaten Frequenzen von 100 MHz bis 1 GHz die pro Pumpzyklus transportierte Elektronenzahl n durch den parallelen Betrieb mehrerer Einzelelektronenpumpen zu erhöhen.

Halbleiter-Einzelelektronenpumpen sind vielversprechende Bausteine für die Realisierung dieses Parallelbetriebs. Diese Bauelemente bestehen aus zweidimensionalen GaAs/AlGaAs-Schichten, in denen mit Hilfe von Ätzverfahren ein eindimensionaler Kanal definiert wird. Metallische Elektroden erlauben es, Spannungen an die Struktur anzulegen und damit das Potential in dem Kanal so zu modulieren, dass einzelne Elektronen durch den Kanal transportiert werden. Umfangreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen haben gezeigt, dass eine solche Einzelelektronenpumpe mit nur einer hochfrequenten Modulationsspannung betrieben werden kann und über einen weiten Bereich der Betriebsparameter stabil arbeitet. Theoretisch werden Unsicherheiten des quantisierten Stroms unter 10^{-8} bei Frequenzen bis zu 1 GHz vorausgesagt.

Im Berichtsjahr wurde eine Parallelschaltung aus vier Einzelelektronenpumpen hergestellt

Scalable quantised currents through the parallel circuiting of semiconductor single-electron pumps

In the next few years, it is envisaged to redefine some of the base units of the International System of Units by fixing the value of fundamental constants. Thereby, it is intended to define the ampere – the unit of current – on the basis of the elementary charge e . One possibility of realising the ampere according to the new definition is to use single-electron pumps – which are, therefore, currently being intensively investigated and developed. When operated at a pump frequency f , single-electron pumps provide a quantised current $I = n \cdot e \cdot f$. Here, n is the number of elementary charges transported per pump cycle.

For practical applications, quantised currents in the nanoampere range are desirable. If only one electron is transported per pump cycle, the pump frequency must be in the range of 10 GHz. At such high pump frequencies, the uncertainty of the quantised current may, however, increase. An alternative concept for increasing the current therefore consists in increasing the number of electrons n transported per cycle at moderate frequencies from 100 MHz to 1 GHz by operating several single-electron pumps in parallel.

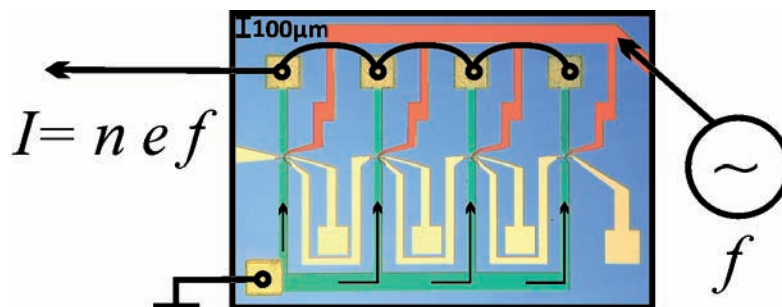
Promising components for such a parallel operation are semiconductor single-electron pumps. These components consist of two-dimensional GaAs/AlGaAs layers in which a one-dimensional channel is defined by means of etching procedures. Metallic electrodes make it possible to apply voltages to the structure and, thus, to modulate the potential within the channel in such a way that single electrons are transported through the channel. Extensive experimental and theoretical investigations have shown that such single-electron pumps can be operated with just one high-frequency modulation voltage and work stably over a wide range of the operating parameters. Theoretically, the quantised current is expected to have uncertainties below 10^{-8} at frequencies of up to 1 GHz.

In the year under report, a parallel circuit made of four single-electron pumps was set up (see Figure), of which three were fully functional. For the first time, it was possible to show that three semiconductor single-electron pumps



(siehe Bild), von denen drei funktionstüchtig waren. Erstmals konnte gezeigt werden, dass drei Halbleiter-Einzelektronenpumpen, betrieben mit einer gemeinsamen Modulationsspannung, parallel arbeiten können. Dabei erzeugen sie einen quantisierten Gesamtstrom von 264,36 pA bei 550 MHz. Da nur eine Modulationsspannung zum Betrieb benötigt wird, ist die Beschaltung relativ einfach. Das Konzept ist daher zu höheren Stromstärken skalierbar. Die zukünftigen Arbeiten haben das Ziel, diese Skalierbarkeit auszunutzen.

which are operated with just one joint modulation voltage can work in parallel. Thereby, they generate a quantised total current of 264.36 pA at 550 MHz. As just one modulation voltage is required to operate the single-electron pumps, connection of the pumps is relatively simple. Therefore, the concept can be scaled to higher currents. Future work will be focused on exploiting this scalability.



Optisches Mikroskopiebild einer Parallelschaltung von vier Halbleiter-Einzelektronenpumpen, die mit einem gemeinsamen hochfrequenten Modulationssignal betrieben werden. Dieses Signal wird an den Engstellen der grünen Leiterbahnen über den orange eingefärbten Kontakt eingekoppelt. Mit $n = 3$ funktionsfähigen Einzelektronenpumpen wurde ein quantisierter Strom $I = 3 \cdot e \cdot f$ bei einer Frequenz $f = 550$ MHz erzeugt.

Optical microscopy image of the parallel circuit of four semiconductor single-electron pumps which are operated with one joint high-frequency modulation signal. This signal is fed in at the bottlenecks of the green conductors via the orange contact. With $n = 3$ functional single-electron pumps, a quantised current $I = 3 \cdot e \cdot f$ was generated at a frequency $f = 550$ MHz.

Großverzahnungsnormal für die Industrie

Große Verzahnungen sind zu einem unverzichtbaren Bestandteil des modernen Maschinenbaus geworden. Wachsende Industriezweige wie der Schiffsbau, Windkraftanlagen und Erdölförderanlagen basieren auf dem Einsatz großer Getriebe. Der Wirkungsgrad, die Geräuschemission und die Betriebsdauer hängen entscheidend von der Qualität der eingesetzten Zahnräder ab. Bis zu der Genauigkeitsklasse 3 werden z. B. für ein 1-m-Zahnrad Toleranzen unter $10\ \mu\text{m}$ gefordert. Aus diesem Grund hat die Qualitätssicherung auf diesem Gebiet einen hohen Stellenwert eingenommen. Allerdings fehlten bislang geeignete Normale, um die Rückführung dieser Messungen sicherzustellen und damit die Güte der Messung durch Ermittlung einer aufgabenspezifischen Messunsicherheit einschätzen zu können.

Innerhalb eines EU-Forschungsprojektes hat die PTB nun ein Großverzahnungsnormal und eine hochgenaue Messeinrichtung zur Durchführung von Kalibrierungen großer Bauteile direkt in der Industrie entwickelt. Die besondere Ausführungsform als Segment eines ganzen Zahnrades macht es möglich, dass das Normal ein großes Rad von 1 m Durchmesser verkörpert, dieses aber zunächst noch auf den etablierten Messeinrichtungen innerhalb der PTB kalibriert werden kann. An dem Normal lassen sich sowohl Profil- als auch Flankenlinienmessungen durchführen. Unterschiedliche Steigungen (0° , 10° , 20°) und Steigungsrichtungen (gerade, links, rechts) machen das Normal universell einsetzbar. Die Kalibrierung aller Parameter erfolgte auf einem Koordinatenmessgerät, wobei das Normal in vier Positionen gemessen wurde. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung innerhalb der abgeschätzten Messunsicherheiten von unter $5\ \mu\text{m}$.

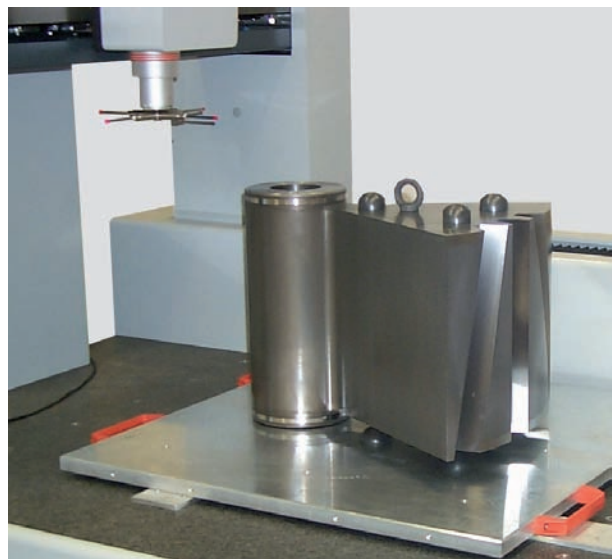
Mit dem Großverzahnungsnormal wurde die Basis für zukünftige Akkreditierungen im Bereich großer Zahnräder über die *Deutsche Akkreditierungsstelle* (DAkkS) geschaffen.

The large gearing standard provides the basis for future accreditations in the field of large gears via the *German Accreditation Body* (DAkkS).

Large gearing standard for industry

Large gears have become an indispensable part of modern mechanical engineering. Growing branches of industry – such as, for example, shipbuilding, wind power facilities and mineral oil conveying plants – are based on the use of large gearings. Gear efficiency, noise emission and service life depend decisively on the quality of the gears used. Up to accuracy class 3, tolerances below $10\ \mu\text{m}$ are, for example, required for a 1 m gear. This is why quality assurance has become particularly important in this field. So far, suitable standards which allow the traceability of these measurements to be ensured and, thus, the quality of the measurement to be assessed by means of a task-specific measurement uncertainty have, however, been missing.

Within the scope of an EU research project, PTB has now developed a large gearing standard and a high-precision measuring device by which large components can be calibrated directly in industry. The special design as a segment of a complete gear allows the standard to realize a large gear of 1 m in diameter which can, however, still be calibrated on the established measuring devices at PTB. The standard can be used for both profile measurements and tooth trace measurements. Different helix angles (0° , 10° , 20°) and hands of helices (straight, left-hand, right-hand) allow the standard to be universally used. All parameters were calibrated in a coordinate measuring machine on which the standard was measured in four positions. The results show a good agreement within the estimated measurement uncertainties of less than $5\ \mu\text{m}$.



Stroboskopie mit Neutronen

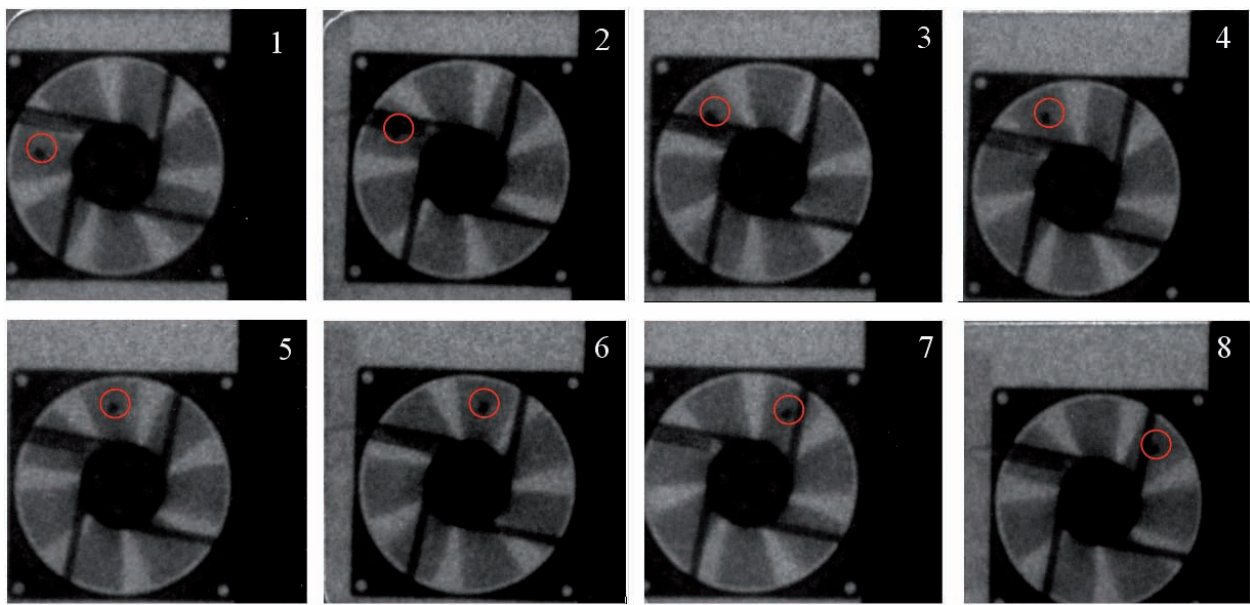
Radiografie und Tomografie mit thermischen Neutronen sind erprobte Techniken bei der Untersuchung von Verteilungen wasserstoffhaltiger Stoffe in unterschiedlichen Objekten aus schwereren Elementen, die mit konventioneller Röntgenstrahlung nicht möglich ist. Ein in der PTB ursprünglich für schnelle Neutronen entwickeltes Neutronen-Imagingsystem wurde durch den Einsatz eines anderen Neutronenkonverterschirms so modifiziert, dass es nun für langsame und thermische Neutronen geeignet ist. Die Kamera kann eine Bildersequenz von bis zu 9 Bildern aufnehmen. Sie ermöglicht eine individuelle Belichtungssteuerung für 8 dieser 9 Bilder mit Zeitauflösungen bis hinunter zu einer Mikrosekunde. Diese phasensynchronen Bilder werden dann auf einer einzigen CCD-Kamera aufsummiert, die am Ende des über viele Perioden andauernden Belichtungszyklus ausgelesen wird. Damit kann auch bei extrem kurzen Einzelbelichtungen oder kleinem Neutronenfluss ein geringes Bildrauschen erzielt werden. Mit diesem radiografischen Detektor kann die Dynamik schneller Prozesse auch in ungepulsten Neutronenstrahlen visualisiert werden. Basierend auf vielversprechenden ersten Ergebnissen wird diese Durchleuchtungstechnik für die Untersuchung der Dynamik von wasserstoffhaltigen Flüssigkeiten und Gasen (Brennstoff und Öl) in Verbrennungsmotoren weiterentwickelt.

Bei einem Experiment am Forschungsreaktor der Technischen Universität München wurde ein rotierender PC-Lüfter bei verschiedenen Phasenlagen „fotografiert“ und das Bild in der CCD-Kamera über viele Rotationsperioden phasensynchron akkumuliert. Auf eines der Lüfterblätter wurde ein kleines Cd-Blech geklebt – erkennbar als schwarzer Punkt in der roten Markierung. In diesen Bildern wurden jeweils etwa 600 Belichtungszyklen akkumuliert.

Stroboscopy with thermal neutrons

Radiography and tomography with thermal neutrons are well-proven techniques for investigating the distributions of hydrogen-containing substances in different objects made of heavy elements – something that is not possible with conventional X-radiation. A neutron imaging system developed originally at PTB for fast neutrons was modified in such a way by the use of a different neutron converter shielding that it is now suited for slow and thermal neutrons. The camera can record an image sequence of up to 9 images. It allows an individual exposure control for 8 of these 9 images with time resolutions down to one microsecond. These phase-synchronous images are then summed up on one single CCD camera, which is read out at the end of the exposure cycle. This cycle lasts over many periods. This also allows a lower image noise to be achieved even in the case of extremely short single exposures or small neutron flux. By means of this radiographic detector, the dynamics of fast processes can be visualized also in neutron beams that are not pulsed, and new and challenging fields of application open up. Based on these promising initial results, this radioscopy technique will be further developed for investigating the dynamics of hydrogen-containing liquids and gases (fuel and oil) in combustion motors.

In an experiment carried out at the research reactor of Munich Technical University, phase-synchronised exposures of a rotating PC fan were taken and the images for every given rotor position were accumulated in the CCD camera over many rotation periods. On one of the fan blades, a small Cd sheet was affixed – which is to be seen as a black dot in the red marking. In each of these images, approximately 600 exposure cycles have been accumulated.

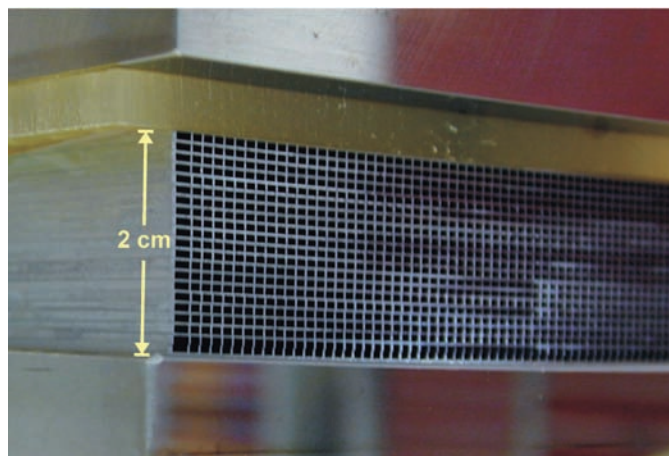


Charakterisierung von Optiken für das größte Röntgenteleskop aller Zeiten

Für die Erforschung schwarzer Löcher und der Entstehung des Universums planen die Raumfahrtagenturen Europas, Nordamerikas und Japans (ESA, NASA und JAXA) derzeit gemeinsam eine neue Röntgenmission. Im Jahr 2021 soll das *International X-Ray Observatory* (IXO) ins All starten. Eine der wesentlichen technischen Herausforderungen dieses Milliardenprojektes besteht in der Entwicklung von Spiegeloptiken mit einer Oberfläche von 1300 m², die die Röntgenstrahlung unter sehr streifenförmigem Strahlungseinfall mit einer Sammelfläche von etwa 3 m² einsammeln und fokussieren. Für die Charakterisierung der IXO-Optiken wurde an der Synchrotronstrahlungsanlage BESSY II in Berlin-Adlershof im Rahmen einer Forschungskooperation zwischen ESA und PTB ein Strahlrohr finanziert und aufgebaut.

Um eine stabile und kompakte Bauweise der IXO-Optiken zu erreichen, sollen polierte Siliziumwafer verwendet werden, die auf der Unterseite mit Rippen versehen und zu steifen Blöcken gestapelt sind. Dadurch entstehen Poren mit einem Querschnitt von etwa 1 mm², in denen die Strahlung reflektiert wird. Deren Charakterisierung über Röntgenreflektometrie erfordert einen Röntgen-Nadelstrahl wie den der kürzlich erweiterten *X-ray Pencil Beam Facility* (XPBF) im PTB-Labor bei BESSY II mit einem typischen Durchmesser von nur 50 µm bei einer Divergenz von unter einer Bogensekunde. Die Optiken können hier unter Vakuum mit einem Hexapod äußerst präzise verschoben und gedreht und bei drei verschiedenen Photonenergien (1,0 keV; 2,8 keV; 7,6 keV) untersucht werden. Sowohl der direkte als auch der von der Optik reflektierte Strahl werden mit einem ortsauflösenden CCD-basierten Detektor in einer Entfernung von jetzt bis zu 20 m von der Optik registriert, was der geplanten Fokallänge von IXO entspricht. Hierzu wurde eine vertikale Bewegung des CCD-Detektors um mehr als 2 m implementiert. Die Inbetriebnahme der erweiterten XPBF fand Anfang November 2010 statt.

Porenoptik für Röntgenstrahlung aus gestapelten Siliziumwafern, untersucht im PTB-Labor bei BESSY II für die Röntgenmission IXO



X-ray pore optics made of stacked silicon wafers, investigated in the PTB laboratory at BESSY II for the X-ray mission IXO

Characterization of optics for the largest X-ray telescope of all times

Currently, the space agencies of Europe, North America and Japan (ESA, NASA and JAXA) are planning a new, joint X-ray mission to investigate black holes and the formation of the universe. In 2021, the *International X-Ray Observatory* (IXO) is to be launched into space. One of the most essential technical challenges of this project – which costs billions – is the development of X-ray mirror optics with a surface area of 1300 m² which collect and focus the X-rays under grazing incidence with a collection area of approx. 3 m². For the characterization of the IXO optics, a beamline was financed and installed at the synchrotron radiation facility BESSY II in Berlin-Adlershof within the scope of a research cooperation between ESA and PTB.

To achieve a stable and compact construction of the IXO optics, polished silicon wafers will be used which are provided with ribs at their lower side and are stacked to form rigid blocks. Thereby, pores with a cross section of approx. 1 mm² are established in which the radiation is reflected. Their characterization via X-ray reflectometry requires an X-ray needle beam like that at the *X-ray Pencil Beam Facility* (XPBF) which has recently been extended at the PTB laboratory at BESSY II, with a typical diameter of only 50 µm and a divergence of less than one arc second. Using a hexapod, the optics under test can be shifted and turned under vacuum with the utmost precision and investigated at three different photon energies (1.0 keV; 2.8 keV; 7.6 keV). Both the direct beam and the beam reflected by the optics are recorded with a spatially resolving CCD-based detector at a distance of – now – up to 20 m from the optics. This corresponds to the planned focal length of IXO. For this purpose, a vertical movement of the CCD detector by more than 2 m has been implemented. The extended XPBF was put into operation early in November 2010.

Sanierung des Observatoriums, des ältesten Gebäudes der PTB

Mehr als sechzig Jahre nach dem zweiten Weltkrieg erhält das älteste und ehrwürdigste Gebäude im Institut Berlin der PTB seine im Krieg zerstörte Kuppel zurück – und zwar weitgehend im Stile von 1887. Damit werden die Pläne der Architekten Christian Huber und Joachim Staudt für dieses denkmalgeschützte Gebäude in die Tat umgesetzt. Die aufwendigen Renovierungsarbeiten umfassen die Restaurierung der originalen Klinkerfassade, eine Kompletterneuerung der technischen Ausstattung im Gebäudeinneren und einen Erweiterungsbau für die Infrastruktur des kürzlich installierten 3T-Magnetresonanztomographen.

Für Hermann von Helmholtz, den ersten Präsidenten der PTR, war das von ihm so genannte „Observatorium“ der zentrale und wichtigste Bau der Reichsanstalt. Er beeinflusste nachhaltig die Bauplanung der Architekten Paul Spieker und Theodor Astfalck, um zu gewährleisten, dass die Experimente der Physikalischen Abteilung weitgehend frei von äußeren Störungen durch mechanische Erschütterungen, Temperaturschwankungen und elektromagnetische Interferenzen blieben.

Äußerlich entsprach das Gebäude dem, was im reichen Stadtteil Charlottenburg üblich war: ein villenähnlicher Bau im Stile der Neo-Renaissance aus gelben Ziegeln. Auch wenn seine kunstvolle Kuppel im Zweiten Weltkrieg zerstört wurde, steht das Observatorium heute unter Denkmalschutz. Der gesamte Gebäudekomplex des Instituts Berlin der PTB ist in das Inventar der Bau- und Kunstdenkmäler Charlottenburgs aufgenommen und wird als Ensemble geschützt.



Baufoto vom Oktober 2010

Construction photo dated October 2010

Restoration of PTB's oldest building, the Observatory (Observatorium)

More than sixty years after the Second World War, the oldest and most antique building in the Berlin Institute of PTB gets back its dome (which was destroyed in the war) – in fact largely in the style of 1887. Thus, the plans of the architects Christian Huber and Joachim Staudt for this heritage-protected building will be implemented. The extensive project encompasses the restoration of the original clinker facade, a complete renewal of the technical equipment in the interior of the building, and an extension for the infrastructure of the recently installed 3T magnetic resonance tomograph.

For Hermann von Helmholtz, the first President of the PTR, the “Observatorium” – as he called it – was the central and most important building of the “Reichsanstalt” (PTR). He sustainably influenced the construction planning of the architects Paul Spieker and Theodor Astfalck, in order to ensure that the experiments of the Physics Department remained largely free of external disturbances due to mechanical vibrations, temperature fluctuations and electromagnetic interferences.

Externally, the building conformed to what was traditional in the prosperous urban district of Charlottenburg: a villa-type of building made of yellow bricks, in the neo-Renaissance style. Even though its ornate dome was destroyed in the Second World War, the Observatory has now been designated a historic monument. The entire building complex of the Berlin Institute of PTB is listed in the historic and art monuments of Charlottenburg and is protected as an architectural ensemble.

Energielücke in Graphen-Nanostreifen

Die herausragenden Eigenschaften des neuen „Wundermaterials“ Graphen – einer einzelnen Schicht aus Kohlenstoffatomen, die auf einem Bienenwabengitter angeordnet sind – versprechen eine Vielzahl von wichtigen technischen Anwendungen. Die Vergabe des Physik-Nobelpreises 2010 an A. Geim und K. Novoselov ist sicher ein Ausdruck dieser hochgesteckten Erwartungen. Allerdings behindert das Fehlen einer Energielücke im elektronischen Spektrum den Einsatz von Graphen in Bereichen der Elektronik, wo große Ströme mit Hilfe kleiner Spannungen ein- und ausgeschaltet werden müssen. Abhilfe schafft in solchen Fällen oft die Präparation von sehr schmalen Streifen mit Breiten im Nanometerbereich, wo aufgrund der eingeengten Bewegung der Ladungsträger quantisierte Energieeigenwerte auftreten. Leider bilden sich in schmalen Graphenstreifen mit Zickzack-Rändern (Bild 1) noch zusätzliche elektronische Randzustände aus, deren Energien die gewünschte Lücke jedoch wieder auffüllen (Bild 2).

Kürzlich konnte in der PTB gezeigt werden, dass durch Anlegen externer Spannungen die Öffnung einer Energielücke ermöglicht wird (Bild 3). Im Rahmen eines mit Hilfe der Dirac-Gleichung beschriebenen Modells, bei dem ein Graphen-Nanostreifen mit positivem elektrischen Potential am linken und negativem Potential am rechten Zickzack-Rand betrachtet wurde, konnte für kleine Potentiale eine lineare Abhängigkeit zwischen Energielücke und der Stärke des elektrischen Potentials vorhergesagt werden. Die maximale erreichbare Energielücke hängt von der Breite des Graphenstreifens ab und beträgt 0,12 eV bei einer Breite von 15 nm.

In weiteren numerischen Rechnungen für ein entsprechendes Gittermodell wurden die analytisch erhaltenen Ergebnisse bestätigt. Ferner wurde der Einfluss einer möglichen Unordnung an den Rändern, die durch Anlagerung von Gasatomen an die freien Kohlenstoffbindungen entstehen können, untersucht. Es zeigte sich, dass eine Energielücke erhalten bleibt, solange die Stärke der Unordnung nicht das 1,82-fache des angelegten elektrischen Potentials übersteigt. Es bleibt abzuwarten, ob dieser interessante Mechanismus in Experimenten beobachtet werden kann oder ob Wechselwirkungseffekte, die in den Rechnungen nicht berücksichtigt wurden, das Verhalten in realen Proben dominieren.

Energy gap in graphene nanoribbons

The outstanding properties of the new „wonder material“ graphene – a single layer of carbon atoms arranged on a honeycomb lattice – promise a large variety of possible applications. The awarding of the Nobel Prize in Physics in 2010 to A. Geim and K. Novoselov is surely an expression of these ambitious expectations. Due to the lack of an energy gap in the electronic spectrum, the use of graphene is, however, impeded in such fields of electronics where large currents have to be switched on and off with the aid of small voltages. In such cases, the preparation of very small stripes with widths in the nanometer range, where quantized energy eigenvalues occur due to the restricted movement of the charge carriers, is often helpful. Unfortunately, in small graphene ribbons with zigzag boundaries (Figure 1), additional electronic edge states are formed whose energies, however, fill the desired gap up again (Figure 2).

Recently, we have been able to demonstrate that by application of external voltages, the opening of an energy gap becomes possible (Figure 3). Within the scope of a model described by the Dirac equation, where a graphene nanoribbon with a positive electrical potential at the left zigzag edge and a negative potential at the right zigzag edge was studied, a linear dependence between the energy gap and the electrical potential could be predicted for small potentials. The maximum achievable energy gap depends on the width of the graphene stripe and amounts to 0.12 eV at a width of 15 nm.

Additional numerical calculations for a corresponding lattice model confirmed the analytically obtained results. Furthermore, the influence of possible disorder at the edges, which may occur due to the attachment of gas atoms to the free carbon bonds, was investigated. It turned out that an energy gap remains as long as the magnitude of the disorder does not exceed 1.82 times the electrical potential applied. It remains to be seen whether this interesting mechanism can be observed in experiments, or whether interaction effects which have not been taken into account in the calculations dominate the behaviour in real samples.

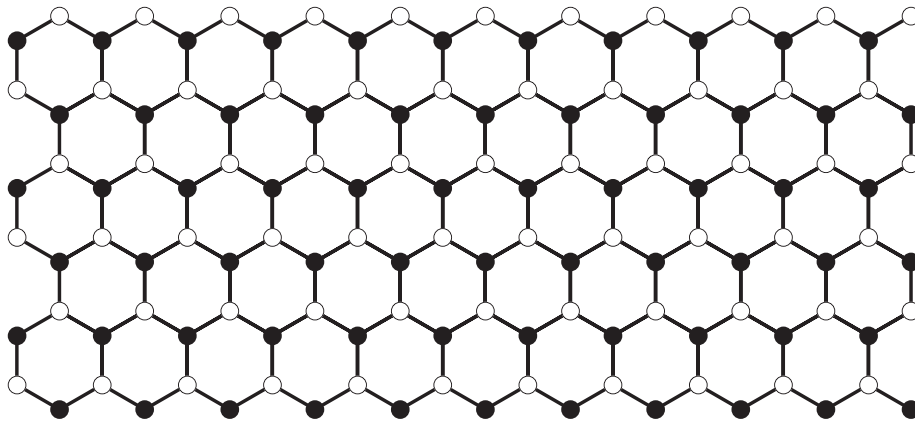


Bild 1: Darstellung eines Graphen-Streifens mit Zickzack-Rändern. Die weißen und schwarzen Punkte entsprechen den Kohlenstoffatomen auf den beiden Dreieck-Untergittern, die das hexagonale Gitter aufspannen.

Figure 1: Representation of a graphene ribbon with zigzag edges. The white and the black points correspond to the carbon atoms on the two triangular sublattices which form the hexagonal lattice.

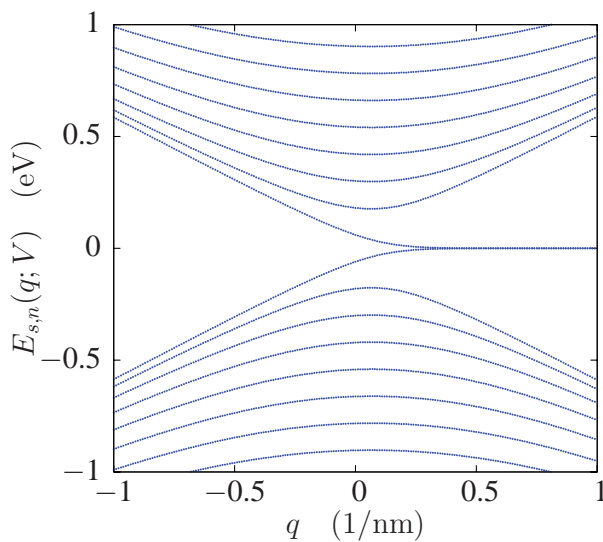


Bild 2: Ausschnitt aus dem Energiespektrum eines sehr langen Graphenstreifens mit Zickzack-Rändern. Die durch die Energiequantisierung entstandene Energielücke bei $E = 0$ wird durch die Anwesenheit von Randzuständen wieder aufgefüllt.

Figure 2: Detail of the energy spectrum of a very long graphene ribbon with zigzag edges. The energy gap at $E = 0$ formed by the energy quantization is refilled by the presence of edge states.

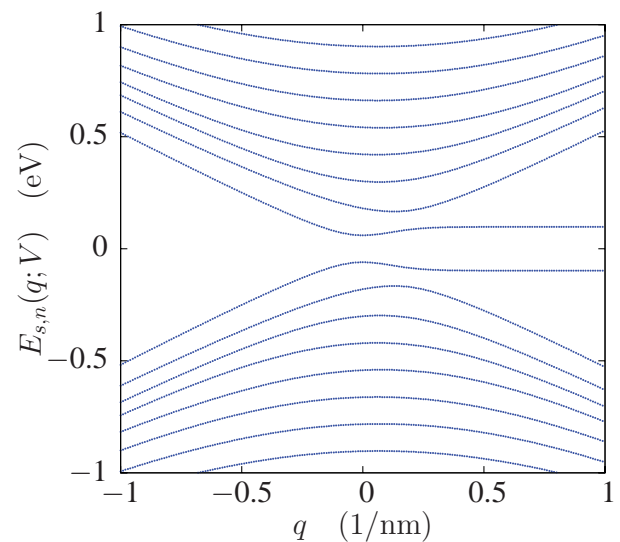


Bild 3: Ausschnitt aus dem Energiespektrum mit einer von außen einstellbaren Energielücke, die durch ein angelegtes elektrisches Potential, welches am linken Zickzack-Rand positiv und am rechten Zickzack-Rand negativ ist und auf die jeweiligen Randzustände einwirkt, hervorgerufen wird.

Figure 3: Detail of the energy spectrum with an energy gap – adjustable from the outside – which is caused by an applied electrical potential which is positive at the left zigzag edge and negative at the right zigzag edge and which acts on the respective edge states.



Die 61. Sitzung des Kuratoriums der PTB

Die 61. Jahrestagung des Kuratoriums der PTB fand am 27. und 28. Mai 2010 in Braunschweig statt.

Nach der Begrüßung der Gäste und Kuratoren durch den Präsidenten der PTB, Prof. Dr. Ernst O. Göbel, wurden den Teilnehmern in ausgewählten Bereichen des Hauses aktuelle Themenschwerpunkte und Forschungsergebnisse der PTB präsentiert.

Am Nachmittag stellten Nachwuchswissenschaftler der PTB im Rahmen eines wissenschaftlichen Kolloquiums die Arbeiten zu den Themen „Speziesanalytik für die klinische Chemie“, „Bose-Einstein-Kondensation von Calciumatomen“ und „Neuartige Dehnungsmessstreifen-Wägezellen aus einkristallinem Silizium für Präzisionsmessungen“ vor. Im Anschluss fanden die Fachgespräche der Kuratoren mit Vertretern der Fachabteilungen statt.

Die Sitzung am 28. Mai 2010 wurde vom Präsidenten des Kuratoriums, Ministerialdirektor J. Meyer, eröffnet, der in seinem Vortrag insbesondere auf aktuelle Entwicklungen im BMWi, das europäische Metrologieforschungsprogramm (EMRP) und die wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen der Ressortforschungseinrichtungen einging. Zum Ende seines Berichtes unterstrich Meyer die wichtige Arbeit der PTB insbesondere für die Unterstützung von Innovation und Technologietransfer durch Normung und somit insgesamt für die Technologiepolitik in Deutschland.

Prof. Göbel ging in seinem Bericht vor allem auf die Neudefinition von Basiseinheiten, das European Metrology Research Programme (EMRP), auf diverse Großprojekte und auf die Dienstleistungen der PTB ein.



The 61st Meeting of the Kuratorium (Advisory Board) of PTB

The 61st annual meeting of the Kuratorium of PTB was held on 27 and 28 May 2010 in Braunschweig.

After being welcomed by the President of PTB, Prof. Dr. Ernst O. Göbel, the guests and members of the Kuratorium went on guided tours of selected PTB laboratories to learn first-hand about current topics and recent results in research and in metrology-related services.

At a scientific colloquium in the afternoon, young PTB scientists presented their work on the topics “Species analysis for clinical chemistry”, “Bose-Einstein condensation of calcium atoms” and “Novel strain gauge load cells made of single-crystal silicon for precision measurements”. Afterwards, the members of the Kuratorium formed small groups to enter into technical discussions with representatives of the departments.

The meeting on 28 May 2010 was opened by the President of the Kuratorium, Ministerialdirektor J. Meyer (Ministry Department Head), who in his lecture addressed current developments in the BMWi, the European Metrology Research Programme (EMRP) and the economic and political framework conditions of the departmental research institutions. At the conclusion of his report, Meyer emphasized the importance of PTB’s work, particularly for the support of innovation and technology transfer by means of standardization, and thus as a whole for Germany’s technology policy.

Prof. Göbel in his report focused on the redefinition of base units, the European Metrology Research Programme (EMRP), various large-scale projects and the services rendered by PTB.

Bild 1: Die neue Fontänenuhr CSF2 der PTB wird von Dr. Nils Nemitz (re.) präsentiert.

Photo 1: The new CSF2 fountain clock of PTB is presented by Dr. Nils Nemitz (on the right).



Bild 2: Gruppenbild des Kuratoriums der PTB 2010

Photo 2: Group photo of the PTB Kuratorium 2010

Da der bereits im Vorjahr vom Kuratorium kritisierten Regelung einer Übernahme der PTB-Liegenschaften durch die *Bundesanstalt für Immobilienaufgaben* (BImA) bisher nicht abgeholfen worden ist, wurde vom Kuratorium beschlossen, nunmehr direkt schriftlich die zuständigen Bundesminister für Wirtschaft und Technologie sowie für Finanzen auf die besonderen Gegebenheiten bei der PTB hinzuweisen und so eine Ausnahmeregelung für die PTB zu erwirken.

Im weiteren Verlauf der Sitzung stellte sich Dr. Gerhard Ulm anlässlich seiner Berufung zum Leiter der Abteilung 7 vor. Der Vorsitzende des Ausschusses zur Ergänzung des Kuratoriums, Prof. Dr. Klaus von Klitzing, berichtete über die Sitzung des Ausschusses vom Vortag, und der Schatzmeister des Helmholtz-Fonds e. V., Ruprecht von Siemens, stellte seinen Bericht zum abgelaufenen Geschäftsjahr des Helmholtz-Fonds e. V. vor. Von Siemens verabschiedete sich nach 25-jähriger Tätigkeit als Schatzmeister für den Fonds und gab das Amt an seine Nichte, Dr. Nathalie von Siemens, weiter.

Persönliches:

Als neue Mitglieder des Kuratoriums wurden Dr. rer. nat. Gerald Linke, Leiter Kompetenzzentrum Gastechnik, E.ON Ruhrgas AG, und Prof. Dr. rer. nat. Eberhard Umbach, Vorstandsvorsitzender Forschungszentrum Karlsruhe, berufen.

Since the intended transfer of PTB's real estate to the Institute for Federal Real Estate (*Bundesanstalt für Immobilienaufgaben*, BImA), already criticized by the Kuratorium last year, has not been cancelled as of yet, the Kuratorium has now decided to write directly to the responsible Federal Ministers of Economy and Technology as well as of Finance and point out the special conditions at PTB, with the goal of exempting PTB from this forced transfer.

In the further course of the meeting Dr. Gerhard Ulm introduced himself on the occasion of his appointment as Head of Division 7. The Chairman of the Committee for the Extension of the Kuratorium (*Ausschuss zur Ergänzung des Kuratoriums*), Prof. Dr. Klaus von Klitzing, reported on the previous day's meeting of the Committee, and the Treasurer of the Helmholtz-Fonds e. V., Ruprecht von Siemens, presented his report on the preceding financial year of the Helmholtz-Fonds e. V. Afterwards, von Siemens took his leave after 25 years of service as Treasurer of the Helmholtz Foundation and passed his office on to his niece, Dr. Nathalie von Siemens.

Personal matters:

Dr. rer. nat. Gerald Linke, Head of the Gas Technology and Energy Systems Competence Centre (*Kompetenzzentrum Gastechnik*), E.ON Ruhrgas AG, and Prof. Dr. rer. nat. Eberhard Umbach, Chairman of the Research Centre Karlsruhe (*Forschungszentrum Karlsruhe*), were appointed to the Kuratorium as new members.



Professor Dr. Ernst O. Göbel erhält das Große Verdienstkreuz

Professor Dr. Ernst Otto Göbel, seit 1995 Präsident der PTB, ist mit dem Großen Verdienstkreuz des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland ausgezeichnet worden. Damit wurden unter anderem seine Verdienste um das internationale Renommee Deutschlands auf dem Gebiet der Metrologie gewürdigt. Der Bundesminister für Wirtschaft und Technologie, Rainer Brüderle, überreichte die Auszeichnung an Professor Göbel am 14.12.2010 im Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. In seiner Laudatio stellte er Professor Göbel als Wissenschaftler und Hochschullehrer heraus, der sich über das Amt des Präsidenten der PTB hinaus außergewöhnliche Verdienste um das Wohl der Bundesrepublik Deutschland erworben hat. Bundesminister Brüderle dankte Göbel für den herausragenden Beitrag, den er für die internationale Reputation Deutschlands auf dem Gebiet der Metrologie geleistet hat, wobei er besonders die hohe Bedeutung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt für die deutsche Wirtschaft hervorhob.

Prof. Dr. Ernst O. Göbel is awarded the Grand Cross of Merit

Professor Dr. Ernst Otto Göbel – who has been the PTB's president since 1995 – has been awarded the Grand Cross of Merit of the Order of Merit of the Federal Republic of Germany. With this award, among other things, his achievements towards the advancement of Germany's international reputation in the field of metrology were honoured. The award was presented to Professor Göbel by the Federal Minister of Economics and Technology, Rainer Brüderle, in the Federal Ministry of Economics and Technology on 14 December 2010. In his laudation, the Minister honoured Professor Göbel as a scientist and a university professor who has gained exceptional merits through his contributions over and above the office of President of PTB to the well-being of the Federal Republic of Germany. Federal Minister Brüderle thanked Göbel for his outstanding contribution to furthering Germany's international reputation as a specialist in the field of metrology. He also emphasised PTB's paramount importance for the German economy.



Bundesminister Rainer Brüderle ehrt Professor Dr. Ernst O. Göbel, Präsident der PTB, mit dem Großen Verdienstkreuz des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland.

Federal Minister Rainer Brüderle presented the Grand Cross of Merit to Professor Ernst O. Göbel, president of the PTB

(Bundesregierung/Susanne Eriksson)



Das europäische Metroloieforschungsprogramm EMRP

Vor einigen Jahren erarbeiteten die europäischen Metrologieinstitute ein gemeinsames For-

schungsprogramm für die kommenden Jahre, das European Metrology Research Programme (EMRP). Darin wurden strategisch wichtige Forschungsfragen für eine koordinierte Bearbeitung identifiziert. Nach einer ersten Phase, in der das EMRP von der EU im Rahmen des ERAnet-Plus-Programms mit einem Drittel kofinanziert wurde, läuft nun die zweite Phase im Umfang von 400 Mio. €, von denen etwa die Hälfte von der EU als Maßnahme nach Artikel 169 des EG-Vertrages (nun Artikel 185 des Lissabon-Vertrages) getragen wird. In 2009 gab es den ersten Aufruf in der neuen Förderphase des EMRP. Von den 16 zum Thema „Energie“ beantragten Projekten werden nach unabhängiger Begutachtung mittlerweile 9 gefördert. Die PTB ist an allen geförderten Projekten beteiligt, hat für zwei Projekte die Koordinierung übernommen und ist insgesamt für acht fachliche Arbeitspakete verantwortlich. Alle geförderten Projekte sind 2010 gestartet und werden bis einschließlich 2013 abgeschlossen sein. Sie widmen sich unterschiedlichen Themen aus dem Bereich Energie, unter anderem der Energieerzeugung wie z. B. erneuerbaren Energien, der effizienteren Nutzung von Energie und dem Energiehandel. Die Beteiligung der PTB wird mit 6,7 Mio. € gefördert.

Im Jahr 2010 gab es im Rahmen des EMRP die Aufrufe zu den Themenbereichen „Umwelt“ und „Industrie“. Nach mehreren Konferenzen zur Bildung interessierter Konsortien und der Festlegung möglicher Arbeitspakete wurden dem EMRP-Komitee insgesamt 17 Projekte zum Thema „Umwelt“ und 28 Projekte zum Thema „Industrie“ vorgeschlagen.

Nach dem Votum der unabhängigen Gutachter werden nun von den eingereichten Projekten im Themenbereich „Umwelt“ 9 Projekte gefördert. Das Aufgabenspektrum erstreckt sich von der Verbesserung der Luftanalytik bis hin zum Umgang mit radioaktivem Abfall. In

The European Metrology Research Programme (EMRP)

EMRP

European Metrology Research Programme

► Programme of EURAMET

A few years ago, the European metrology institutes set up a joint research programme,

the European Metrology Research Programme (EMRP), for the years to come. This programme identified strategically important research issues for coordinated cooperation. In the first phase, the EU co-financed one-third of the EMRP within the framework of the ERAnet-Plus programme. Now, about half of the funding for the ongoing second phase – which amounts to EUR 400 million in total – is provided by the EU as a measure pursuant to Art. 169 of the EC Treaty (now Art. 185 of the Treaty of Lisbon). The first call in the new funding phase of EMRP took place in 2009. Of the 16 projects on the subject “Energy” for which support had been applied for, 9 are now being funded after having been assessed by independent experts. PTB is involved in all supported projects. For two of the projects, PTB has taken over the role of coordinator and it is responsible for 8 technical area work packages in total. All funded projects were started in 2010 and will be completed by the end of 2013. They are devoted to various subjects from the energy field, among others, the energy production of, for example, renewable energy sources, more efficient use of energy, and the energy trade. PTB’s participation is funded with EUR 6.7 million.

In 2010, within the framework of EMRP, the calls were in the subject areas “Environment” and “Industry”. After several conferences held on the creation of interested consortia and on the definition of possible work packages, a total of 17 projects were submitted to the EMRP Committee on the subject “Environment” and another 28 projects on the subject “Industry”.

Following the decision made by the independent experts, 9 of the submitted “Environment” projects are now being funded. The range of tasks extends from the improvement of air analytics to the handling of radioactive waste. PTB provides the coordinator for 3 projects and the technical management for 9 work packages. In

drei Projekten stellt die PTB den Koordinator und führt fachlich durch 9 Arbeitspakete. Im umfangreicheren Themenbereich „Industrie“ werden 17 der eingereichten 28 Projektanträge gefördert. Die Fördergelder werden für Forschungen in sehr unterschiedlichen Bereichen wie z. B. Hochtemperaturmetrologie oder Quantenkommunikationstechnologien eingesetzt. Die PTB ist in 8 der beantragten Projekte Koordinator und wird in insgesamt 26 fachlichen Arbeitspaketen die Leitung übernehmen. Die PTB-Beteiligung an den Projekten dieser beiden Aufrufe wird mit ca. 12,9 Mio. € gefördert.

Im nächsten Jahr geht es weiter mit Aufrufen zu den Themenbereichen „Gesundheit“, „SI broader scope“ und „Neue Technologien“. PTB-weit wurde dieses Jahr bereits intensiv diskutiert, wo die PTB einen Beitrag leisten kann. Nun stehen die Forscher in den Startlöchern für den tatsächlichen Aufruf dieser Themen Anfang 2011.

Gründung der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS)

Seit 1.1.2010 gibt es in Deutschland nur noch eine nationale Akkreditierungsstelle, die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS). Die DAkkS führt Akkreditierungen im Rahmen hoheitlicher Tätigkeiten durch und unterliegt im Rahmen dieser Aktivitäten dem deutschen Verwaltungsrecht. Alle bisherigen deutschen Mitglieder der Europäischen Akkreditierungsorganisation (EA) wurden in die DAkkS übergeleitet, darunter auch der Deutsche Kalibrierdienst (DKD).

Die bisher vom DKD wahrgenommenen Akkreditierungen werden nun von der Abteilung „Metrologie“, einer der sechs fachlichen Abteilungen der DAkkS, durchgeführt. Die PTB unterstützt nach wie vor fachlich bei Begutachtungen und bei der Kalibrierung hochwertiger Normale. Die nun von der DAkkS akkreditierten Kalibrierlaboratorien sind weiterhin wichtige Partner der PTB bei der Realisierung der metrologischen Weitergabestrukturen in Deutschland.

the more comprehensive subject “Industry”, 17 of the 28 submitted project applications will be granted funding. The funds received will be used for research in vastly different fields such as, e.g., high-temperature metrology or quantum communication technologies. PTB is the project coordinator for 8 of the projects applied for and will head the total of 26 technical area work packages. PTB’s participation in the projects of these two calls is funded with approx. EUR 12.9 million.

The subjects for next year’s calls are “Health”, “SI broader scope” and “New technologies”. PTB-wide intensive discussions have already been held this year on which subjects PTB could contribute to. Researchers are now waiting impatiently for the actual call for these subjects at the beginning of 2011.

Establishment of the German Accreditation Body (Deutsche Akkreditierungsstelle – DAkkS)

Since 1 January 2010, there is now only one national accreditation body in Germany: the Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS). DAkkS performs accreditations within the framework of sovereign activities and is, within the scope of these activities, subject to German administrative law. All previous German members of the European Cooperation for Accreditation (EA) – also the Deutscher Kalibrierdienst (DKD) – have been transferred to DAkkS.

The accreditations which used to be performed by DKD are now dealt with by the Department “Metrology”, one of six specialised departments of DAkkS. PTB still supports accreditation work within the scope of technical assessments and for the calibration of high-quality standards. The calibration laboratories which are now accredited by DAkkS remain key partners of PTB for the realisation of metrological dissemination structures in Germany.



Kids & Co.-Bau

Mittendrin im Forschungsbetrieb und doch im Grünen – im ehemaligen Gästehaus der PTB tummeln sich seit Spätsommer 2010 nun 15 Kleinkinder zwischen acht Monaten und drei Jahren. Die Kindertagesstätte „Die kleinen Murmeltiere“ ist am 1. September 2010 offiziell mit einem Grußwort von Vizepräsident Prof. Manfred Peters eröffnet worden. Mit ihr will die PTB ihre Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen motivieren und unterstützen, einen schnellen beruflichen Wiedereinstieg ermöglichen und die zermürende Suche nach einer flexiblen Kleinkindbetreuung ersparen. Träger der Einrichtung ist die Johanniter-Unfall-Hilfe e. V.

Für die Einrichtung der Kita ist das ehemalige Gästehaus komplett saniert worden. Der jetzige „Kids & Co-Bau“ ist fest in Kinderhand, denn das Gebäude beherbergt neben der Kita auch ein Eltern-Kind-Büro und ein Experimentallabor für Grundschüler, die einmal wöchentlich als „WissensForscher“ in die PTB kommen. Dieses „WissensForscher-Labor“ wurde im September 2010 von Prof. Ernst O. Göbel eröffnet. Es beherbergt das bereits seit 2009 außerordentlich erfolgreich laufende Projekt der „WissensForscher“, das den kleinen Forschern und Forscherinnen vermitteln will, wie Physik und Chemie funktionieren und wo sie im Alltag eine Rolle spielen. Die technische Ausstattung des Labors ist bewusst schlicht gehalten, da das „WissensForscher“-Projekt zeigen will, dass naturwissenschaftlicher Unterricht mit geringem Aufwand spannend gestaltet und an Grundschulen einfach umgesetzt werden kann (www.WissensForscher.de).

Kids & Co. House

Right in the middle of research work and yet in the midst of nature – since the end of the summer 2010, PTB's previous guest house is teeming with 15 infants and toddlers aged between 8 months and 3 years. The day care facility named "Die kleinen Murmeltiere" ("The little marmots") was officially inaugurated with an opening speech by Vice-President Professor Manfred Peters on 1 September 2010. This facility was established as a way of supporting PTB's employees in helping them get back to work faster after their parental leave and of making their life easier by providing them with a flexible infant day care solution – and thus sparing them the very tedious search for such a facility. The body responsible for this facility is the Johanniter-Unfall-Hilfe e.V.

For the purpose of setting up this day care centre, the previous guest house was fully renovated. The house which now bears the name "Kids & Co. Bau" has clearly been taken over by the children. The building accommodates not only the day care facility but also a parent-child office and an experimental laboratory for primary school pupils who come to PTB once a week to become "knowledge searchers" or "researchers" ("WissensForscher") for a day. This "WissensForscher laboratory" was opened in September 2010 by Professor Ernst O. Göbel. It accommodates the ongoing project of the "WissensForscher" which has been conducted very successfully since 2009 and is dedicated to teaching the little researchers how physics and chemistry work and to showing them in which parts of everyday life they play a role. The laboratory's technical equipment has been kept simple on purpose, since the "Wissens-

Forscher" project intends to show that natural science class can be made fascinating with just basic input and can thus be implemented easily at primary schools (for further information, please visit: www.WissensForscher.de).



Eröffnung der Kindertagesstätte „Die kleinen Murmeltiere“

Opening of the day care facility "The little marmots"

Anpassung der Richtlinien für nicht-selbsttätige Waagen und für Messgeräte an die Europäischen Rahmenbedingungen

Im Beschluss 768/2008/EG haben das Europäische Parlament und der Rat den bestehenden Rechtsrahmen für die Vermarktung von Produkten überarbeitet und neu festgelegt. Der Beschluss enthält Musterregelungen für

- Begriffsbestimmungen und allgemeine Verantwortlichkeiten der Wirtschaftsakteure
- Anforderungen an Benannte Stellen und Notifizierungsverfahren
- Konformitätsbewertungsverfahren
- CE-Kennzeichnung
- Schutzklauselverfahren (Verfahren bei technischer und formaler Nichtkonformität).

Alle bestehenden Richtlinien nach dem neuen Ansatz (New Legal Framework – NLF) werden entsprechend dieses Beschlusses angepasst (Omnibus-Verfahren). Dabei geht es nicht nur um redaktionelle, sondern auch um materielle Änderungen. Insgesamt werden die Regelungen deutlich klarer und damit verbindlicher. Die Anpassungsvorschläge für die Richtlinien 2009/23/EG (nichtselbsttätige Waagen) und 2004/22/EG (Messgeräte) wurden im Messgeräteausschuss der Kommission diskutiert und abgestimmt, bevor die neuen Textentwürfe dem Parlament und dem Rat zur Zustimmung vorgestellt werden. Wesentlichstes Ergebnis der durchgeführten Arbeiten ist die weitestgehende Annäherung der beiden Richtlinien. Die Verabschiedung der überarbeiteten Richtlinien wird bis Mitte des nächsten Jahres erwartet.

Überprüfung der europäischen Messgeräterichtlinie sowie die eventuelle Rücknahme von EWG-Richtlinien zu Messgeräten

Laut Artikel 25 der europäischen Messgeräterichtlinie (MID, 2004/22/EG) soll die Europäische Kommission bis Ende April 2011 über die bisherigen Erfahrungen mit der MID Bericht erstatten. Sie soll berichten, ob die Konformitätsbewertungsverfahren ordnungsgemäß angewendet werden und ob ggf. Änderungen zur einheitlichen Zertifizierung vorzuschlagen sind. Deutschland (BMWi und PTB) hat sich

Adaptation of the Directives on non-automatic weighing instruments and measuring instruments to the European framework conditions

In Decision 768/2008/EC, the European Parliament and the Council have revised and recast the existing framework for the marketing of products. The decision provides reference provisions for

- definitions and general obligations for economic operators
- requirements placed on notified bodies and notification procedures
- conformity assessment procedures
- CE marking
- safeguard clause procedures (procedures for technical and formal non-compliance).

All existing directives according to the new approach (New Legal Framework – NLF) will be adapted according to this decision (omnibus procedure). Here, not only editorial, but also material changes will be made. All in all, the regulations will become considerably clearer and – thus – more binding. The adaptation proposals for the Directives 2009/23/EC and 2004/22/EC were discussed and agreed upon in the Measuring Instruments Committee of the Commission and the new drafts will now be presented to the Parliament and Council for approval. Approval of the revised Directives is expected for the middle of next year.

Assessment and revision of the MID as well as a possible withdrawal of the still existing EEC directives

According to article 25 of the MID, the Commission is to report on the realisation of the MID by the end of April 2011. It is to report on whether the conformity assessment procedures are properly applied, and whether modifications for the uniform certification are to be proposed, where applicable. Germany (PTB and BMWi – Federal Ministry of Economics) has participated actively in the enquiries made by the Commission and its commissioned company “Centre for Strategy & Evaluation Services” (CSES) and has also submitted proposals of its own. A particular role is – due to its European composition and acceptance – assumed by WELMEC and its Working Committees. These Committees have drawn up a comprehensive



aktiv an den Umfragen der Kommission und deren beauftragtem Unternehmen „Centre for Strategy & Evaluation Services“ (CSES) beteiligt und auch eigene Vorschläge eingereicht. Eine besondere Rolle spielt WELMEC mit seinen Arbeitsausschüssen aufgrund seiner europäischen Zusammensetzung und Akzeptanz. Diese haben einen umfangreichen Katalog an Korrektur- und Ergänzungsvorschlägen für den bestehenden Richtlinientext erarbeitet und in den Messgeräteausschuss der Kommission eingebracht. Darunter sind auch Vorschläge für neue Funktionen bei Messgeräten für den Verbrauch (Smart metering) und Stromtankstellen für Elektroautos. Die Kommission hat die Vorschläge jedoch in einer ersten Stellungnahme weitestgehend abgelehnt. Begründet wurde dies mit dem Hinweis, dass die meisten Vorschläge existierende oder potenzielle Handelshemmnisse nicht herabsetzen würden. Von daher ist zu erwarten, dass nur eine geringe Anzahl von Vorschlägen durch die Kommission Beachtung finden wird.

Zusätzlich wurde innerhalb der Mitgliedstaaten und im Messgeräteausschuss diskutiert, ob die noch bestehenden alten EWG-Richtlinien ersatzlos gestrichen und damit die betroffenen Messgeräte aus der Harmonisierung herausgenommen oder mit aktualisierten grundlegenden Anforderungen als neue Anhänge in die MID eingegliedert werden sollen.

Nach einer Vorabstimmung im Messgeräteausschuss sind die Vorschläge und Gutachten von der Kommission im Internet veröffentlicht worden. Bis zum 1. November 2010 bestand für alle betroffenen Seiten im Rahmen eines von der Kommission durchgeführten öffentlichen Konsultationsverfahrens (public consultation) die Möglichkeit, Stellung zu nehmen. Die aktuelle Internetseite der Kommission zu „Legal metrology and pre-packaging“, über die die Unterlagen zur „public consultation“ und auch die Ergebnisse veröffentlicht werden, ist http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/legal-metrology-and-prepack/index_en.htm.

catalogue of proposals for the correction and completion of the existing text of the directive and submitted it to the Measuring Instruments Committee of the Commission. This catalogue also contains proposals for new functions of measuring instruments for consumption (smart metering) and electric current charging stations.

Besides this, it is discussed within the member states and in the Measuring Instruments Committee whether the still existing old EEC directives should be deleted without replacement and whether – thus – the respective measuring instruments should be excluded altogether from the harmonisation, or whether they should – with updated fundamental requirements – be added to the MID in the form of new annexes.

After a preliminary vote in the Measuring Instruments Committee, the proposals and expert reports have been published by the Commission on the Internet. Until November 1, 2010, all the parties involved had the possibility to state their opinion within the scope of a public consultation carried out by the Commission. The current Internet website of the Commission on “Legal metrology and pre-packaging” – where the documents on “public consultation” and also the results are published – is called http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/legal-metrology-and-prepack/index_en.htm.



Technologietransferpreis für eigensicheres Energieversorgungssystem

Der Technologietransferpreis der IHK Braunschweig ging dieses Jahr an die PTB: Udo Gerlach, Ulrich Johannsmeyer und Thomas Uehlken wurden für die Entwicklung einer eigensicheren Energieversorgung in den Bereichen chemische Anlagen, Pharmazie, Erdölverarbeitung und Biogaserzeugung ausgezeichnet.

Eigensicherheit bedeutet, dass auch unter den widrigsten Umständen kein zündfähiger Funke entstehen kann. Durch das prämierte Konzept des „Power-i“/ DART (Dynamic Arc Recognition and Termination) wird der Strom-Spannungsverlauf im elektrischen Netzwerk überwacht. Bei Fehlfunktionen wird die elektrische Leistung innerhalb von Mikrosekunden, also vor Ausbildung eines energiereichen Funkens, kontrolliert begrenzt. Durch diese kontinuierliche Überwachung können erstmals im Normalbetrieb Leistungen bis 50 W bereitgestellt werden; dies wird unter der Bezeichnung „DART“ von einem der deutschen Weltmarktführer bereits vermarktet. Künftig wird auch der Betrieb von Lastverbrauchern wie Ventilsteuerungen, Motoren oder Heizern im explosionsgeschützten Bereich ohne bauliche Vorsorgemaßnahmen möglich. Bisher war die Eigensicherheit auf Leistungen um 2 W und damit typischerweise auf die Versorgung von Sensoren begrenzt. Mit „Power-i/DART“ treten somit kleine, intelligente Geräte an die Stelle von aufwendigen bautechnischen Schutzmaßnahmen. Die PTB hat zusammen mit 13 namhaften deutschen Herstellerfirmen im Juni 2009 ein Konsortialprojekt gestartet, um gemeinsam die „Power-i“-Technologie voranzubringen und die nötigen Schritte zur internationalen Normung in die Wege zu leiten.

Technology Transfer Prize for an intrinsically safe energy supply system

Udo Gerlach, Ulrich Johannsmeyer and Thomas Uehlken were this year's recipients of the Technology Transfer Prize of the Industrie- und Handelskammer (IHK) (Chamber of Industry and Commerce), Braunschweig, for the development of an intrinsically safe energy supply in the areas of chemical plants, pharmaceuticals, petroleum processing and biogas production.

Intrinsic safety means that even under the most adverse conditions, no ignitable spark can be created. The current-voltage curve is monitored in the electric network by means of the much-acclaimed concept of the “Power-i”/ DART (Dynamic Arc Recognition and Termination). In the case of malfunctions, the electrical power is controllingly restricted within microseconds, thus before an energy-rich spark can form. Due to this continuous monitoring, it has become possible for the first time to make available power up to 50 W in normal operation; this is already on the market under the designation “DART” by one of Germany's leading manufacturers on the global market. In future, the operation of higher loads, such as valve controls, motors or heaters, will also be possible without special constructional preventive measures in the explosion-protected area. Up to now, the intrinsic safety was limited to powers of about 2 W and thus typically restricted to the supplying of sensors. Therefore, with “Power-i”/DART small, intelligent devices replace constructionally extensive protective measures. PTB started, together with 13 renowned German manufacturing companies, a consortial project in June 2009 in order to jointly bring forward the “Power-i” technology and initiate the necessary steps towards international standardization.

Die Preisträger (von links: Udo Gerlach, Ulrich Johannsmeyer und Thomas Uehlken)

The prize winners (from left: Udo Gerlach, Ulrich Johannsmeyer und Thomas Uehlken)



„Desertec“ – Strom aus der Wüste

Seit Beginn der deutschen Entwicklungszusammenarbeit vor fast fünf Jahrzehnten ist die PTB weltweit in Entwicklungsländern tätig. In den letzten Jahren wandelten sich die Themenfelder durch die rasant voranschreitende Globalisierung sehr schnell. Während in den LDCs (least developed countries) nach wie vor die Stärkung des Verbraucherschutzes durch den Aufbau von Basis-Qualitätsinfrastruktur im Vordergrund steht, wollen heute viele Entwicklungs- und neue Schwellenländer neben Produkten aus der Landwirtschaft auch industriell verarbeitete Lebensmittel, Halbfertigwaren und Industriegüter exportieren. Daraus haben sich neue Tätigkeitsfelder für die technische Zusammenarbeit in der Qualitätsinfrastruktur entwickelt, wie die Unterstützung von Prüflaboratorien in den Bereichen Lebensmittel, Gesundheit und Industrie. Außerdem werden Klimaveränderungen und Umweltfragen sowie die Energieversorgung für Entwicklungs- und Schwellenländer immer drängender.

Der Fachbereich *Technische Zusammenarbeit* der PTB arbeitet seit 2001 im Maghreb mit Marokko, Algerien, Tunesien und neuerdings auch mit Mauretanien zusammen. In diesem Zeitraum stieg die Nachfrage nach Energie durch eine dynamische industrielle Entwicklung und den damit einhergehenden höheren Lebensstandard deutlich. In den Wüsten der Erde kann genügend Strom erzeugt werden, um die Menschheit nachhaltig zu versorgen (Desertec Konzept). Verschiedene Initiativen zur Nutzung von Solarstrom wollen nun Wüsten und neue Technologien in den Dienst von Energie-, Wasser- und Klimasicherheit stellen. Sowohl das Konzept der Desertec Foundation als auch der europäische Solarplan stehen ebenso für Lösungen, den CO₂-Ausstoß durch einen schnellen Ausbau von erneuerbaren Energien aus Wind und Sonne zu begrenzen. Wenn ein Teil der in Nordafrika produzierten Energie nach Europa exportiert würde, könnten bald zwei Klimaziele der EU in greifbare Nähe rücken: Senkung der Treibhausgasemissionen und Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien auf 20 Prozent. Die Fachabteilungen der PTB beteiligen sich an internationaler Forschung zu diesen Themen. Darüber hinaus gibt es eine enge Zusammenarbeit mit der deutschen Industrie zur Optimierung der erforderlichen Technologien.

„Desertec“ – Electricity from the desert

Since German work in development cooperation began almost five decades ago, PTB has been active in developing countries all over the world. In the last few years the fields of work have changed very quickly due to rapidly progressing globalisation. While strengthening consumer protection through developing the basic quality infrastructure is still in the foreground in the LDCs (least developed countries), today many developing countries and new countries in transition not only want to export agricultural products but also industrially processed foods, semi-finished goods and industrial goods, too. New fields of work for technical cooperation in quality infrastructure have developed from this, such as the support of testing laboratories in the food, health care and industrial sectors. Besides this, climatic changes and environmental issues as well as the supply of energy for developing countries and countries in transition are growing ever more pressing.

Since 2001 the *Technical Cooperation Department* of PTB has been working in the Maghreb with Morocco, Algeria, Tunisia and – recently – also with Mauritania. During this time, the demand for energy has grown significantly because of the dynamic industrial development and the higher standard of living accompanied with it. Enough electricity can be generated in the Earth's deserts to supply mankind sustainably (Desertec Concept). Various initiatives for the use of solar power now want to place deserts and new technologies into the service of energy, water and climate security. Both the concept of the Desertec Foundation as well as the European Solar Plan stand equally for solutions to limit CO₂ emissions through quickly extending renewable energies from wind and solar power. If some of the energy produced in North Africa were exported to Europe, two of the EU's climate goals could soon be within reach: lowering the greenhouse gas emissions and increasing the proportion of renewable energies to 20 per cent. PTB's divisions are involved in international research on these issues. There is, moreover, close cooperation with German industry to optimise the technologies required.

To systematically analyse PTB's options in supporting its partner countries, the discussion paper "The Desertec Initiative – Powering the Development Perspectives of Southern Medi-





Solaranlage in Marokko, in der Nähe von Ain Beni Mathar, zur Strom- und Wärmeerzeugung.

Thermo-solar power plant in Marocco (near Ain Beni Mathar).

Foto/Photo: © Dana Smillie/World Bank

Um die Optionen der PTB zur Unterstützung ihrer Partnerländer systematisch zu analysieren, ist 2010 in Zusammenarbeit mit dem *Deutschen Institut für Entwicklungspolitik* das Diskussionspapier „The Desertec Initiative – Powering the development perspectives of Southern Mediterranean countries?“ erarbeitet und im September veröffentlicht worden. Eine wichtige Aussage der Studie ist die Erwartung der südlichen Anrainerstaaten des Mittelmeers, am technologischen Fortschritt aktiv beteiligt zu werden, um kompetent an Entscheidungen zum Ausbau der Solarenergie mitzuwirken und von ihrer Nutzung zu profitieren.

Am 3. Dezember 2010 fand das 258. PTB-Seminar unter dem Titel „Desertec – Herausforderung für Metrologie und technische Zusammenarbeit“ in Braunschweig statt. Die Referenten kamen aus den relevanten Ministerien, der PTB und anderen Forschungseinrichtungen sowie der einschlägigen Industrie.

In Zusammenarbeit mit den anderen Durchführungsorganisationen der deutschen Entwicklungszusammenarbeit und den Partnerinstituten der PTB können gemeinsame Programme geschnürt werden, die Elemente wie Politikberatung, Schaffung der gesetzlichen Rahmenbedingungen, Normung, Investitionen, Preisgestaltung, Finanzierungsmodelle oder Betrieb der Anlagen enthalten. Darüber hinaus ermöglicht das Thema der PTB, neue Partnerschaften im In- und Ausland einzugehen.

terrestrial Countries?“ was elaborated in 2010 in cooperation with the *Deutsches Institut für Entwicklungspolitik* (German Development Institute) and was published in September. One important statement in the study is the expectation of the southern states bordering the Mediterranean of being actively involved in the technological advances in order to competently contribute to decisions on extending solar energy and to profit from its use.

On 3 December 2010, the 258th *PTB-Seminar* entitled “Desertec – Challenges for Metrology and Technical Cooperation” took place in Braunschweig. The speakers came from the relevant ministries, PTB and other research institutes as well as from the pertinent branches of industry.

In cooperation with the other implementing organisations working in German development cooperation and PTB’s partner institutes joint programmes can be drawn up, containing elements such as policy advice, creating legal frameworks, standardisation, investments, pricing, financing models or plant operation. This issue, furthermore, enables PTB to enter into new partnerships at home and abroad.



Promotionen 2010 • Doctorates in 2010

Sascha Mäuselein (FB 1.1)	Untersuchungen an Silizium-Verformungskörpern für die Anwendung in der Präzisions-Kraftmess- und Wägetechnik
Andre Buß (FB 1.2)	Kraft-Weg-Aufnehmer für dynamische Anwendungen
Michael Eggert (FB 1.4)	Reduzierung der systematischen Messunsicherheit in der Doppler-Global-Velocimetry durch den Einsatz von Laserfrequenzumtastverfahren
Stefanie Dencks (FB 1.6)	Signal analysis of quantitative ultrasound measurements at the proximal femur
Jan Dittmer (FB 2.2)	Untersuchungen zur Messung elektrischer Spannungen mit mikroelektromechanischen Bauelementen
Mohammed Salhi (FB 2.2)	Confocal THz Laser Microscope
Jinni Lee (FB 2.6)	Programmable Josephson Arrays for Impedance Measurements
Sonja Pratzler (FB 3.21)	Dynamisch-gravimetrische Herstellung von Kalibriergasgemischen am Beispiel der Atemalkohol-Kalibriergase
Thomas Horn (FB 3.6)	Gefährdungsbetrachtung von PEM-Brennstoffzellen hinsichtlich des Einsatzes in explosionsgefährdeten Betriebsstätten
J.S.R. Vellore Winfred (FB 4.3)	Investigation of collisional losses and decoherence in a 1-D optical lattice clock with ⁸⁸ Sr
Osama Terra (FB 4.3)	Dissemination of ultra stable optical frequencies over commercial fiber networks
Kai Zimmermann (FB 4.4)	Experiments towards optical nuclear spectroscopy with Thorium-229
Björn Stein (FB 4.4)	Contributions to a Yb ⁺ single-ion optical frequency standard
Guido Bartl (FB 5.4)	Interferometrische Bestimmung von absoluten Kugelradius-topografien
Rudolf Meeß (FB 5.5)	Entwicklung von Mikrowälzführungen
Matthias Müller (FB 7.1)	Hochauflösende Röntgenemissionsspektrometrie im Spektralbereich weicher Röntgenstrahlung
Narudom Noulkhov (FB 7.3)	Radiometric measurement of thermodynamic temperatures in the temperature range from 419 °C to 660 °C for an improved temperature scale



Zahlen und Fakten • Figures and facts

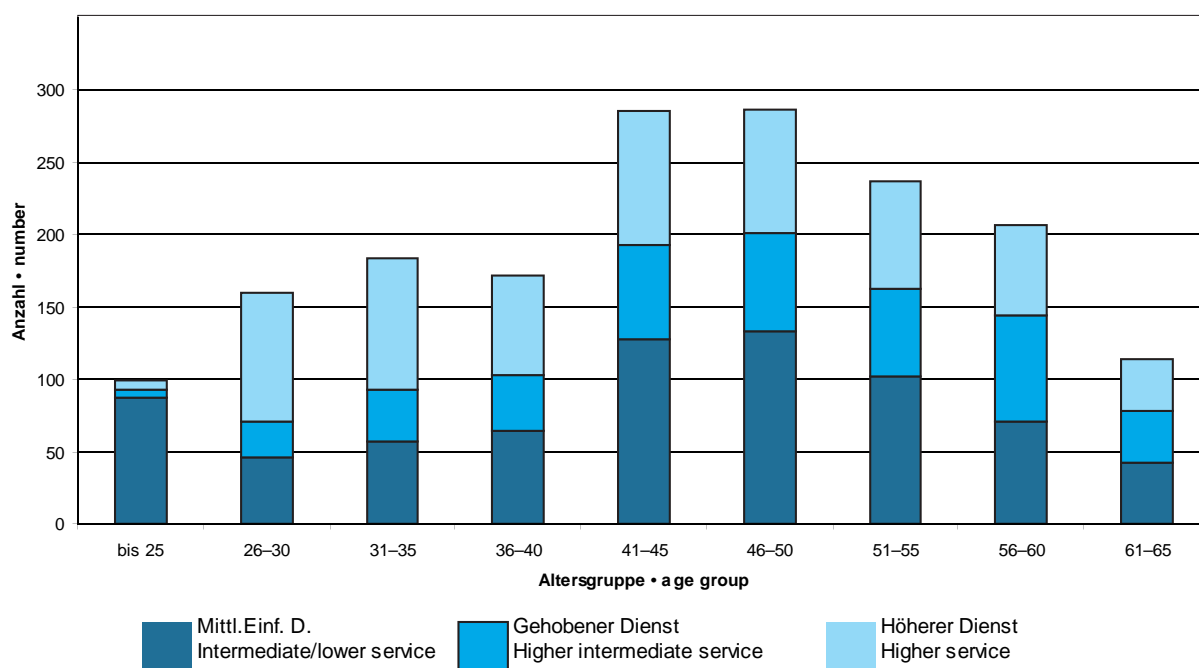
Personal: Entwicklung • Staff: development

Personelle Entwicklung von 2001 bis 2010 (Stand: 31. Dezember 2010) • Development of staff
 a) unbefristet • unlimited in time b) zeitlich befristet • limited in time

Beschäftigungsverhältnis	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
a)										
Beamte • civil servants	503	507	506	508	510	515	523	517	513	537
Angestellte • employees	786	767	744	727	692	863	833	830	831	795
Arbeiter • workers	211	208	207	193	196	—*	—	—	—	—
gesamt • total	1500	1482	1457	1428	1398	1378	1356	1347	1344	1332
b)										
Auszubildende • trainees	136	138	144	158	159	150	136	134	135	134
befristet Beschäftigte • temporary staff	52	53	52	61	69	66	98	110	175	230
Drittmittelpersonal • staff members financed by third parties	104	106	122	105	109	169	162	172	185	194
Mitarbeiter gesamt staff member total	1792	1779	1775	1752	1735	1763	1752	1763	1839	1890

* 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)



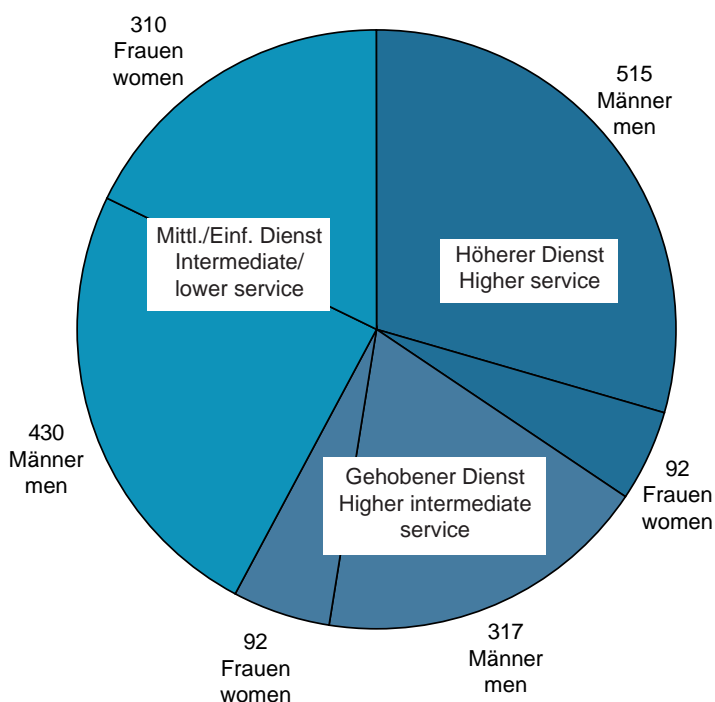
Ausbildung • Training (31. Dezember 2010)

	BS	Berlin	
Duales Studium Elektrotechnik im Praxisverbund	4 (4)	--	Dual studies in electrical engineering in a practice union
IT-Systemelektroniker	18 (5)	--	information and telecommunication technologists
Elektroniker/in für Geräte und Systeme	29 (8)	--	electronics technician for devices and systems
Physiklaboranten	21 (6)	--	laboratory technicians, physics
Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik	12 (3)	--	electronics engineer for electrical and building services engineering
Feinwerkmechaniker Fachrichtung Feinmechanik	16 (4)	6 (2)	precision instrument maker speciality: precision mechanics
Fotografen	2 (1)	--	photographers
Mediengestalter	2 (1)	--	media designer
Tischler	--	4 (2)	joiners
Systeminformatiker	--	12 (4)	IT systems technicians
Fachangestellte für Büro-kommunikation	--	5 (0)	specialists in office communications
Verwaltungsfachangestellte	--	3 (3)	public administration employee
gesamt	104 (32)	30 (11)	total

Die PTB gehört zu den größten Ausbildungsbetrieben in der Region. Gegenwärtig sind 134 Auszubildende bei der PTB angestellt. In Klammern sind die Neueinstellungen im Berichtsjahr angegeben.

The PTB is among the most important institutions of the region which provide training. 134 trainees are at present employed by PTB. The figures in parentheses indicate fresh engagements in the year under review.

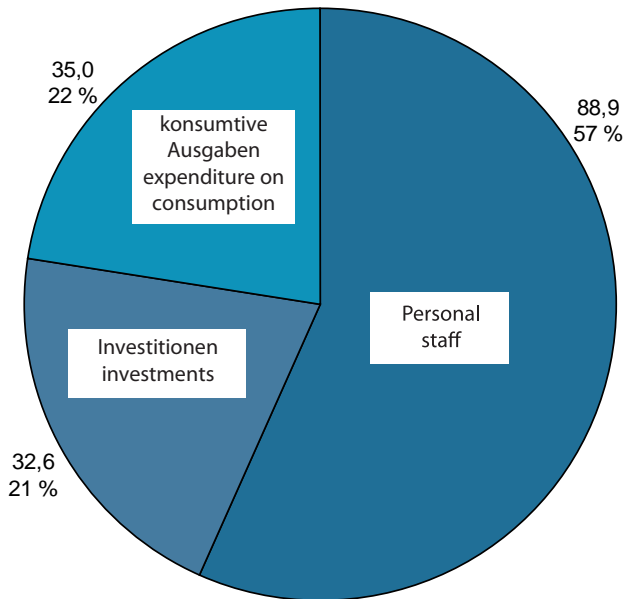
Personal: Laufbahn Staff • civil service career



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

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

Haushalt: Ausgabenverteilung • Budget: break-down of expenditure



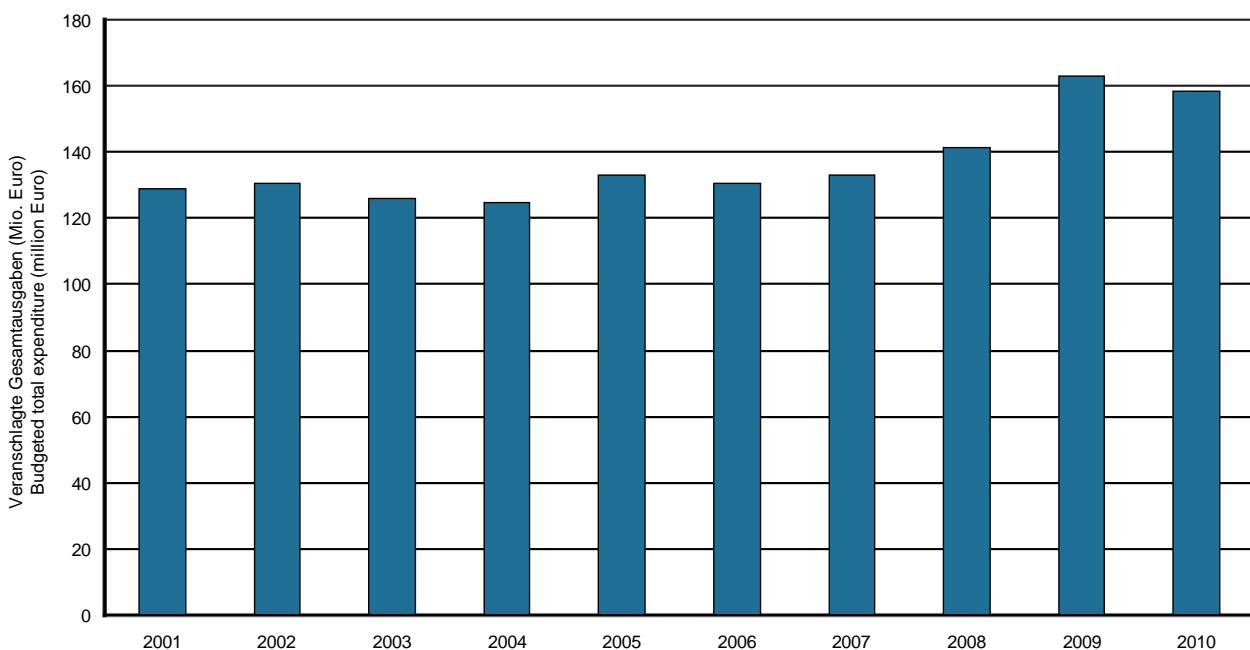
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. Euro). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

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

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

Haushaltsmittel	2008	2009	2010	budgetary means
Personalausgaben	78,8	85,8	88,9	staff costs
Investitionen (Bau und Geräte)	28,0	37,0	32,6	investments (building activities and instruments)
Zuweisungen und Zuschüsse	0,4	0,6	1,8	allocations and grants
konsumtive Ausgaben	34,0	39,9	35,0	expenditure on consumption
gesamt	141,2	163,0	158,3	total

Haushalt: Entwicklung • Budget: development



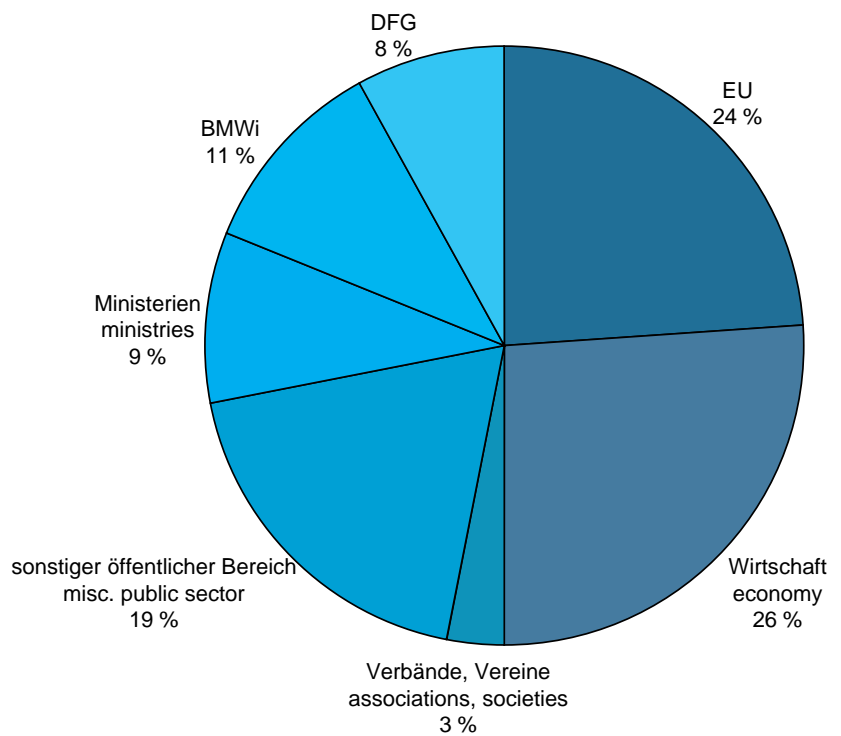
Entwicklung der Gesamtausgaben im PTB-Haushalt in den letzten zehn Jahren.
Development of the total expenditure of the PTB budget in the past ten years.



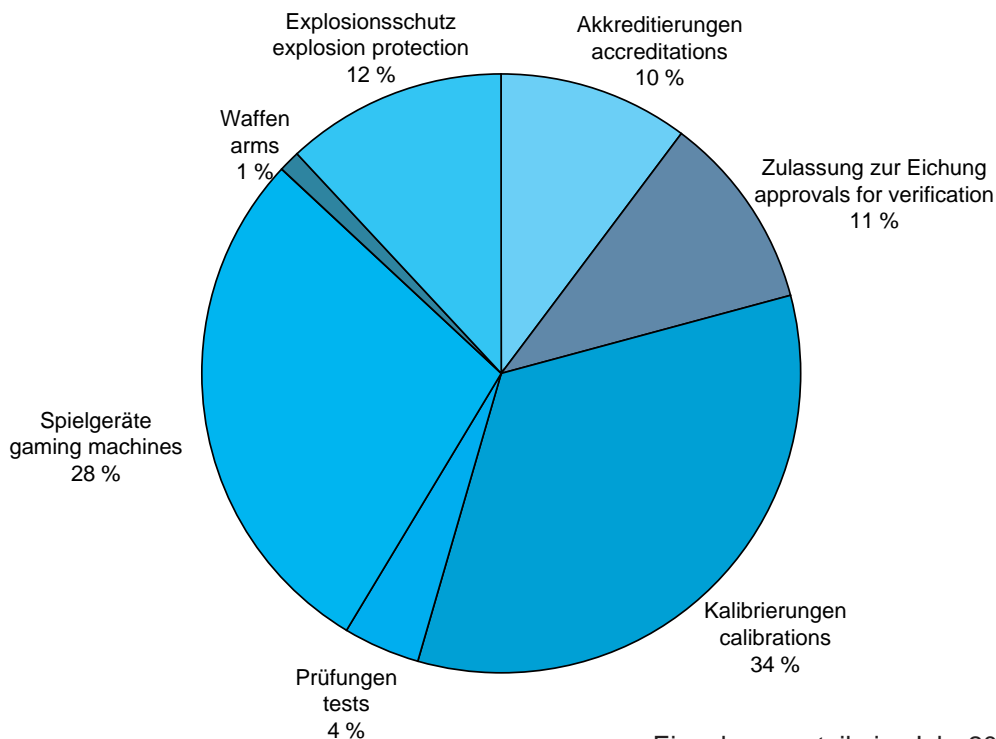
Drittmittel: Forschungsprojekte • Third party funds: research projects

Die Drittmittel für Forschungsvorhaben summieren sich 2010 auf 11,4 Mio. Euro. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Insgesamt wurden im Berichtsjahr 19,1 Mio. Euro für 474 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) verwendet (davon 3,3 Mio. Euro für 95 Projekte in Berlin).

Budgeted total expenditure (million Euro) In 2010, the third-party funds for research projects added up to a total of 11,4 million Euro. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources. In the year under review, a total of 19,1 million Euro were used for 474 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 3,3 million Euro of these for 95 projects in Berlin.



Einnahmenanteile der Dienstleistungsbereiche • Income shares of the service centers



Einnahmenanteile im Jahr 2010 der verschiedenen Dienstleistungsbereiche der PTB. Gesamtforderungen: 12,15 Millionen Euro.

Income distribution of 2010 among the various service sectors of PTB. Total receivables: 12.15 million euro.



Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures

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

... in Braunschweig		2008	2009	2010	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	25 597	27 851	26 700	electrical energy
Wärme	MWh	23 681	21 840	24 100	heat
Gas	m ³	30 763	31 705	31 300	gas
Wasser	m ³	88 210	82 100	78 900	water
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	64	58	54	refuse-like
recycelt	t	379	356	273	recycled
zur Beseitigung	t	32	16	190	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	91 409	80 443	104 600	waste disposal costs (approx.)

... in Berlin		2008	2009	2010	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	7050	7028	8050	electrical energy
Gas	m ³	47 200	48 200	21 400	gas
Wasser	m ³	32 800	25 800	32 400	water
Helium, flüssig	l	53 280	63 240	48 600	helium, liquid
Stickstoff, flüssig	l	80 838	66 149	48 950	nitrogen, liquid
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	65	78	58	refuse-like
recycelt	t	32	54	31	recycled
zur Beseitigung	t	4	5	3	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	9500	21 500	13 900	waste disposal costs (approx.)



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

254. PTB-Seminar (19. Mai 2010)
Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren
im Nieder- und Hochfrequenzbereich 2010

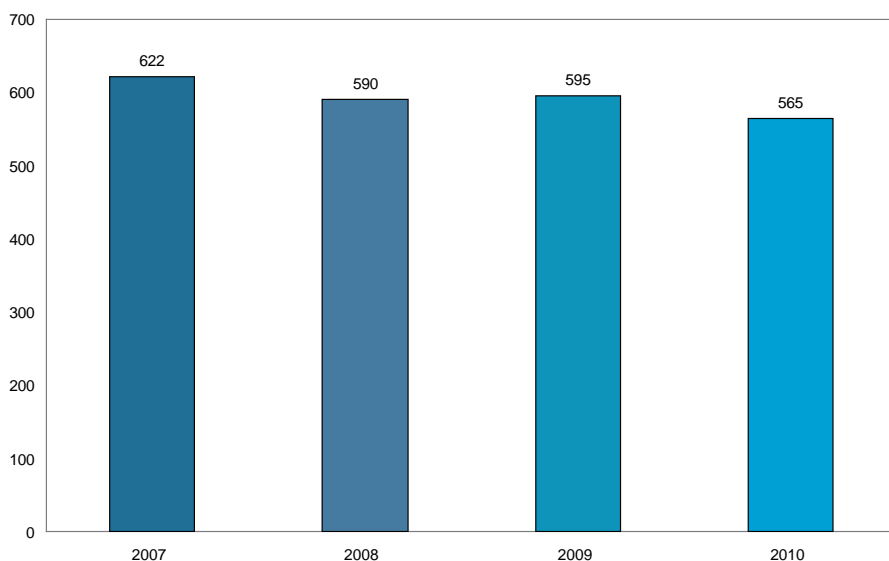
257. PTB-Seminar (27.-28. September 2010)
3D micro- and nanometrology: Requirements
and current developments

255. PTB-Seminar (21. - 22. Juni 2010)
Emerging Topics in Mathematics for Metrology

258. PTB-Seminar (3. Dezember 2010)
Desertec – Herausforderung für Metrologie
und technische Zusammenarbeit

256. PTB-Seminar (9. Juni 2010)
Verzahnungsmesstechnik

259. PTB-Seminar (22.-26. November 2010)
Photometrie-Seminar



Veröffentlichungen • Publications

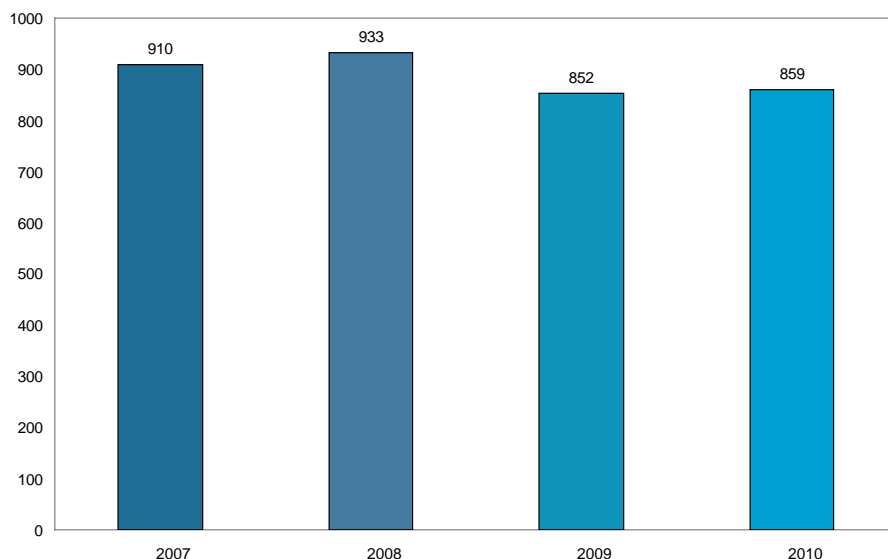
Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 2007 bis 2010 (vgl. Datenbank „PTB-Publica“ im Internet)

Number of publications by PTB staff members (in scientific journals, books, conference digests, etc.) between 2007 and 2010 (cf. database “PTB-Publica” on the web)

Vorträge • Lectures

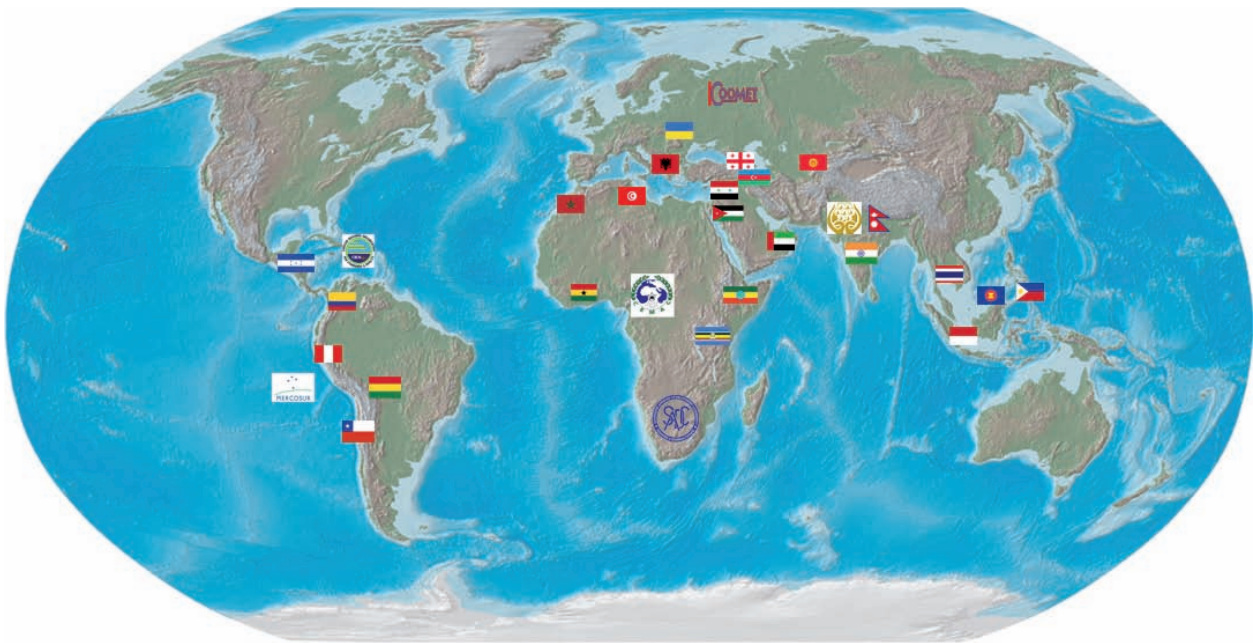
Anzahl der auswärtigen Vorträge, die PTB-Mitarbeiter/innen in den Jahren 2007 bis 2010 gehalten haben

Number of lectures held by PTB staff members outside PTB between 2007 and 2010



Projektpartner der PTB

PTB's project partners



Internationale Zusammenarbeit

Der Fachbereich *Technische Zusammenarbeit* der PTB arbeitet in fast 50 Projekten. Direkt oder indirekt werden mehr als 80 Entwicklungs- und Schwellenländer erreicht. Die Projektarbeit umfasst alle Elemente der Qualitätsinfrastruktur. Der Schwerpunkt liegt auf der Systemberatung und der fachlich-technischen Beratung. Die Finanzierung erfolgt zum größten Teil durch das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ). Im Jahr 2010 wurden 19 Länder in vier Kontinenten durch 25 bilaterale Projekte beim Aufbau ihrer Qualitätsinfrastruktur unterstützt. 24 Projekte verfolgen einen regionalen oder sektoralen Ansatz. Der Projektmittelabfluss im Jahr 2010 betrug 7,4 Mio. Euro. Fast 2100 Teilnehmer aus 76 Ländern konnten an 120 speziellen Fortbildungsseminaren in Fachinstituten in Deutschland und anderen Ländern durch Projektförderungen teilnehmen. Es wurden 180 Stipendiaten aus 57 Ländern insgesamt fast 90 Monate in der PTB, in den Eichbehörden der Bundesländer, der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), in Firmen und Universitäten, in Laboratorien der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) und in metrologischen Staatsinstituten fortgebildet.

International Cooperation

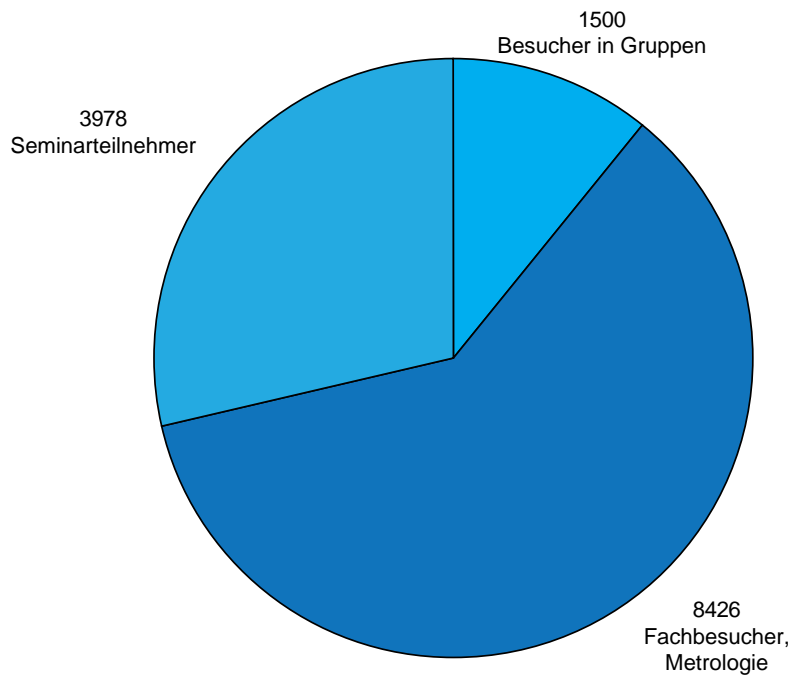
The Department Technical Cooperation of PTB is working on almost 50 projects. Directly or indirectly, more than 80 developing and newly industrialized countries are reached. The project work encompasses all elements of the quality infrastructure. The main focus is on system consulting and specialist-technical consulting. Financing is effected for the most part by the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development. In 2010, 19 countries on four continents were supported in the setting up of their quality infrastructures by 25 bilateral projects. 24 projects follow a regional or sectoral approach. The project funds outflow in 2010 amounted to EUR 7,4 million. Almost 2100 participants from 76 countries were able to participate in 120 special advanced training seminars in technical institutes in Germany and other countries through project funding. 180 scholarship holders from 57 countries were trained for almost 90 months at PTB, in the verification authorities of the federal states, the Federal Institute for Materials Research and Testing, in companies and universities, in laboratories of the Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) and in state metrological institutes.



Gastwissenschaftler, Gäste und Besucher

Im letzten Jahr kamen 14 740 Besucher aus aller Welt in die PTB (Standort Braunschweig). Den größten Anteil bildeten die metrologischen Fachbesucher aus Wissenschaft und Wirtschaft (8426) sowie die Teilnehmer an unterschiedlichsten Seminaren, Tagungen und Kolloquien (3978). Auch der allgemeine Besucherdienst der PTB im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit fand wie gewohnt regen Zuspruch. Rund 1500 Besucher (in 62 Gruppen) schauten den Wissenschaftlern in Braunschweig über die Schultern. Hinzu kamen 32 Grundschulklassen (insgesamt über 800 Schüler), die im Wissensforscher-Labor der PTB physikalische Experimente selbst durchführten.

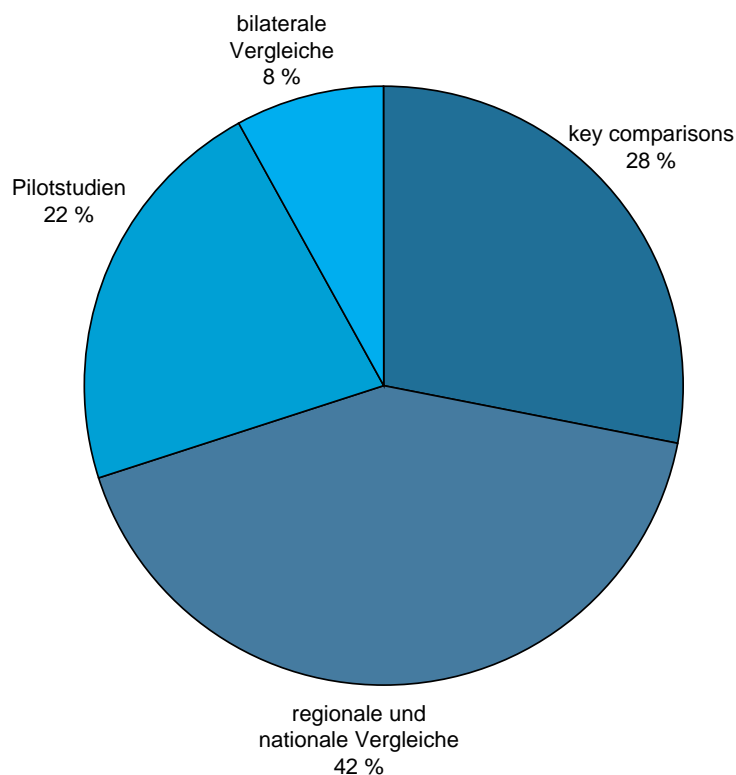
Last year 14 740 visitors from all over the world came to PTB (Braunschweig). Metrological specialists from the fields of science and the economy made up the largest proportion (8426) as well as participants at various seminars, conferences and colloquia (3978). Visits to PTB by the general public, within the scope of public relations work, were also very popular as usual. Around 1500 visitors (in 62 groups) watched the scientists in Braunschweig at work. In addition, 32 primary school classes (in total over 800 school children) came to PTB, to carry out physics experiments themselves in PTB's Wissensforscher-Labor (KnowledgeSearchers Lab).



visitors from all over the world came to PTB (Braunschweig). Metrological specialists from the fields of science and the economy made up the largest proportion (8426) as well as participants at various seminars, conferences and colloquia (3978). Visits to PTB by the general public, within the scope of public relations work, were also very popular as usual. Around 1500 visitors (in 62 groups) watched the scientists in Braunschweig at work. In addition, 32 primary school classes (in total over 800 school children) came to PTB, to carry out physics experiments themselves in PTB's Wissensforscher-Labor (KnowledgeSearchers Lab).

Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements

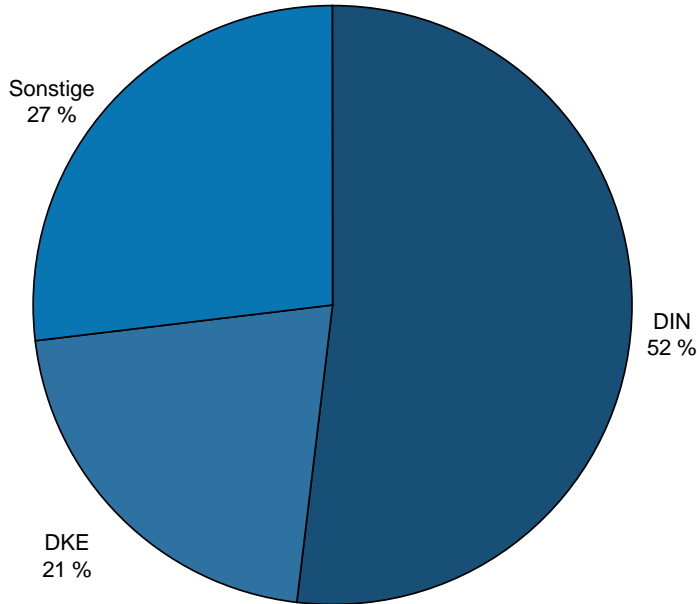
Die PTB nahm im Berichtsjahr an 64 Vergleichsmessungen teil und zwar an 18 Schlüsselvergleichen, 27 regionalen/nationalen Vergleichen, 14 Pilotstudien und 5 bilateralen Vergleichen. 31 % der Vergleichsmessungen waren von direkter Relevanz für die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB im Rahmen des CIPM-MRA. An 19 Vergleichsmessungen nahm die PTB als Pilotlabor teil.



In the year under report, PTB took part in 64 comparable measurements, namely 18 key comparisons, 27 regional/national comparisons, 14 pilot studies and 5 bilateral comparisons. 31 % 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 19 comparable measurements as a pilot lab.

Nationale Normungsvorhaben • National standardization projects

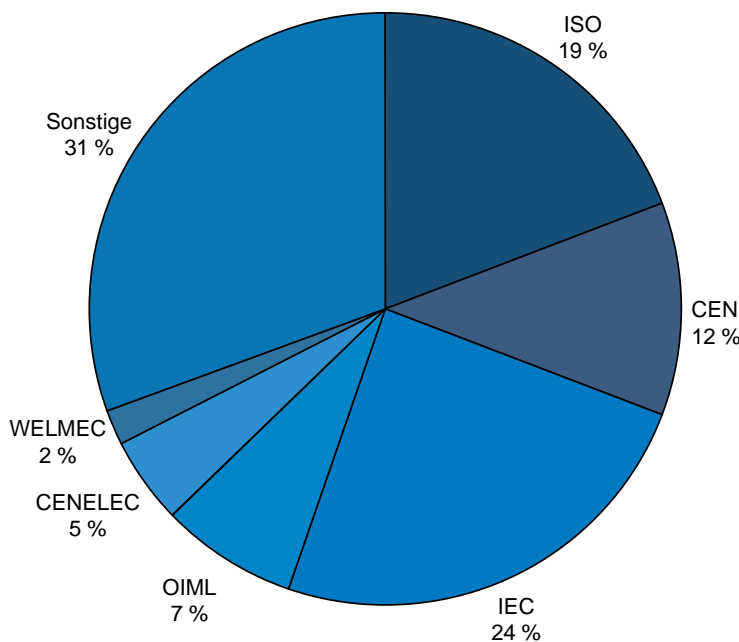
Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei nationalen Normungsvorhaben. Innerhalb des Deutschen Instituts für Normung e. V. (DIN) war die PTB an 155 Normenvorhaben beteiligt, bei der Deutschen Elektrotechnischen Kommission (DKE) bei 63 Vorhaben.



Break-up of the PTB's committee work for national standardization projects (in percent). PTB cooperated in 155 projects of the Deutsches Institut für Normung (DIN) and in 63 projects of the Deutsche Elektrotechnische Kommission (DKE).

Internationale Normungsvorhaben • International standardization projects

Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei internationalen Normungsvorhaben. (289 Vorhaben im letzten Jahr) ISO: Internationale Organisation für Standardisierung; CEN: Europäisches Komitee für Normung; IEC: Internationale Elektrotechnische Kommission; OIML: Internationale Organisation für das gesetzliche Messwesen; CENELEC: Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung; WELMEC: European Cooperation in Legal Metrology.

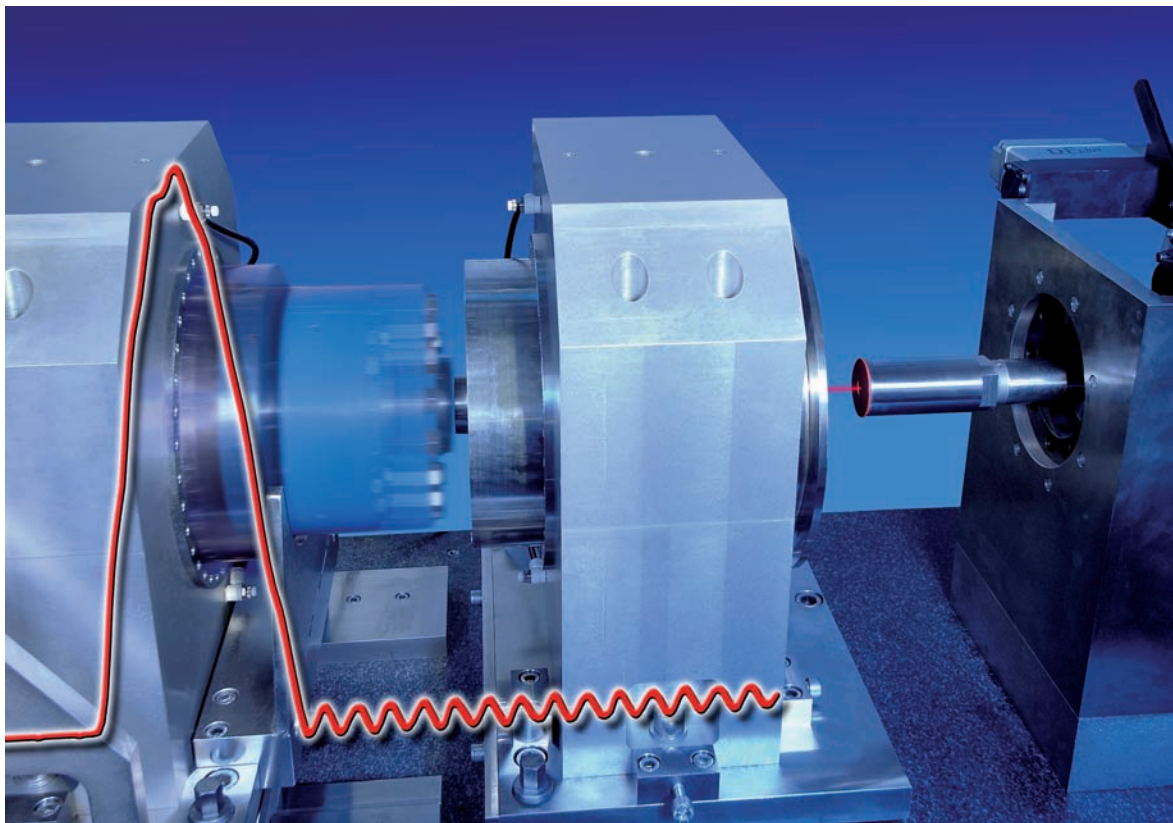


Distribution (in percent) of PTB's committee work on international standardization projects. (289 projects in the last year) ISO: International Organization for Standardization; CEN: European Committee for Standardization; IEC: International Electrotechnical Commission; OIML: International Organization of Legal Metrology; CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization; WELMEC: European Cooperation in Legal Metrology.



Mechanik und Akustik

Berichte der Abteilungen



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

Nach einer abteilungsinternen Umstrukturierung zum 1. April 2010 lassen sich die Arbeiten der Abteilung 1 *Mechanik und Akustik* drei Themenbereichen wie folgt zuordnen: *Masse und abgeleitete Größen* (Fachbereiche 1.1, 1.2, 1.3, 1.7), *Durchfluss* (Fachbereiche 1.4, 1.5) sowie *Akustik, Ultraschall, Beschleunigung* (Fachbereiche 1.3, 1.6, 1.7). Nachfolgend werden einige wichtige Arbeiten und Schwerpunkte sowie aktuelle Entwicklungen auf diesen Gebieten vorgestellt.

Masse und abgeleitete Größen

Im Themenbereich *Masse und abgeleitete Größen* wird in den Fachbereichen 1.1 *Masse*, 1.2 *Festkörpermechanik*, 1.3 *Geschwindigkeit* sowie 1.7 *Akustik und Dynamik* – basierend auf dem Einheiten-, Eich- und Beschussgesetz sowie der Einheitenverordnung und der Eichordnung – an der Darstellung und Weitergabe der mechanischen Einheiten für Masse, Kraft (statisch und dynamisch), Drehmoment (statisch und dynamisch) sowie dynamische Druckmessung gearbeitet.

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

Titelbild:

Neue Einrichtung des Fachbereichs Akustik und Dynamik zur Stoß-Kalibrierung von Kraftaufnehmern mit Spitzenkräften bis zu 250 kN

1-kg-Siliziumkugeln werden im Rahmen eines internationalen Projektes zur experimentellen Bestimmung der Avogadro-Konstanten und als Primärnormale der Festkörperdichte eingesetzt. Aufgrund ihrer im Vergleich zu Kilogrammprototypen und Stahlnormalen deutlich geringeren Dichte sind zur Vermeidung von Luftauftriebskorrekturen Massebestimmungen im Vakuum ($< 0,1$ Pa) erforderlich, die bislang allerdings durch einen relativ großen Unsicherheitsbeitrag der Sorptionskorrektur beeinträchtigt waren. Hier hat der Einsatz neuer Sorptionskörper aus einer Platin-Iridium-Legierung (PtIr 10) eine entscheidende Verbesserung gebracht (Bild 1). Mit den vom *Wissenschaftlichen Gerätebau* in Zusammenarbeit mit dem BIPM (Sèvres) gefertigten Spezialkörpern konnte in der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* die Sorptionskorrektur von bisher etwa $7 \mu\text{g}$ auf $1 \mu\text{g}$ reduziert werden. Die Sorptionskörper dienen hierbei als TransfERNormale für den Wechsel zwischen Luft und Vakuum.

Die Referenzmasse für den Masseanschluss der Sorptionskörper und die Massebestimmung der ^{28}Si -Kugel AVO28-S8 in Luft bildete der Kilogrammprototyp Nr. 70 (Bild 1). Zusätzlich wurden Luftauftriebskörper zur Bestimmung der Luftdichte während der Vergleichsmessungen in Luft verwendet. Den aus vier Luft- und zwei Vakuum-Zyklen bestehenden Messverlauf zeigt Bild 2.

Dargestellt sind die aus mindestens drei Wägeserien zu je sechs Wägezyklen berechneten Mittelwerte. Die Standardunsicherheit ($k = 1$) der Massebestimmung in Luft beträgt $u = 12 \mu\text{g}$, wobei die größten Beiträge zur Gesamtunsicherheit aus der Luftdichtebestimmung ($9 \mu\text{g}$) und der Masse des Kilogrammprototyps ($6 \mu\text{g}$) resultieren. Für die Massebestimmung unter Vakuumbedingungen konnte erstmals eine Standardmessunsicherheit von $6,5 \mu\text{g}$ erreicht werden, die sich im Wesentlichen aus der Unsicherheit des Kilogrammprototyps ($6 \mu\text{g}$) und der Sorptionskorrektur ($1 \mu\text{g}$) zusammensetzt. Die Massedifferenz zwischen der ersten und der zweiten Vakuummessung betrug weniger als $1 \mu\text{g}$, die Massedifferenz zwischen der ersten und letzten Messung in Luft weniger als $2 \mu\text{g}$. Insgesamt liegen die in Luft und Vakuum bestimmten Massedifferenzen unter $2,5 \mu\text{g}$. Diese ungewöhnlich kleinen Sorptionseffekte sprechen für eine hohe Oberflächenqualität der ^{28}Si -Kugel AVO28-S8.

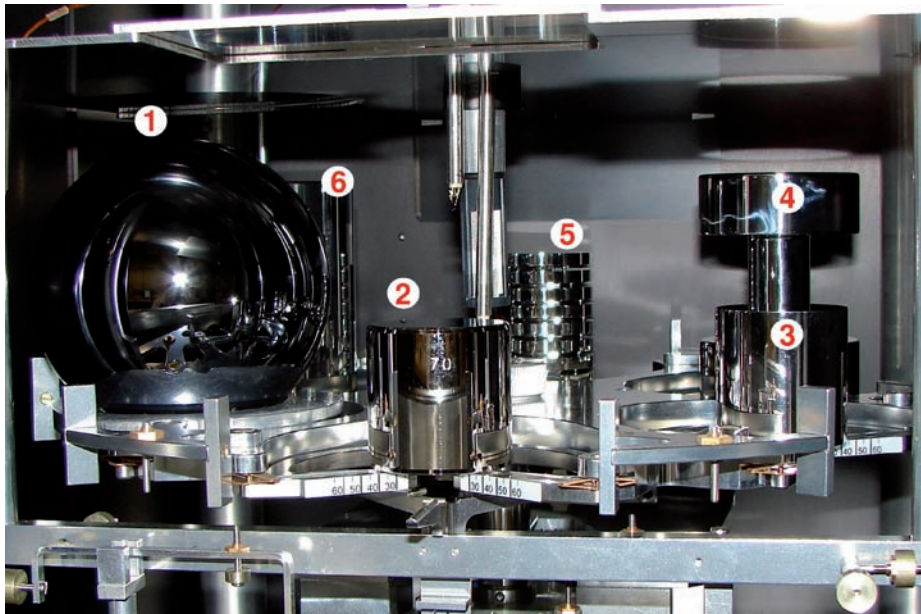


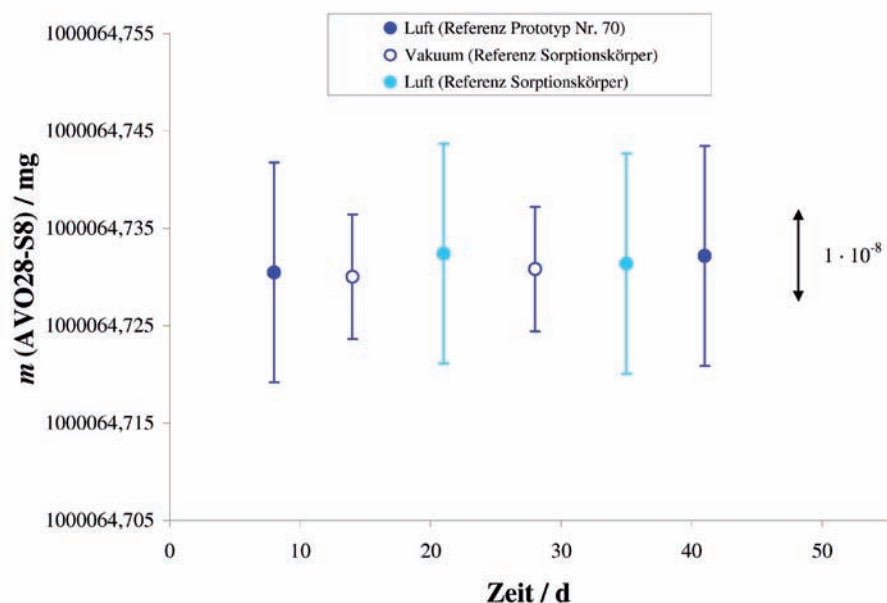
Bild 1: Blick in den Wägeraum des 1-kg-Komparators zur Massebestimmung der ²⁸Si-Kugel AVO28-S8 (1) mit Kilogrammprototyp Nr. 70 (2), Platin-Iridium-Sorptionskörpern (3, 5) und Luftauftriebskörpern (4, 6)

Im gesetzlichen und industriellen Messwesen werden herkömmliche Gewichtstücke und Massennormale bislang bis zu einem kleinsten Nennwert von einem Milligramm verwendet. Mit dem zunehmenden Einsatz von hochauflösenden Massekomparatoren ist auch ein wachsendes Interesse an Massennormalen mit Nennwerten kleiner 1 mg zu verzeichnen. Diese Massennormale werden überwiegend für die Linearitätsprüfung von hochauflösenden Komparatorwaagen und für Sonderkalibrierungen eingesetzt. Im vergangenen Jahr wurde erstmals ein EURAMET-Vergleich für Massennormale mit Nennwerten von 500 µg, 200 µg und 100 µg durchgeführt. An der Vergleichsmessung nahmen folgende nationale Metrologieinstitute teil: LCM (FR), NPL (UK, Pilotlabor), PTB (DE). Die Massen der Transfernormale

konnten in der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* mit Standardmessunsicherheiten ($k = 1$) von 0,14 µg (100 µg, 200 µg) und 0,15 µg (500 µg) bestimmt werden. Die Ergebnisse der PTB stimmen innerhalb eines Vertrauensbereiches von 95 % mit den Referenzwerten (gewichtete Mittelwerte) überein.

Im September 2009 wurde die PTB in den Kreis der „Issuing Participants“ im Rahmen des OIML Mutual Acceptance Arrangements (MAA) aufgenommen. Die Arbeitsgruppe *Waagen* konnte daraufhin im Jahr 2010 in enger Zusammenarbeit mit der *Zertifizierungsstelle der PTB* ihr erstes OIML-MAA-Zertifikat für eine Wägezellenbauart nach R 60 ausstellen. Voraussetzung für die Teilnahme am OIML MAA sind entweder die Akkreditierung des Prüfla-

Bild 2: Massebestimmung der ²⁸Si-Kugel AVO28-S8: Messergebnisse in Luft und Vakuum; angegebene Unsicherheitsbereiche entsprechen den jeweiligen Standardunsicherheiten; Masseangaben in Luft ohne Korrektur der Sorptionsschichten auf der Kugeloberfläche.



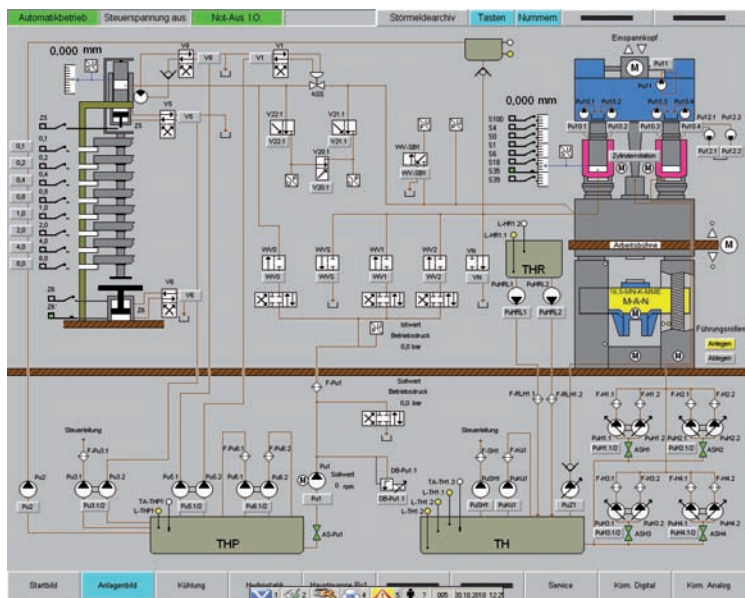


Bild 3: Ansicht der 16,5-MN-Kraft-Normalmess-einrichtung (links) und Visualisierung der neuen SPS-Steuerung (rechts)

bors oder dessen Anerkennung aufgrund von „Peer Assessments“ durch ein internationales Auditteam. In der Arbeitsgruppe *Waagen* wurde in diesem Jahr ein solches zweitägiges „Peer Assessment“ bezüglich der Prüfung von Wägezellen und nichtselbsttätigen Waagen nach den OIML-Empfehlungen R60 und R76 erfolgreich durchgeführt.

Wägezellen sind in den letzten Jahren ständig weiterentwickelt worden. Neue Technologien, neue Materialien und verbesserte Kompensationsmechanismen sowie die Entwicklung digitaler Wägezellen erfordern entsprechend angepasste Prüfverfahren und Prüfvorschriften, wie z. B. die internationale Empfehlung R60 der OIML. An der laufenden Revision dieser OIML-Empfehlung hat die Arbeitsgruppe *Waagen* maßgeblichen Anteil und konnte in enger Abstimmung mit den Eichbehörden und der Waagenindustrie wesentliche Änderungsvorschläge in den neuen Revisionsprozess einbringen.

Voraussetzung für den Einsatz sogenannter Weighing-In-Motion(WIM)-Systeme in Deutschland, mit denen dynamisch überprüft werden kann, ob Lastkraftwagen überladen sind, ist der Nachweis einer hinreichend guten Messsicherheit und Messrichtigkeit. Der Fachbereich *Masse* hat in diesem Jahr damit begonnen, die Fragestellung, ob und in welcher Form eine Zertifizierung von dynamischen Wäge-

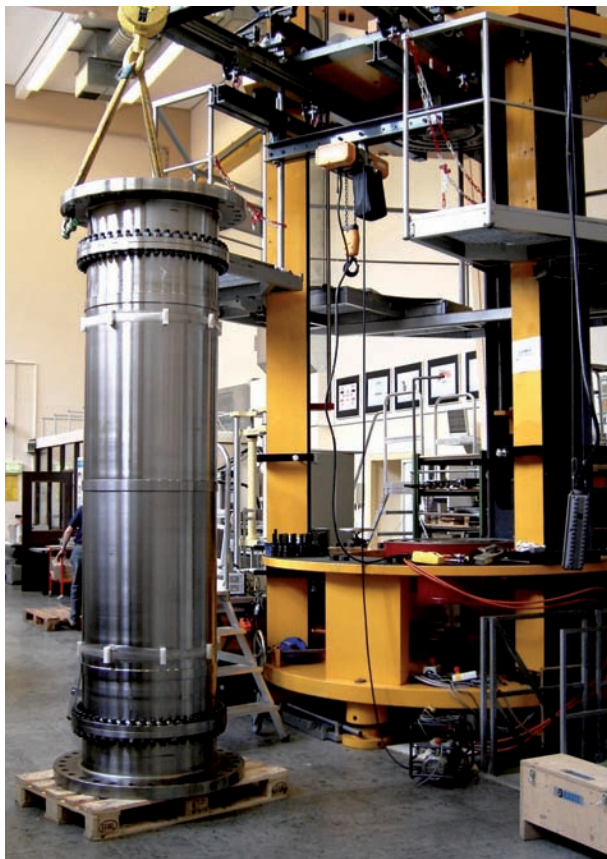
systemen durchgeführt werden kann, in enger Zusammenarbeit mit anderen europäischen Metrologieinstituten aufzugreifen. Nach europäischen Regelungen zertifizierte, dynamische Systeme zur Verwägung insbesondere von Lastkraftwagen im fließenden Verkehr könnten zukünftig einen wichtigen Beitrag für die Verkehrssicherheit in Deutschland und Europa sowie für die mögliche Einführung einer gewichtsabhängigen LKW-Steuer leisten.

Im Fachbereich *Festkörpermechanik* werden mit Kraft-Normalmessenrichtungen (K-NME) Kräfte von 0,5 N bis 16,5 MN realisiert, wobei Kräfte bis 2 MN mit direkter Massewirkung und Kräfte bis 16,5 MN mit hydraulischer Übersetzung erzeugt werden. In der Arbeitsgruppe *Darstellung Kraft* wurde 2010 die Steuerung und Regelung der 16,5-MN-K-NME komplett modernisiert (Bild 3). Hierbei wurde die alte Rechnersteuerung durch eine SPS-Steuerung ersetzt und mehrere hoch auflösende Digitalregler ermöglichen jetzt eine wesentlich genauere Konstanthaltung der Kräfte im Bereich von 100 kN bis 16,5 MN. Nach Abschluss der noch geplanten Automatisierung und der zur Verifizierung der Messunsicherheit (0,01 %) erforderlichen, internen Vergleichsmessungen soll die Anlage ab 2011 wieder für den Kalibrierbetrieb für Zug- und Druckkräfte bis 16,5 MN freigegeben werden.

Auch bei der Messung kleiner Kräfte konnten Fortschritte erzielt werden. Hier wurde eine neue K-NME für den Bereich von 100 μ N bis 200 mN konstruiert und aufgebaut. Die Anlage ist modular aus einem Präzisionshubtisch (Weg 7 mm, Auflösung 2 nm) zur Krafterzeugung

sowie einer elektromagnetisch kompensierten Präzisionswaage (Nennlast 20 g, Standardabweichung $< 3 \mu\text{g}$) zur rückgeführten Kraftmessung aufgebaut. Die Anlage befindet sich derzeit im Testbetrieb und bietet die Möglichkeit, den Messbereich durch Einsatz anderer Präzisionswaagen später auf 10 N zu erweitern.

Auf dem Gebiet der Präzisions-Drehmomentmessung wurden die Untersuchungen im Rahmen des internationalen Vergleiches CCM.T-K2 bis 20 kN · m erfolgreich abgeschlossen. Die Arbeitsgruppe *Darstellung Drehmoment* war dabei Pilotlabor, wie auch schon zuvor bei den Vergleichsmessungen CCM.T-K1 bis 1 kN · m und EURAMET.M.T-S1. Eine Besonderheit bei CCM.T-K1 war die zusätzliche Anbindung des indischen Staatsinstitutes NPL durch einen bilateralen Vergleich mit der PTB. Im Rahmen von EURAMET.M.T-S1 wurde erstmals und erfolgreich ein Vergleich von Referenzmesseinrichtungen durchgeführt, also von Messeinrichtungen, in denen ein kalibrierter Drehmomentaufnehmer als „Träger“ der Einheit des Drehmomentes zum Einsatz kommt. Durch einen zusätzlichen bilateralen Vergleich mit der PTB konnte in diesem Rahmen auch das ägyptische Staatsinstitut NIS angeschlossen werden.



Der zunehmende Bedarf der Industrie an genauen Drehmomentkalibrierungen zeigt sich u. a. an der weltweit größten Drehmoment-Normalmesseinrichtung (D-NME), der 1,1-MN · m-D-NME der PTB. Hier werden zunehmend mehr und zunehmend größere Drehmomentaufnehmer kalibriert, wie zuletzt ein etwa 3 m hoher und knapp 2 t schwerer 700-kN · m-Drehmomentaufnehmer der Firma General Electric (USA), siehe Bild 4.

Eine messtechnische Besonderheit ist dabei ein Winkelmesssystem, mit dem aus der Torsion der Hohlwelle im laufenden Betrieb die Steifigkeit berechnet wird. Im Arbeitszustand ist der Aufnehmer zwischen einer Gasturbine und einem Generator eingebaut, wobei er mit 3600 Umdrehungen pro Minute (Netzfrequenz 60 Hz) rotiert. Die Verformung wird berührungslos gemessen und liefert die Daten zur Berechnung des im Antriebsstrang wirkenden Drehmomentes.

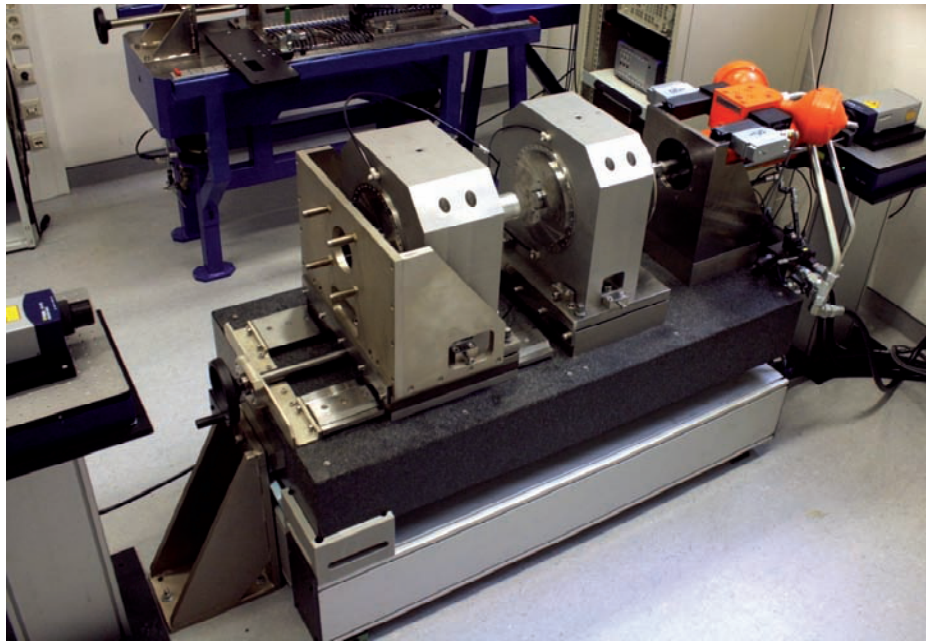
Besonderer Arbeitsschwerpunkt in der Arbeitsgruppe *Periodische Kräfte* ist die messtechnische Rückführung von dynamischen Kräften. Hier konnte das Leistungsangebot der PTB auf sinusförmige Kräfte im Frequenzbereich von 40 Hz bis 2000 Hz erweitert werden, wobei je nach Frequenzbereich relative Messunsicherheiten von 0,5 % bis 2 % erreichbar sind. Die PTB ist damit weltweit das erste nationale Metrologieinstitut, das dynamische Kraftkalibrierungen als Dienstleistung anbietet.

Ziele der Arbeiten der Arbeitsgruppe *Stoßdynamik*, die seit dem 1. April 2010 dem Fachbereich 1.7 *Akustik und Dynamik* zugeordnet ist, sind die Entwicklung von Verfahren für die Kalibrierung von Kraftaufnehmern unter stoßförmiger Belastung sowie die dynamische Kalibrierung von Drehmomentaufnehmern mit zunächst sinusförmiger Anregung. Hier sollen die durch ein mathematisches Modell beschriebenen Sensoren mit den aus den Kalibrierergebnissen bestimmten Modellparametern charakteri-

Bild 4: 3 m hoher und 2 t schwerer 700-kN-m-Drehmomentaufnehmer der Firma General Electric (USA) nach der Kalibrierung in der 1,1-MN-m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung



Bild 5: Neue Einrichtung zur Stoß-Kalibrierung von Kraftaufnehmern mit Spitzenkräften von bis zu 250 kN

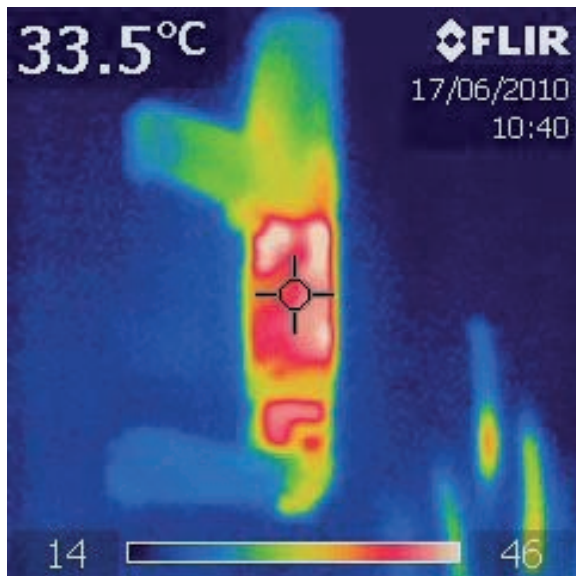


siert werden. Eine besondere Herausforderung stellen dabei die Behandlung der Messunsicherheiten und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Messeinrichtungen dar. Für die Untersuchungen von Spitzenkräften bis zu 250 kN wurde im Berichtsjahr eine neue 250-kN-Stoßkalibriereinrichtung aufgebaut (siehe Bild 5). Weiterhin konnte auch eine neue Kalibriereinrichtung für sogenannte „Impulshämmer“ in Betrieb genommen werden.

Die Arbeitsgruppe *Dynamische Druckmessung* im Fachbereich 1.3 *Geschwindigkeit* ist Pilotlabor des seit dem Jahr 2007 laufenden internationalen Ringvergleichs des „Ständigen Internationalen Komitees für die Prüfung von Handfeuerwaffen“ (C.I.P.), an dem alle 14 Mitgliedsstaaten des C.I.P. teilnehmen. Mit diesem Ringvergleich sollen aktuell erreichbare Messunsicherheiten bei quasistatischen und dynamischen Druckmessungen mit piezoelektrischen Transfernormalen ermittelt werden, mit denen letztlich die Vergleichbarkeit und Rückführbarkeit ballistischer Messungen sichergestellt werden soll. Die aktuelle Auswertung zeigt jedoch, dass mit den verwendeten unterschiedlichen Messaufnehmern sowie unterschiedlichen Messverfahren bisher wenig zufriedenstellende Ergebnisse erzielt wurden. Die aktuell größte Messabweichung beträgt ca. 8 %, wobei ursprünglich etwa 1 % angestrebt worden waren. Das Ergebnis zeigt die Wichtigkeit internationaler Vergleichsmessungen, die jetzt dazu führen müssen, möglichst schnell ein international einheitliches Messverfahren zur dynamischen Druckmessung zu etablieren.

Zum 29. Dezember 2009 trat die novellierte **Maschinenrichtlinie (MaRL) 2006/42/EG** für treibladungsbetriebene Geräte in Deutschland und den übrigen EU-Staaten in Kraft. Das europäisch harmonisierte Recht ersetzt damit bisherige nationale Regelungen bezüglich des Inverkehrbringens von Maschinen mit dem Ziel der Vereinheitlichung des Schutzniveaus zur Unfallverhütung innerhalb des europäischen Wirtschaftsraums. Rechtzeitig vor diesem Stichtag erfolgte die Benennung der PTB als Zertifizierungsstelle nach der MaRL. Hauptaufgabe als Benannte Stelle ist es in diesem Zusammenhang, Konformitätsbewertungen von Beschusseinrichtungen nach MaRL durchzuführen. Dazu gehört neuerdings auch die Prüfung der Erhitzung eines Gerätes unter Dauerbelastung, um unzulässige Gefährdungen des Bedieners durch Überhitzung auszuschließen. Erste Zertifikate wurden von der Arbeitsgruppe *Dynamische Druckmessung* im Berichtsjahr erteilt. Bild 6 zeigt die mit einer Wärmebildkamera aufgenommene Temperaturverteilung in einem Bolzensetzgerät nach erfolgter Dauerbelastung mit 100 Schuss. In diesem Fall wurde der obere Grenzwert von 48 °C nicht überschritten.





Durchfluss

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

Der in der Arbeitsgruppe *Strömungsmesstechnik* neu in Betrieb genommene Windkanal „Göttinger Bauart“ mit Vier-Quadranten-Steuerung des Gebläses und einer Laser-Doppler-Anemometer-Messeinrichtung als Bezugsnormal wurde dem sehr interessierten Kuratorium der PTB auf ihrer diesjährigen Tagung vorgestellt (Bild 7).

Beim Kooperationspartner WindGuard wurde in deren neuem Großwindkanal *Varel2* ein LDA-System der PTB als Bezugsnormal fest in-

Bild 6: Aufnahme der Temperaturverteilung eines Bolzensetzgerätes nach erfolgter Dauerbelastung mit 100 Schuss

stalliert und damit im Rahmen verschiedener Messkampagnen und Vergleichsmessungen die ebenfalls fest eingebauten, betriebseigenen Messsonden erfolgreich an das nationale Normal für die Darstellung der Einheit Strömungsgeschwindigkeit angeschlossen. Damit kann *Varel2* jetzt als „Referenzwindkanal“ sowohl für gemeinsame F&E-Aktivitäten der Kooperationspartner als auch für internationale Vergleichsmessungen von der PTB genutzt werden.

Das Primärnormal zur Kalibrierung von LDA-Systemen – eine rotierende Präzisionsscheibe – wurde im Berichtszeitraum einer weitergehenden Unsicherheitsanalyse unterzogen. Die verschiedenen Unsicherheitsbeiträge liefernden Quellen mit ihren sowohl statischen als auch dynamischen Eigenschaften wurden neu untersucht und dokumentiert. Die Scheibengeschwindigkeit des Primärnormals kann jetzt mit einer erweiterten Unsicherheit von $1 \cdot 10^{-4}$ bestimmt werden.

Auf der diesjährigen Sitzung des TC „Flow“ wurden die Ergebnisse des EURAMET-Projektes 827 „Laser based Intercomparison of Anemometers“ präsentiert. Der Ansatz und die Ergebnisse dieses Projektes haben deutlich unterstrichen, dass in Windkanälen für die Darstellung der Einheit Strömungsgeschwindigkeit und für die Durchführung von Vergleichsmessungen rückwirkungsarme, noch besser rück-

Bild 7: Die Vorstellung des neu in Betrieb genommenen Windkanals „Göttinger Bauart“ fand bei der Besichtigung des Kuratoriums großes Interesse.



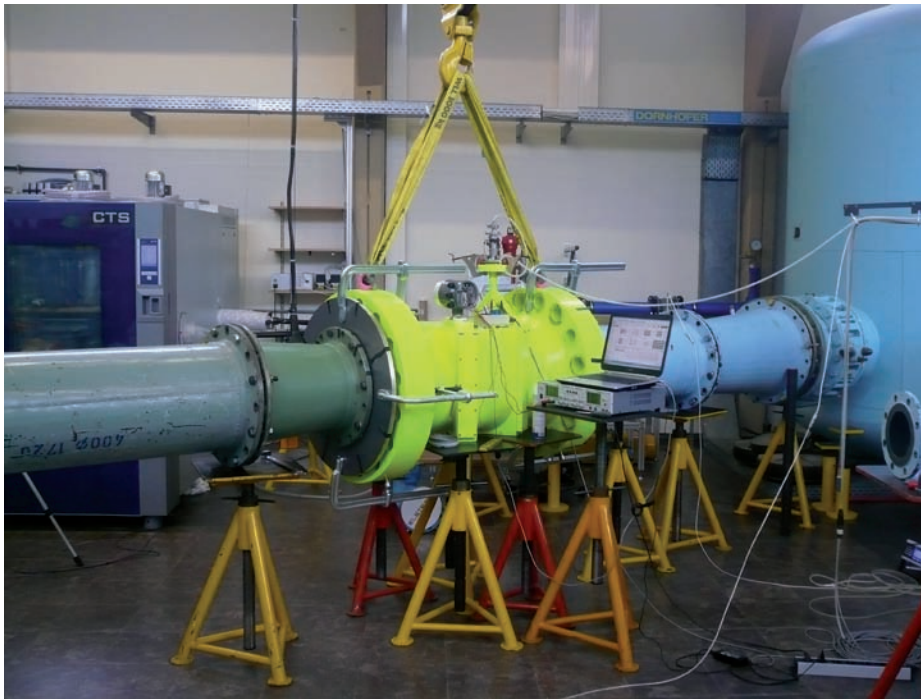


Bild 8: In Zusammenarbeit mit dem Hochdruck-Gasprüfstand *pigsar*TM wurden 16 Ultraschall-Gaszähler für die *Nord Stream*-Pipeline kalibriert

wirkungsfreie laseroptische Messverfahren anzuwenden sind, um eine Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse sicherzustellen. Aufgrund der auftretenden Anemometer-Rückwirkungen können in der Strömung platzierte Geschwindigkeitssensoren zu erheblichen Messwertverfälschungen führen.

In der Arbeitsgruppe *Gasmessgeräte* wurden die Kalibriermöglichkeiten mit technischen Gasen weiter ausgebaut. Erste Versuche zur dynamischen Herstellung von Gasgemischen wurden erfolgreich durchgeführt. Hierzu wurde ein patentiertes Verfahren, bestehend aus einer Reihenschaltung von Düsen, angewendet. Weiterhin konnte nach über 40 Jahren Einsatz die alte Gasmessglocke, das Primärnormal für den Durchfluss von Gasen im Niederdruckbereich, durch eine neue Gasmessglocke ersetzt werden. Durch eine verbesserte Zustandserfassung und ein neues Verfahren zur geometrischen Vermessung des Messvolumens ist mit einer deutlichen Verbesserung der Messunsicherheit bei der Primärrealisierung zu rechnen.

Unter dem Vorsitz der PTB wurden von der WELMEC-Arbeitsgruppe 11 *Utility Meters* im Berichtsjahr mehrere Empfehlungen zur Auslegung der Messgeräterichtlinie erarbeitet und ein Anforderungskatalog (Guide) für die zeitabhängige Erfassung von Verbrauchsdaten (Lastgangmessung, Belastungsregistrierung) fertiggestellt und veröffentlicht. Diese Arbeiten haben erheblichen Einfluss auf die einheitliche Konformitätsbewertung von Zählern zur Ver-

brauchsmengenmessung in Europa. Weitere Schwerpunkte bestanden in der Erarbeitung von Vorschlägen zur Überarbeitung und Ergänzung der MID einschließlich der Formulierung von Anforderungen an die Tarifierung. Die Vorschläge wurden zur öffentlichen Konsultation durch die Europäische Kommission ins Internet gestellt.

Die Ostsee-Pipeline *Nord Stream* befindet sich im Bau und soll zukünftig jährlich etwa 55 Milliarden Kubikmeter Gas von Russland direkt nach Deutschland/Europa befördern. Zur messtechnischen Erfassung der transportierten Gasmengen befinden sich an den Ein- und Auspeisepunkten bei Wyborg bzw. Lubmin jeweils parallele Messstrecken mit jeweils 2 Ultraschall-Gaszählern in Reihe. In Zusammenarbeit mit dem Hochdruckprüfstand *pigsar*TM wurden von der Arbeitsgruppe *Hochdruck-Gas* insgesamt 16 der dort eingesetzten Ultraschall-Gaszähler kalibriert (Bild 8).

Im Fachbereich *Flüssigkeiten* standen auch im Berichtsjahr wieder die Sicherung und Verbesserung der Messunsicherheiten der Primärnormale zur Mengen- und Durchflussmessung strömender Flüssigkeiten im Vordergrund. Hervorzuheben sind insbesondere die Aktivitäten hinsichtlich der Zeitfehleranalyse an der Umlenkeinrichtung des Hydrodynamischen Prüffeldes (HDP). Umfangreiche Messreihen und eine detaillierte Modellierung des Umlenkprozesses ermöglichten letztendlich eine entscheidende quantitative Verbesserung der



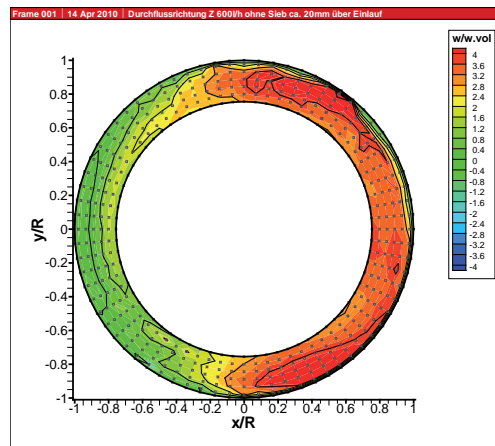
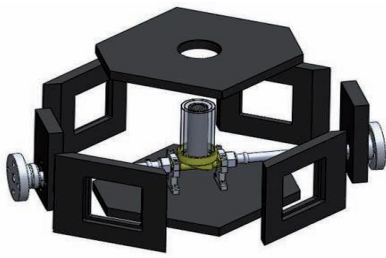


Bild 9: Darstellung der konstruktiven Lösung der neuen Fensterkammer (links) und einer gemessenen Geschwindigkeitsverteilung im Ringspalt eines Messkapsel-Wasserzählers, wo die Flüssigkeit das Gehäuse (gelb) verlässt und in die Messkapsel (durch Glaszylinder simuliert) eintritt

Messunsicherheit der Durchflussmessung auf dem HDP. Der Zeitfehler der Umschalteneinrichtung konnte von 20 ms auf 6 ms verkleinert werden, die dabei gleichzeitig erreichte Verringerung der Unsicherheit dieses Zeitfehlers führte zu einer Reduzierung der erweiterten Messunsicherheit des mit dem HDP realisierbaren Durchflusses von 0,019 % auf nunmehr 0,012 %.

In gleicher Weise stand auch bei den Erweiterungs- und Erneuerungsarbeiten am Mineralölzähler-Prüfstand die Problematik der Strömungsumlenkung im Vordergrund. Da hier als Prüfmedium Testbenzin verwendet wird, ist eine geschlossene Rohrleitungsführung notwendig. Die Strömungsumlenkung zwischen Bypass-Leitung und Messbehälter wird im vorliegenden Fall durch zwei speziell miteinander verschaltete Kugelhähne realisiert. Zur Sicherstellung der Rückwirkungsfreiheit einer solchen Ventilkopplung während der Umlenkung des Fluidstroms wurde ein Patent angemeldet.

Einen weiteren Schwerpunkt der Aktivitäten des Fachbereichs *Flüssigkeiten* stellten Forschungsk Kooperationen mit der Industrie dar. Hier sind insbesondere zwei Forschungsvereinbarungen mit der deutschen Wasserzählerindustrie zu nennen. So wurden zum Beispiel umfangreiche experimentelle Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Großwasserzählern durchgeführt. Hier ging es um die Messung und Charakterisierung des sogenannten

Nachlaufverhaltens mechanischer Wasserzähler bei kurzen Entnahmezeiten von wenigen Sekunden und sehr kleinen Entnahmemengen deutlich unter einem Liter. Im Ergebnis wurde ein spezieller Test entwickelt, der es ermöglicht, vergleichbare und damit in der Praxis verwertbare Messergebnisse für unterschiedliche Zählertypen zu erhalten. Dies ermöglicht einerseits dem Hersteller, die entsprechenden Parameter seines Produktes benennen zu können, andererseits dem Verwender, das geeignete Messgerät für den jeweiligen Einsatzzweck auszuwählen.

Ein zweites Vorhaben widmete sich der Problematik der Messkapsel-Wasserzähler und hier speziell der Untersuchung der Strömungsverhältnisse im Inneren eines solchen Zählers an der Schnittstelle zwischen Gehäuse und Messkapsel. Hierfür wurde die im Fachbereich bereits erfolgreich auf dem Gebiet der Strömungsdiagnostik eingesetzte Laser-Doppler-Messtechnik in Kombination mit einer speziell für diesen Anwendungsfall entwickelten Fensterkammer verwendet (siehe Bild 9).

Damit ist es erstmals gelungen, die Strömung innerhalb eines Wasserzählers zu verfolgen und sichtbar zu machen. Umfangreiche Untersuchungen der Reaktion dieser Strömung beispielsweise auf Störungen wie Drall oder Asymmetrien in der Zuströmung, auf Verschmutzungen und unterschiedliche konstruktive Merkmale des Gehäuses ermöglichen es nunmehr, entsprechende Anforderungen an Messkapselzähler zu formulieren, um deren Messrichtigkeit und Zuverlässigkeit im praktischen Einsatz sicherstellen zu können.

Akustik, Ultraschall und Beschleunigung

Im Themenbereich *Akustik, Ultraschall* und *Beschleunigung* werden von den Fachbereichen 1.6 *Schall*, 1.7 *Akustik und Dynamik* sowie 1.3 *Geschwindigkeit* metrologische Fragestellungen bearbeitet, die die Darstellung und Weitergabe akustischer bzw. dynamischer mechanischer Einheiten zum Inhalt haben. Ausgehend von Forderungen des Einheiten-, Eich- und Medizinproduktegesetzes werden vielfältige wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt, und es erfolgen zahlreiche gesellschaftlich und wirtschaftlich notwendige Kalibrierungen, Prüfungen und Zulassungen industrienah mit höchster Genauigkeit und Verlässlichkeit. Weiterhin steht ein weiter Bereich von Forschungsaufgaben mit metrologischen Zielsetzungen grundlagenorientierter und anwendungsbezogener Fragestellungen im Mittelpunkt der Arbeit.

Im Fachbereich *Schall*, der sich vor allem mit Fragestellungen zur akustischen Messtechnik, der Zulassung von Schallpegelmessern und Kalibratoren, dem Gehör und dem Ultraschall beschäftigt, wurden intensiv notwendige Arbeiten zur Weiterentwicklung der Normalmessplätze als auch projektbezogene Tätigkeiten durchgeführt. So wurde ein neues Rückführungsverfahren für Ohrsimulatoren umgesetzt und an der Verbesserung des primären Schalldrucknormals für den Ultraschall gearbeitet.

Ein bei der Zulassung von Schallpegelmessern bisher unberücksichtigter Umstand ist der Einfluss von mechanischen Schwingungen auf den gemessenen Schalldruckpegel. In vielen Anwendungsfällen werden Messungen unter Einwirkung starker Schwingungen durchgeführt, z. B. bei Messungen in Werkhallen oder an Verkehrswegen. In einem neu aufgebauten Messplatz der seit dem 1. April 2010 im Fachbereich *Schall* angesiedelten Arbeitsgruppe *Geräuschmesstechnik* wurde dieser Einfluss untersucht, indem das Ausgangssignal eines von einem Schwingerreger in Vibration versetzten Schallpegelmessers mit einem nicht bewegten verglichen wurde. Dazu musste vor allem ein verlässlicher und reproduzierbarer Anregungsmodus gefunden werden. Es zeigt sich, dass die Schwingungen eine deutliche Verkleinerung des linearen Anwendungsbereichs des Schallpegelmessers hervorrufen. Deshalb

soll nun die Bestimmung des Einflusses von Schwingungen in die Bauartzulassungsverfahren aufgenommen werden.

Ein wichtiger Schwerpunkt der Arbeitsgruppe *Ultraschall* ist die Entwicklung von Messverfahren zur quantitativen Untersuchung von hochintensivem Ultraschall, wie er zur Tumortherapie eingesetzt wird. Die Arbeiten zur Entwicklung eines Leistungsnormalis konnten abgeschlossen werden, es können nun akustische Leistungen bis 500 W gemessen werden. Ein Vergleich mit anderen Messmethoden zeigte, dass die Nutzung der Schallstrahlungskraft auf ein absorbierendes Target verlässliche Werte mit geringer Unsicherheit liefert. Weiterhin muss auch die Schallfeldverteilung im Fokus des Schallbündels gemessen werden. Dazu wurde sehr erfolgreich ein in der Arbeitsgruppe *Ultraschall* entwickeltes faseroptisches Verfahren eingesetzt. In einem praxisnahen Feldversuch konnte gezeigt werden, dass sinnvolle Werte gemessen werden und außerdem die Sensoren erfolgreich der hohen Belastung im Bündelfokus widerstehen. Neben den das Schallbündel beschreibenden Größen ist vor allem aber auch die Dosis am Operationsort die für den Therapieerfolg entscheidende Größe. Hierzu wird zurzeit ein neues Messverfahren auf Basis der Untersuchung der durch die Schallstrahlungskraft im Gewebe entstehenden Schwerwellen entwickelt.

Die Arbeitsgruppe *Hörschall* befasst sich u.a. mit messtechnischen Fragen auf dem Gebiet der otoakustischen Emissionen (OAE). OAE sind akustische Signale, die das Ohr aussendet. Sie werden für diagnostische Zwecke verwendet. Um den Einfluss individueller Unterschiede in der Geometrie des Ohrkanals zu verringern, sind Kalibrierverfahren erforderlich, an deren Entwicklung der Fachbereich intensiv arbeitet. Dazu werden die akustischen Parameter der Ohrsonden benötigt, die mit einem neu entwickelten Messverfahren bestimmt wurden. Sie bilden die Basis von Modellrechnungen, die den Einfluss von geometrischen Änderungen des Ohrkanals einbeziehen können. Weiterhin wurde getestet, ob eine Anregung von otoakustischen Emissionen via Knochenleitung und damit unter Umgehung des Mittelohrs möglich ist. In einer ersten Studie wurden gute Ergebnisse erzielt, die bisher noch nirgendwo so erhalten wurden.

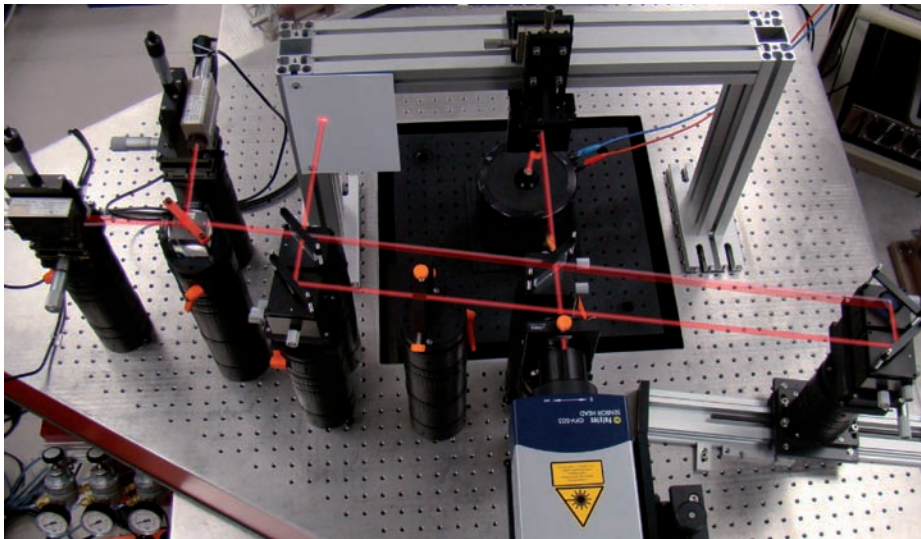


Bild 10: Messplatz mit verbesserter Rückführung von Laser-Doppler-Vibrometern im Zusammenhang mit der Kalibrierung von Referenz-Beschleunigungsaufnehmern

Zum Fachbereich *Akustik und Dynamik* gehören seit dem 1. April 2010 die Arbeitsgruppen *Darstellung Beschleunigung*, *Angewandte Akustik*, *Stoßdynamik* und *Wärmeleitung*.

Schwerpunkt der Arbeiten der AG *Darstellung Beschleunigung* ist die Kalibrierung von Referenzbeschleunigungsaufnehmern für akkreditierte Laboratorien in Deutschland, aber auch für internationale Kunden und ausländische NMI. Daraus leiten sich auch die wesentlichen F&E-Aktivitäten ab, die sich derzeit der Verringerung der Messunsicherheit, insbesondere bei der Phasenmessung, sowie der präzisen Rückführung von Laser-Doppler-Vibrometern widmen. Hier wurden im Berichtsjahr entscheidende Verbesserungen durch einen neuartigen Messplatz (siehe Bild 10) erreicht.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeitsgruppe *Darstellung Beschleunigung* ist die internationale Harmonisierung durch Normungsaktivitäten im ISO/ TC 108 für den Bereich der Hochintensitätskalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern bei Stoßanregung.

Ein Kernarbeitsgebiet der Arbeitsgruppe *Angewandte Akustik* bilden Grundlagenuntersuchungen zur messtechnischen Erfassung von Luft- und Körperschallfeldern, einschließlich deren Messunsicherheiten. Auf dem Gebiet der Trittschallmessung wurde im Berichtsjahr ein Forschungsprojekt abgeschlossen, in dessen Rahmen die typischen Unsicherheiten der wesentlichen Einflussgrößen sowie Vorschläge für deren Berücksichtigung beim Schallschutznachweis und bei Messungen in Gebäuden erarbeitet wurden. Diese Vorschläge wurden

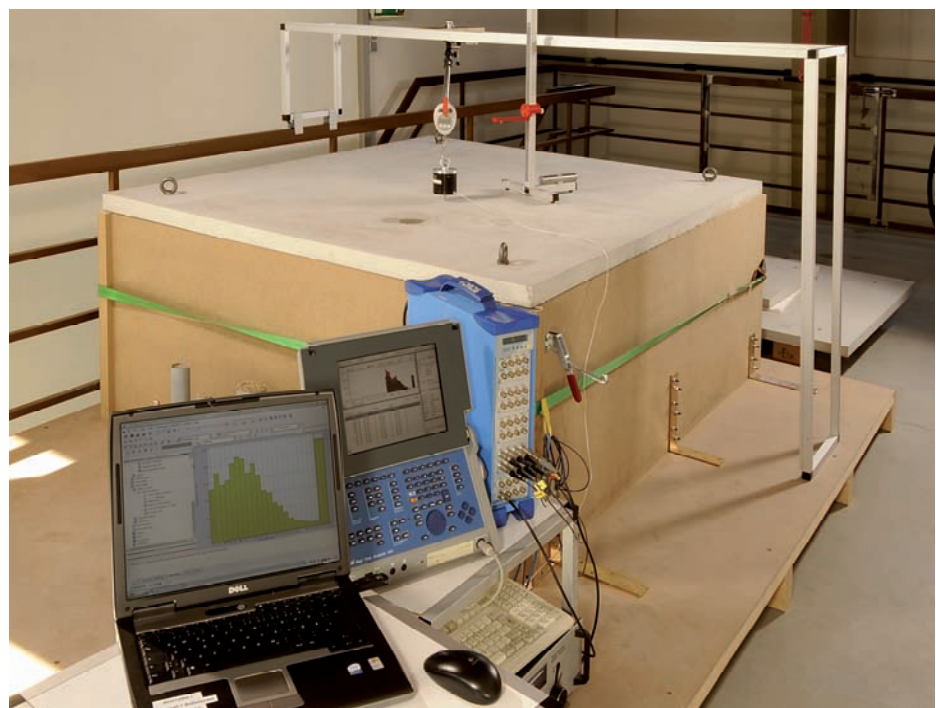


Bild 11: Modell einer Gebäude-Etage zur Untersuchung von Trittschall-Geräuschen



bereits in den Neuentwurf der nationalen Schallschutznorm übernommen. Im Projekt wurde auch erstmals die Modellmesstechnik für Trittschalluntersuchungen eingesetzt (siehe Bild 11).

Für die Schallemission von Körperschallquellen wurde eine bestehende Grundlagen-Messmethode auf transiente Quellen erweitert wie z. B. Abwassersysteme, Trittschall-Hammerwerke, gehende Personen, fallende Tropfen und die sogenannten „Nutzergeräusche“ von Bewohnern in Gebäuden. Daneben wurde im Rahmen eines AiF-Projekts ein Kompaktverfahren für die Ermittlung des Trittschallverbesserungsmaßes von Fußbodenbelägen entwickelt und als Normvorschlag bei ISO eingereicht. Der Vorteil liegt im Ersatz eines mehrräumigen Prüfstands durch eine 1 m² kleine Empfangsplatte. Dieses Verfahren soll nunmehr über die bestehende Norm hinaus auf weitere Decken- und Bodenbelagsarten erweitert werden.

In der Arbeitsgruppe *Geschwindigkeitsmessgeräte* im Fachbereich *Geschwindigkeit* bilden sehr genaue Referenzanlagen das Kernstück bei der Prüfung von Geschwindigkeitsmessgeräten zur amtlichen Überwachung des Straßenverkehrs. Erstmals wurde 2010 die piezosensorbasierte Referenzanlage der PTB mit einem in ein Fahrzeug eingebauten, hochwertigen GPS-Inertialsystem verglichen, das eine Kombination aus einem GPS-System und einem Inertialsystem mit integrierten Beschleunigungsaufnehmern darstellt. Beim Vergleich der Ergebnisse von PTB-Referenzanlage und dem GPS-Inertialsystem ergab sich trotz der völlig unabhängigen Messprinzipien eine Standardabweichung von nur 0,07 km/h, was eine außerordentlich gute Bestätigung der spezifizierten Messunsicherheitsbudgets beider Anlagen darstellt. Dies unterstreicht die hervorragende Eignung der Referenzanlage für die präzise Durchführung von Zulassungsprüfungen, da die in der Eichordnung festgelegten Fehlergrenzen für Prüflinge von 3 km/h dem 40-fachen der Standardabweichung des erläuterten Vergleichs entsprechen.

Bei der amtlichen Überwachung des Gebotes der Straßenverkehrsordnung „Halt vor der Kreuzung bei Rot einer Wechsellichtzeichenanlage“ wurde bisher das Fahrzeug mit Induktionsschleifen erfasst, die in Fahrtrichtung hinter der Haltelinie installiert waren. Anhand

der Signale dieser Schleifen wurden dann die Fahrzeuggeschwindigkeit ermittelt und zwei Dokumentationsfotos ausgelöst. Anschließend wurde bei moderneren Anlagen automatisch auf die Haltelinie zurückgerechnet, um zu ermitteln, nach welcher Zeit nach Beginn der Rotphase das Fahrzeug diese Linie passiert hatte. Im Jahr 2010 wurde erstmals eine Anlage zugelassen, bei der eine solche Rückrechnung nicht mehr erforderlich ist, da die Fahrzeuge über einen Laserscanner kontinuierlich – schon deutlich vor Erreichen der Haltelinie – erfasst werden. Sowohl für die Zulassungsprüfungen als auch für die Prüfungen bei der Eichung mussten neue Verfahren entwickelt werden.



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Reduzierung der Messunsicherheit in der Doppler-Global-Velocimetry

Durch den Einsatz neuer Verfahren konnte die Messunsicherheit in der Doppler-Global-Velocimetry zur Erfassung von Strömungsgeschwindigkeitsfeldern signifikant reduziert werden. (M. Eggert, FB 1.4, michael.eggert@ptb.de)

Bislang genaueste Massebestimmung einer 1-kg-Siliziumkugel für das Avogadro-Projekt in der PTB

Die Masse der ^{28}Si -Kugel AVO28-S8 konnte im Vakuum mit einer relativen Standardmessunsicherheit von $6,5 \cdot 10^{-9}$ bestimmt werden. (M. Borys, FB 1.1, michael.borys@ptb.de)

Erfolgreiche Erprobung von Platin-Iridium-Sorptionskörpern für Präzisionsmassebestimmungen unter Vakuumbedingungen

Mit Hilfe von Sorptionskörpern, die aus einer Platin-Iridium-Legierung hergestellt wurden, konnte der Einfluss von Sorptionseffekten auf die Genauigkeit von Massebestimmungen unter Vakuumbedingungen deutlich verringert werden. (M. Borys, FB 1.1, michael.borys@ptb.de)

Arbeitsökonomisches Kalibrier-Konzept für die objektive Audiometrie

Bislang musste für jedes neu für die Audiometrie entworfene Kurzzeitsignal die Bezugshörschwelle einzeln an einer Versuchspersonengruppe ermittelt werden. Durch geeignete Zusammenfassung von Signalen in Klassen kann der Aufwand für die Kalibrierung vermindert werden. (J. Hensel, FB 1.6, johannes.hensel@ptb.de)

Akustiker im Kloster

Die im Forum Braunschweiger Akustiker (FBA) zusammengeschlossenen Forscher und Hochschullehrer zogen sich Ende Mai wieder für zwei Tage ins Kloster Drübeck im Harz zurück, um gemeinsam mit ihren Doktoranden ausgiebig deren Forschungsthemen zu diskutieren. (W. Scholl, FB 1.7, werner.scholl@ptb.de)

Weitere Verbesserung des Messunsicherheitsbudgets für das HDP

Eine der wichtigsten funktionsrelevanten Komponenten des Hydrodynamischen Prüffeldes (HDP) ist die Durchfluss-Umlenkeinrichtung. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen des Zeitfehlers der entsprechenden Umlenkvorgänge und eine exakte modellbasierte Funktionsanalyse dieser Prozesse lieferten einen entscheidenden Beitrag zur Sicherstellung und weiteren quantitativen Verbesserung der Messunsicherheit des HDP von 0,19 % auf nunmehr 0,012 %. (R. Engel, FB 1.5, rainer.engel@ptb.de)

Messtechnische Möglichkeiten des Mineralölzähler-Prüfstandes erweitert

Der Mineralölzähler-Prüfstand ist Bestandteil des Systems der Primärnormale der PTB auf dem Gebiet der Mengen- und Durchflussmessung und arbeitet speziell mit Flüssigkeiten außer Wasser. Die vorgenommenen Erweiterungen verbessern den Betrieb des Prüfstandes in entscheidender Weise und erlauben nunmehr Untersuchungen zur Übertragbarkeit von Messergebnissen, die auf dem Hydrodynamischen Prüffeld mit Wasser gewonnen wurden, auch auf andere Flüssigkeiten unter vergleichbaren Messbedingungen. (J. Riedel, FB 1.5, joerg.riedel@ptb.de)

Breitbandmessplatz zur erweiterten Prüfung der Richtcharakteristik von Schallpegelmessern und Kalibrierung von Messmikrofonen

Bei der Prüfung der Richtcharakteristik von Schallpegelmessern und der Kalibrierung von Messmikrofonen werden in der Regel Sinustöne als Anregungssignal verwendet, um die geforderten geringen Messunsicherheiten zu erreichen. Durch den Einsatz von Breitbandsignalen konnten nun der zeitliche Aufwand einer Messung gesenkt, die spektrale Auflösung deutlich erhöht und die Identifizierung von verfälschenden Reflexionen erleichtert werden. Entgegen der Erwartung ist die Messunsicherheit dabei nicht erhöht, sondern teilweise sogar gesenkt worden. (C. Kling, FB 1.6, christoph.kling@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Kalibriereinrichtung für Impulshämmer

Aus einem im Rahmen der Entwicklung der Luftlager für die neue 250-kN-Stoßkraft-Kalibriereinrichtung vom Wissenschaftlichen Gerätebau eigens zu Testzwecken angefertigten Luftlager wurde eine neue Kalibriereinrichtung für Impulshämmer aufgebaut. (M. Kobusch, FB 1.7, michael.kobusch@ptb.de)

Neuartiger Kraft-Weg-Aufnehmer

Die Messung von Kräften und Momenten ist Grundlage zahlreicher Anwendungen in Industrie und Forschung, wie zum Beispiel der Materialprüfung. Ein Problem dabei ist bisher die Kalibrierung von Prüfeinrichtungen wie etwa Werkstoffprüfmaschinen. (A. Buß, FB 1.2, andre.buss@ptb.de)

Messunsicherheit des Primärnormals für LDA-Kalibrierungen deutlich verringert

In zunehmendem Maße werden von der PTB rückgeführte Laser-Doppler-Anemometer (LDA) in Kalibrierlaboratorien, in Prüfständen für die Durchflussmessung von Luft und Erdgas wie auch in Großprüfständen für die Flüssigkeits- und Wärmemengenmessung als Transfernormal für die Erfassung der Messgröße Strömungsgeschwindigkeit eingesetzt. Das Primärnormal zur Kalibrierung von LDA-Systemen – eine präzise rotierende Glasscheibe – wurde jetzt einer weitergehenden Unsicherheitsanalyse unterzogen. (V. Strunck, FB 1.4, volker.strunck@ptb.de)

Dreitägiger Intensivkurs „Bauakustik“ mit Rekordbeteiligung

Messen und Rechnen in der Bauakustik bedürfen wegen der Komplexität der Problematik eines soliden Grundlagenwissens. Personen, die schon im Berufsleben stehen, finden aber oft nicht die Zeit, sich die Grundlagen dieses Fachgebiets anzueignen, in das sie der Beruf „verschlagen“ hat. So stellen viele Ingenieure irgendwann fest, dass sie mit Akustik zu tun haben, ohne es jemals richtig gelernt zu haben. (W. Scholl, FB 1.7, werner.scholl@ptb.de)

Kooperation mit Großwindkanal-Betreiber WindGuard

In vielen Bereichen der Industrie, wie beispielsweise in der Klima- und Umwelttechnik, der Meteorologie, Luftfahrt oder Windenergiebranche, ist die Kenntnis der Strömungsgeschwindigkeit von zentraler Bedeutung. Messgeräte zur Erfassung der Messgröße Strömungsgeschwindigkeit, wie z. B. Flügelrad-Anemometer, werden üblicherweise in Windkanälen kalibriert. Die PTB betreibt zur Darstellung und Weitergabe der Einheit Strömungsgeschwindigkeit zwei Windkanäle. Der größere von beiden entspricht mit seiner Düsenquerschnittsfläche von 0,1 m² einer mittleren Baugröße und ist für Kalibrierungen im Geschwindigkeitsbereich von unter 1 m/s bis über 60 m/s geeignet. (H. Többen, FB 1.4, helmut.toebben@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Gasdruckmessungen an Patronen mit oder ohne Silikonfett

Die Auswirkung von verschiedenen Schutzmechanismen für Druckaufnehmermembranen von piezoelektrischen Sensoren auf den Spitzendruck bei der Gasdruckmessung an Kurzwaffenmunition wurde untersucht. (E. Franke, FB 1.3, ernst.franke@ptb.de)

Ein faseroptischer Sensor zur Messung der Partikelauslenkung in hochintensiven therapeutischen Ultraschallfeldern

Mit einem kalibrierten faseroptischen Verschiebungssensor konnte erfolgreich die Partikelgeschwindigkeit in HITU-Feldern (HITU – High Intensity Therapeutic Ultrasound) gemessen werden. Die Sensoren sind äußerst widerstandsfähig gegen die starken Ultraschallfelder und erlauben Messungen der Partikelgeschwindigkeit mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. (J. Haller, FB 1.6, julian.haller@ptb.de)

Revision der OIML-Empfehlung R60 für Wägezellen

Wägezellen sind das „Herz“ moderner, elektronischer Waagen und können auch als Modul einer Waage separat geprüft werden. In eichfähigen Waagen werden in der Regel nach der internationalen OIML-Empfehlung R60 aus dem Jahr 2000 geprüfte und zertifizierte Wägezellen eingesetzt. (O. Mack, FB 1.1, oliver.mack@ptb.de)



Gaszähler für Ostsee-Pipeline kalibriert

Die Ostsee-Pipeline (*Nord Stream*) wird im Endausbau jährlich etwa 55 Milliarden Kubikmeter Gas befördern. Sie ist 1220 km lang, hat zwei parallele Leitungsstränge, beginnt im russischen Wyborg und erreicht Deutschland in Lubmin bei Greifswald. Deutschland und die gesamte Europäische Union erhoffen sich durch den Wegfall von Transitländern zukünftig eine höhere Stabilität in der Gasversorgung und damit auch mehr Energiesicherheit. (B. Mickan, FB1.4, bodo.mickan@ptb.de)

Unsicherheit von Schalleistungspegeln

Durch Auswertung einer Vielzahl von Ringversuchen wurde ermittelt, dass die Korrelation zwischen den Terzbändern für die Unsicherheit des A-bewerteten Schalleistungspegels eine erhebliche Bedeutung besitzt. (V. Wittstock, FB 1.7, volker.wittstock@ptb.de)

Modellmessungen der Schallemissionen von Supermärkten

Häufig werden Nahversorgungsmärkte in Wohngebieten gebaut. Geräusche mit großem Störpotential treten dabei durch Entladevorgänge von LKWs auf, die Waren anliefern. In der Bauplanungsphase muss darum der Immissionsschutz der Nachbarschaft vorab durch Prognoserechnungen nachgewiesen werden. Die Verbesserung dieser Berechnungsverfahren wurde durch Modellmessungen unterstützt. (M. Schmelzer, FB 1.7, martin.schmelzer@ptb.de)

Otoakustische Emissionen durch Knochenleitungsstimulation

Ein Hörtest mit Otoakustischen Emissionen (OAE) liefert als objektives Verfahren auch dann eine Aussage über die Funktion der Sinneszellen im Hörorgan (Cochlea), wenn die untersuchten Personen selbst beim Test nicht mitwirken können, wie z. B. Babys. OAE werden als Antwort auf einen Schallreiz ausgelöst und ihr Vorhandensein deutet auf ein gesundes Innenohr hin. Üblicherweise werden die Reize mit Miniaturlautsprechern im Gehörgang angeboten. Eine zusätzliche Stimulation mit sog. Knochenleitungshörern kann noch mehr Information über die Funktion des Ohres liefern. (M. A. Zebian, FB 1.6, makram.a.zebian@ptb.de)

Messung der akustischen Ausgangsleistung von hochintensiven, fokussierenden Ultraschallwandlern für die Tumorthherapie

Durch einen modifizierten Aufbau der Schallstrahlungskraftwaage, dem Primärnormal zur Darstellung der Einheit W im Ultraschall, konnte die Ausgangsleistung von HITU-Wandlern (High Intensity Therapeutic Ultrasound) zuverlässig gemessen werden. Ein stark fokussierender Leistungswandler wurden dabei mit elektrischen Leistungen von bis zu 500 W beaufschlagt. (K.-V. Jenderka, FB 1.6, klaus-vitold.jenderka@ptb.de)

Neues Messverfahren für Gehgeräusche

Menschliches Gehen ist auf unterschiedlichen Bodenbelägen unterschiedlich laut. Da es Länder mit Vorschriften hierzu gibt, hatte die europäische Normungsorganisation CEN einer Arbeitsgruppe den Auftrag erteilt, ein entsprechendes Mess- und Beurteilungsverfahren für Gehgeräusche zu entwickeln. (W. Scholl, FB 1.7, werner.scholl@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Neues Beurteilungssystem für die Schalldämmung in Gebäuden

Die Mitte der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts eingeleitete Harmonisierung europäischer Normen betraf auch den Schallschutz in Gebäuden. Ziel der Harmonisierung war es, übergreifend für ganz Europa Bauprodukte und Gebäude nach denselben Maßstäben zu vermessen und zu beurteilen, um länderübergreifenden Handel und Aktivitäten zu erleichtern. (W. Scholl, FB 1.7, werner.scholl@ptb.de)

Neues aus der OIML

Vom 21. bis 24. September 2010 fand die 45. Sitzung des Internationalen Komitees für gesetzliches Messwesen (CIML) in Orlando, Florida (USA), statt. (R. Schwartz, Abt. 1, roman.schwartz@ptb.de)

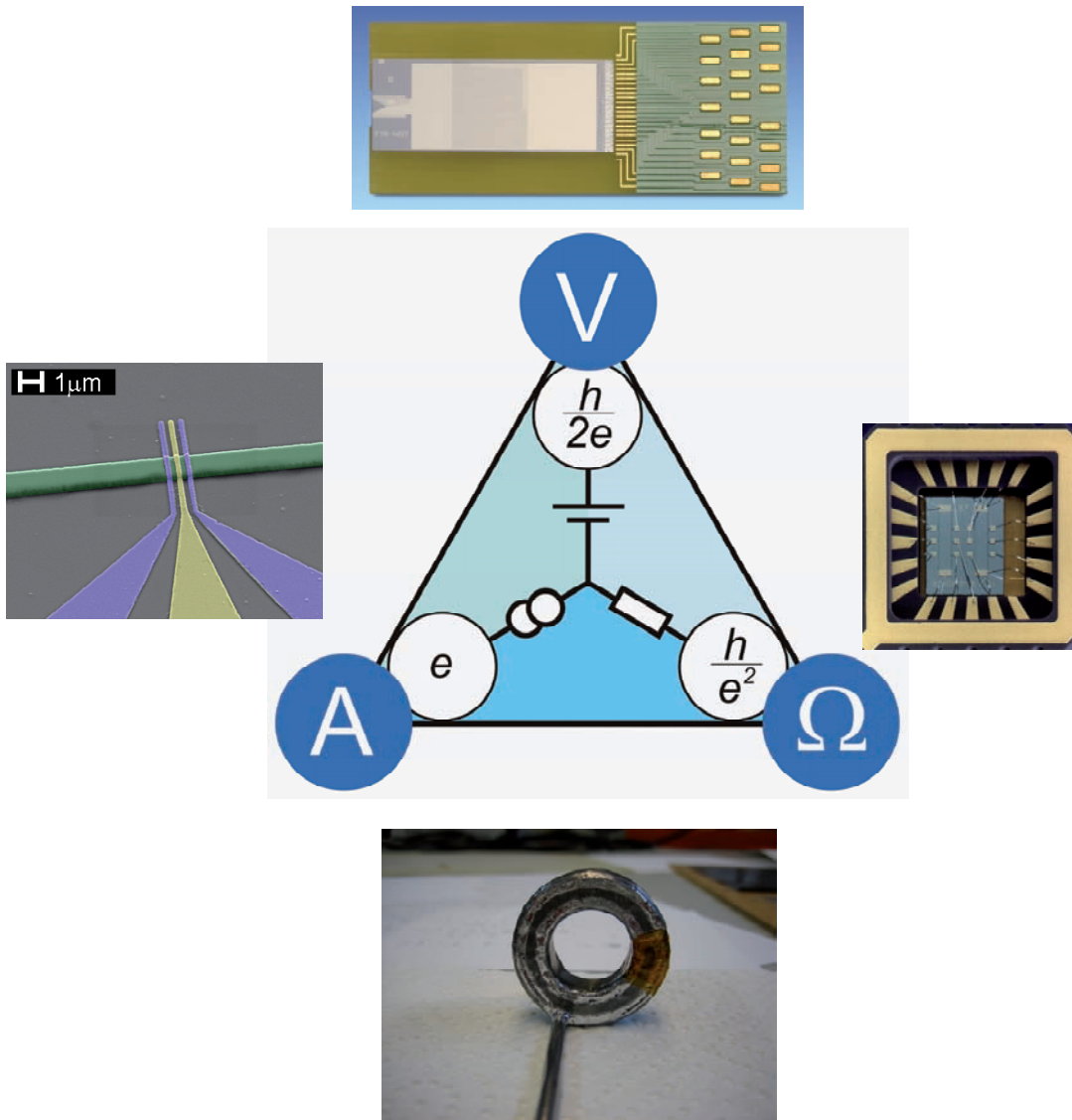
Seminar zur Wasserdurchflussmessung am NIM in Peking

Im November 2009 wurde vom Nationalen Metrologieinstitut der Volksrepublik China (NIM) ein vielbeachtetes zweitägiges Seminar mit PTB-Beteiligung zum Thema „Technik und Verfahren der Wasserdurchflussmessung“ veranstaltet, das inhaltlich sehr breit ausgerichtet war und neben Fragen zu Messunsicherheit, Rückführbarkeit, relevanten Standards und gesetzlichen Regelungen auch zahlreiche interessante technische Aspekte behandelte. (R. Engel, FB 1.5, rainer.engel@ptb.de)



Abteilung Elektrizität

Berichte der Abteilungen



Elektrische Präzisionsmesstechnik bildet die Grundlage für die Produktentwicklung und Qualitätssicherung in der Elektro- und Elektronikindustrie und ist unverzichtbar für eine nachhaltige und sichere Versorgung mit elektrischer Energie. Die Abteilung *Elektrizität* bearbeitet alle Facetten des weitgespannten Themengebiets *Elektrizität und Magnetismus*. Zur Wahrnehmung dieser Aufgabe ist die Abteilung in die sechs Fachbereiche *Gleichstrom und Niederfrequenz, Hochfrequenz und Felder, Elektrische Energiemesstechnik, Quantenelektronik, Halbleiterphysik und Magnetismus* und *Elektrische Quantenmetrologie* gegliedert. Senkrecht zur Fachbereichsstruktur hat die Abteilung fünf Schwerpunktthemen identifiziert, die die zur Zeit wichtigsten Fragestellungen des Themengebiets *Elektrizität und Magnetismus* adressieren und in der Regel fachbereichsübergreifend bearbeitet werden: *Grundlagen der elektrischen Metrologie, Aufbau von Quanten- und klassischen Skalen für elektrische und magnetische Einheiten, Elektrische Energiemesstechnik, Metrologie für magnetische Nanostrukturen sowie Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie*.

Die Arbeiten zu den Schwerpunktthemen sind eingebettet in das von der EU geförderte European Metrology Research Programme (EMRP). Im Berichtsjahr sind die Projekte des ersten in diesem Rahmen geförderten Unterprogramms zum Thema Energie angelaufen. Die zusätzliche Förderung hat es der Abteilung ermöglicht, ihr Arbeitsspektrum in den Schwerpunktgebieten *Elektrische Energiemesstechnik* und *Einheitenskalen* zu erweitern. Diese und andere Entwicklungen in den Schwerpunktgebieten werden im Folgenden detaillierter beschrieben.

Titelbild:

Quantenmetrologisches Dreieck (Bildmitte). Das Ziel des Experiments ist es, die Konsistenz der Beschreibung des Josephson-Effekts, des Quanten-Hall-Effekts und des Einzelladungstransports durch die Elementarladung e und die Planck-Konstante h zu überprüfen. Die PTB entwickelt die Schlüsselkomponenten eines zukünftigen Dreiecksexperiments: Josephson-Spannungsnormale, Quanten-Hall-Widerstände, Kryostromkomparatoren und Halbleiter-Einzelelektronenpumpen (Bildaußenseite, im Uhrzeigersinn).

Grundlagen der elektrischen Metrologie

Das Arbeitsgebiet *Grundlagen der elektrischen Metrologie* wird zurzeit durch die Vorbereitungen für die von der Meterkonvention geplante Neudefinition des Amperes geprägt. Das „neue Ampere“ soll durch die Festlegung der Elementarladung e definiert werden. Das beratende Komitee der Meterkonvention für den Bereich *Elektrizität und Magnetismus* (CCEM) hat in der im Jahr 2009 verabschiedeten „*Mise en pratique for the ampere and other electrical units in the International Systems of Units (SI)*“ Wege zur Darstellung der neuen Amperes aufgezeigt. Die Darstellung kann mit Hilfe eines Messgerätes aus einem Quanten-Hall-Widerstand und einem Josephson-Spannungsnormal oder mit Hilfe von Quellen quantisierter Ströme erfolgen.

In quantisierten Stromquellen wird mit einer vorgegebenen Frequenz eine feste Anzahl von Elementarladungen pro Zyklus durch einen Leitungsquerschnitt transportiert. Für praktische Anwendungen sind quantisierte Ströme im Nanoampere-Bereich wünschenswert. Wird pro Zyklus nur eine Elementarladung transportiert, muss dazu die Frequenz im Bereich von 10 GHz liegen. Bei derart hohen Frequenzen kann sich jedoch die Unsicherheit der quantisierten Strömstärke erhöhen, die für die Darstellung des Amperes in der Größenordnung von einem Teil in 10^8 liegen soll. Ein alternatives Konzept zur Erhöhung der Stromstärke setzt daher darauf, bei moderaten Frequenzen von 100 MHz bis 1 GHz die pro Zyklus transportierte Elektronenzahl durch den parallelen Betrieb mehrerer Transportkanäle zu erhöhen. Im Berichtsjahr hat die Abteilung bei der Parallelisierung von Halbleiter-Einzelelektronenpumpen einen wesentlichen Fortschritt erzielt. Erstmals konnte gezeigt werden, dass drei Halbleiter-Einzelelektronenpumpen, betrieben mit einer gemeinsamen Modulationsspannung, parallel arbeiten können. Dabei erzeugen sie einen quantisierten Gesamtstrom von 264,36 pA bei 550 MHz. Da nur eine Modulationsspannung zum Betrieb benötigt wird, ist die Beschaltung relativ einfach. Das Konzept ist daher zu höheren Stromstärken skalierbar. Die zukünftigen Arbeiten haben das Ziel, diese Skalierbarkeit auszunutzen und die für Halbleiter-Einzelelektronenpumpen theoretisch vorausgesagte Unsicherheit des quantisierten Stroms von 10 nA/A experimentell zu

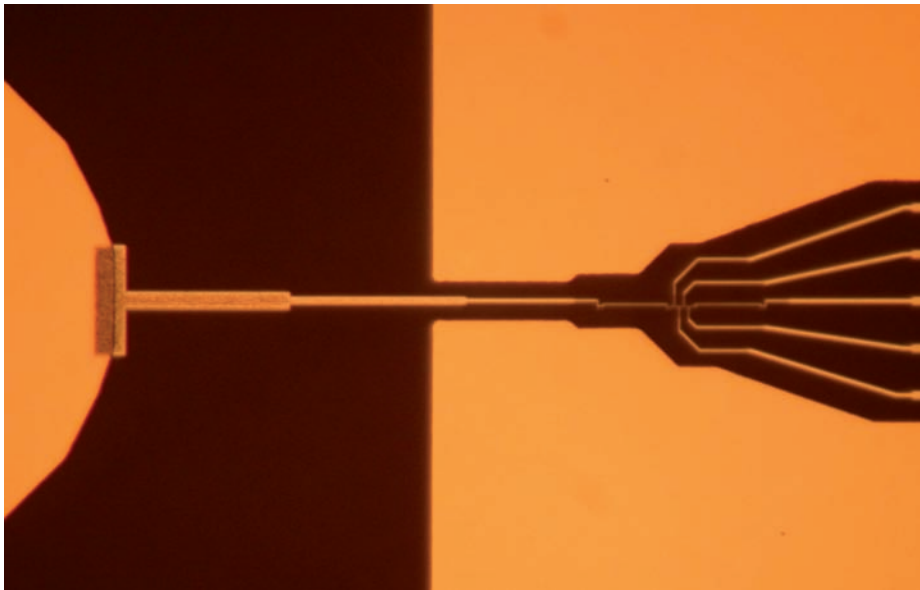


Bild 1: Mikroskopaufnahme einer Einzel-Elektronen-R-Pumpe mit verbessertem Schaltungsentwurf. Die parasitäre kapazitive Kopplung zwischen den Zuleitungen zu den vier Ansteuerelektroden und der Ladungsinsel konnte durch eine veränderte Leitungsführung und durch zusätzliche metallische Abschirmflächen deutlich verringert werden.

bestätigen (siehe auch die Rubrik „Nachrichten des Jahres“).

Ein Quantenamperemeter misst die Stromstärke gemäß der neuen Definition des Amperes, indem mit Hilfe eines Josephson-Normals der Spannungsabfall bestimmt wird, den ein Strom beim Durchgang durch einen Quanten-Hall-Widerstand verursacht. Die Präzision einer solchen Messung ist abhängig von der Präzision, mit der der Josephson- und der Quanten-Hall-Effekt durch die heute als korrekt angenommenen Beziehungen zwischen der Elementarladung e und der Planck-Konstante h beschrieben werden. Ein als „quantenmetrologisches Dreieck“ bekannter Konsistenztest dient der Überprüfung dieser Beziehungen. Die PTB arbeitet seit einigen Jahren an der Variante des quantenmetrologischen Dreiecks, bei der die Ladung, elektrische Spannung und die auf den Quanten-Hall-Effekt rückgeführte Kapazität verknüpft werden. Die in diesem Experiment erreichbare Unsicherheit hängt stark von der Unsicherheit ab, mit der eine definierte Anzahl von Elementarladungen generiert werden kann. Die dazu verwendete „5-Junction-R-Einzelladungspumpe“ konnte im Berichtsjahr deutlich verbessert werden (Bild 1). In einem neuen Schaltungsentwurf wurde die kapazitive Kopplung reduziert und dadurch die Unsicherheit des Einzelladungstransfers auf 5 Teile in 10^7 verbessert. Dies ist ein wichtiger Schritt, um die Unsicherheit des gesamten Experiments unter 9 Teile in 10^7 zu reduzieren und damit die vom nationalen metrologischen Institut der USA (NIST) gesetzte Bestmarke zu verbessern.

Eine weitere Verbesserung der Unsicherheit verspricht die Variante des quantenmetrologischen Dreiecks, in der ein quantisierter Strom, ein Quanten-Hall-Widerstand und eine Josephson-Spannung direkt verglichen werden (siehe Titelbild). Um eine geringe Unsicherheit zu erreichen, sind quantisierte Ströme im Nanoampere-Bereich erforderlich, die mit speziellen Kryostromkomparatoren verstärkt werden müssen. Mit dem Aufbau eines solchen Komparators wurde begonnen. Mit der bereits etablierten Josephson- und Quanten-Hall-Technologie sowie in Anbetracht der erwähnten großen Fortschritte bei der Entwicklung von Halbleiter-Einzelelektronenpumpen wird die PTB substantielle Beiträge zu den Grundlagen der elektrischen Metrologie leisten.

Aufbau von Quanten- und klassischen Einheitenskalen

Die Rückführung von elektrischen Messungen wird seitens der Industrie in sich ständig erweiternden Werte- und Frequenzbereichen gefordert. Die Abteilung arbeitet daher an dem Ausbau der Skalenbereiche, über die die elektrischen Einheiten dargestellt und weitergegeben werden können. Die zunehmende Nutzung von Quantennormalen bietet dabei den Vorteil einer höheren Genauigkeit und kann darüber hinaus Kalibrierverfahren vereinfachen und Kalibrierungen kostengünstiger machen.

Im Berichtsjahr ist bei der Nutzung des Wechselstrom-Quanten-Hall-Effekts zur Reproduzierung der Kapazität ein weiterer Fortschritt erzielt worden. Die Nutzung dieses Quanteneffekts basiert auf einer speziellen Schir-

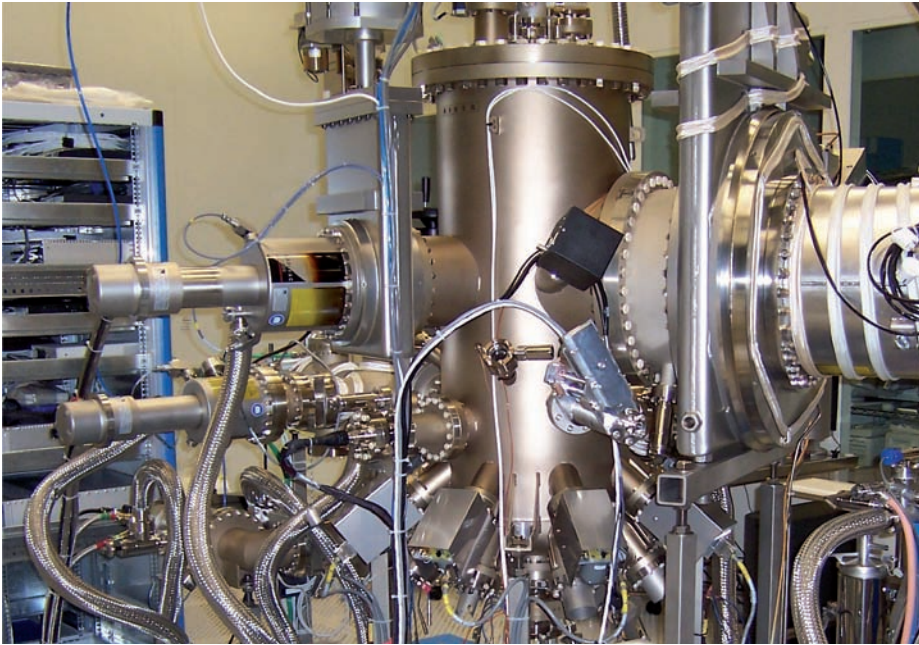


Bild 2: Molekularstrahl-epitaxie-Anlage für hochreine Halbleiterschichten mit höchsten Elektronenbeweglichkeiten, wie sie für Halbleiter-Einzelelektronenpumpen benötigt werden. Durch die Wahl spezieller Wachstumsbedingungen und angepasster Schichtstrukturen können mit der Anlage auch Schichten mit geringerer Beweglichkeit für Quanten-Hall-Widerstände hergestellt werden.

mungstechnik, die die Frequenzabhängigkeit des Wechselstrom-Quanten-Hall-Effekts eliminiert. Eine genauere Analyse der Experimente hat gezeigt, dass bei Verwendung der Schirmungstechnik die ($k = 1$) Unsicherheit mit $1,3 \text{ n}\Omega/\Omega$ pro kHz deutlich geringer ist als bislang angenommen. Die ($k = 1$) Unsicherheit der Kalibrierung von 10-pF -Kapazitätsnormalen konnte auf $4,7 \text{ nF/F}$ verringert werden und ist damit geringer als bei der herkömmlichen Kalibrieremethode mit Hilfe eines berechenbaren Kondensators. Die quantenbasierte Methode kann jetzt das herkömmliche Verfahren ersetzen. Zukünftig entfällt damit die kostspielige Wartung des komplexen berechenbaren Kondensators.

Um Quanteneffekte verstärkt für die Darstellung und Weitergabe der elektrischen Einheiten zu nutzen, ist eine ausgereifte Fertigungstechnologie für quantenmetrologische Schaltungen erforderlich. Auf diesem Gebiet sind im Berichtsjahr bedeutende Fortschritte erzielt worden. Um die Verfügbarkeit von Quanten-Hall-Widerständen langfristig sicherzustellen, wurde ein Verfahren entwickelt, geeignete Halbleiterstrukturen mit der kürzlich beschafften Molekularstrahl-epitaxie-Anlage für hochreine Halbleiter herzustellen (Bild 2). Diese Anlage ist für das Wachstum von Halbleiterschichten mit höchsten Elektronenbeweglichkeiten konzipiert, die für Halbleiter-Einzelelektronenpumpen eingesetzt werden. Für

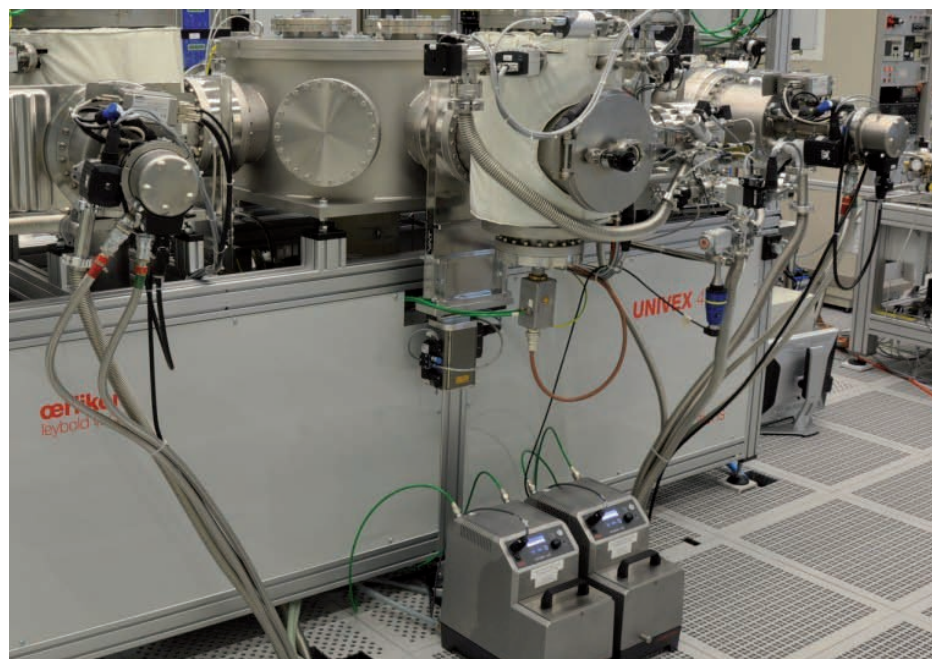


Bild 3: Cluster-Beschichtungsanlage für die Abscheidung von Niob (Nb) und Silizium (Si). Dreilagige Nb/ $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$ /Nb-Schichten dienen zur Herstellung von Josephson-Spannungsnormalen.



Quanten-Hall-Widerstände werden Schichten mit geringerer Beweglichkeit der Ladungsträger benötigt. Das neue Verfahren ermöglicht die Herstellung solcher Schichten, ohne die Möglichkeit, hochbewegliche Schichten herzustellen, einzuschränken.

Auch bei der Fertigung supraleitender Schichten für Spannungsnormale sind gute Ergebnisse erzielt worden. Mit der kürzlich beschafften Cluster-Beschichtungsanlage für die Abscheidung von Niob (Nb) und Silizium (Si), siehe Bild 3, können inzwischen im Routinebetrieb Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb-Schichten hergestellt werden. Aus diesen Schichten werden programmierbare binäre 10-V-Josephson-Spannungsnormale für Wechselstromanwendungen bis zu etwa 1 kHz gefertigt. Der Fertigungsausbeute ist dabei deutlich höher als bei der früher verwendeten Aluminium/Aluminiumoxid-Technologie. Die PTB beherrscht die komplette Prozesskette von der Herstellung der Schichten über die Strukturierung bis zur Schaltungsfertigung. Im Rahmen eines vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten MNPQ-Transfer Projektes (Messen, Normen, Prüfen, Qualitätssicherung) wird zur Zeit die Fertigungstechnologie für Josephson-Spannungsnormale in enger Zusammenarbeit mit einem Industriepartner so modifiziert, dass sie einer verstärkten industriellen Nutzung zugänglich wird.

Die Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb-Technologie wurde auch für die Herstellung von pulsgetriebenen Josephson-Normalen optimiert. Im Vergleich

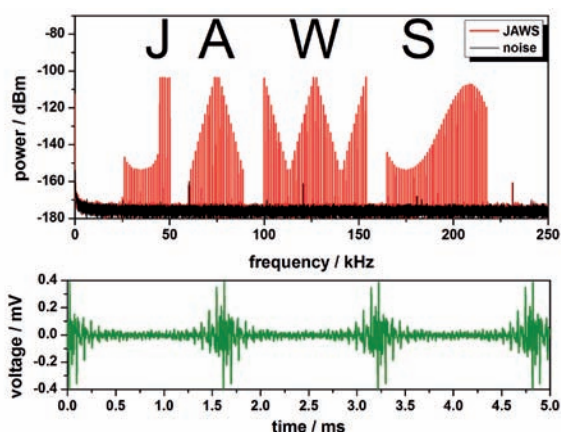


Bild 4: Veranschaulichung der Möglichkeit, mit pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormalen („Josephson Arbitrary Waveform Synthesizers“, JAWS) beliebige Frequenzspektren und Wellenformen zu erzeugen: Im Frequenzbereich wurde das Wort „JAWS“ synthetisiert.

zur bisherigen Technologie konnte die Pulsfolgefrequenz auf 15 GHz verdreifacht werden.

Dadurch verdreifacht sich auch die Ausgangsspannung. Pulsgetriebene Josephson-Normale („Josephson Arbitrary Waveform Synthesizers“, JAWS) gestatten die Erzeugung beliebiger Wellenformen mit Frequenzkomponenten zwischen 20 Hz und 200 kHz (Bild 4).

Angesiedelt im Grenzbereich zwischen den Schwerpunktgebieten *Einheitenskalen* und *Elektrische Energiemesstechnik* ist das durch das EMRP geförderte Projekt zum „Energy Harvesting“, das im Berichtszeitraum angefallen ist. Ziel des Projektes ist es, die metrologischen Grundlagen für die effizientere Umwandlung von thermischer Energie (Abwärme) und Bewegungsenergie in elektrische Energie zu schaffen. Damit werden bisher ungenutzte Energieressourcen nutzbar gemacht. Entwickelt werden Messmethoden für thermoelektrische und piezoelektrische Mikrogeneratoren, die das Potenzial haben, umweltschädliche Einwegbatterien zu ersetzen. Dazu müssen neue Messverfahren für irreguläre, nicht-sinusförmige Signale entwickelt und die Skalenbereiche der Wechselstrom- und Wechselspannungsmessung ausgebaut werden. In dem europäischen Projekt arbeiten sieben Partner zusammen. Die Koordination erfolgt durch die Abteilung *Elektrizität* der PTB.

Elektrische Energiemesstechnik

Ziel des Schwerpunktgebiets *Elektrische Energiemesstechnik* ist es, die metrologische Infrastruktur für eine sichere Versorgung mit elektrischer Energie auszubauen und zu gewährleisten, sodass der Verbrauch elektrischer Energie gemäß den Vorgaben des Eichrechts für Abrechnungszwecke korrekt erfasst wird.

Für die Erfassung des Energieverbrauchs beim Endkunden werden zunehmend elektronische Elektrizitätszähler eingesetzt. Diese Zähler lassen sich als „intelligente“ Zähler auslegen, um so die Anforderung des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) zu erfüllen, dass eine Messeinrichtung den tatsächlichen Energieverbrauch und die tatsächliche Nutzungsdauer widerspiegeln soll. Da nunmehr elektronische Zähler und Motorzähler bei den Kunden verwendet werden, stellt sich die Frage der angemessenen Eichgültigkeitsdauer für die verschiedenen Zählertypen. Die PTB hat hierzu

Bild 5: Konverter einer Hochspannungs-Gleichstrom-Station (Foto: ABB)



in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Ilmenau ein Projekt gestartet, in dem auf der Grundlage mathematischer Methoden Lebensdauerprognosen für Elektrizitätszähler erarbeitet werden sollen.

Eine zuverlässige und nachhaltige Energieversorgung erfordert die zunehmende Einbindung regenerativer Energiequellen wie der Windkraft. Um die Energie aus Off-Shore-Windkraftanlagen zum Verbraucher zu bringen, wird auf die Technik der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) zurückgegriffen. Dieses Verfahren erlaubt es, elektrische Energie mit geringen Verlusten über große Distanzen zu transportieren. Die metrologische Infrastruktur für die Energieübertragung mittels Gleichstrom ist jedoch nur wenig entwickelt. Abhilfe schaffen soll ein durch das EMRP finanziertes Projekt über die Metrologie für HGÜ, das im Berichtsjahr angelaufen ist. An dem Projekt sind acht nationale metrologische Institute beteiligt sowie die Technische Universität Braunschweig, mit der die PTB eng zusammenarbeitet. Die PTB und die TU Braunschweig entwickeln Verfahren für die Messung der Verluste, die bei der Umwandlung von Gleich- in Wechselstrom in den Konverter-Stationen entstehen (Bild 5), die das Gleichstrom- an das Wechselstrom-Verbundnetz anbinden. Ferner sollen Anforderungen an Gleichstrom-Elektrizitätszähler formuliert und damit die Grundlagen für deren Normung geschaffen werden.

Metrologie für magnetische Nanostrukturen

Die Arbeiten in diesem Schwerpunktgebiet haben das Ziel, rückgeführte Messverfahren für die Kenngrößen nanomagnetischer Strukturen zu entwickeln. Nanomagnetische Bauelemente und Systeme haben eine zentrale Funktion in der Informations- und Kommunikationstechnik und der Sensorik. Die Arbeiten im Berichtszeitraum haben sich auf dynamische Messverfahren konzentriert.

Die dynamischen Kenngrößen magnetischer Dünnschichten, wie Resonanzfrequenz und Dämpfung, bestimmen die Geschwindigkeit von Schaltvorgängen in magnetischen Datenspei-

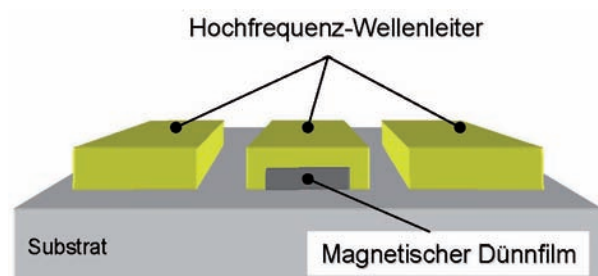


Bild 6: Prinzipskizze einer Referenzprobe zur Messung der dynamischen Eigenschaften magnetischer Dünnschichten. Der magnetische Dünnschicht (z. B. eine Nickel-Eisen-Legierung) ist, geschützt vor Umwelteinflüssen, in die mittlere Leiterbahn eines koplanaren Hochfrequenz-Wellenleiters integriert. Durch die Messung der Hochfrequenzeigenschaften des Wellenleiters können die dynamischen Eigenschaften des magnetischen Dünnschicht bestimmt werden.



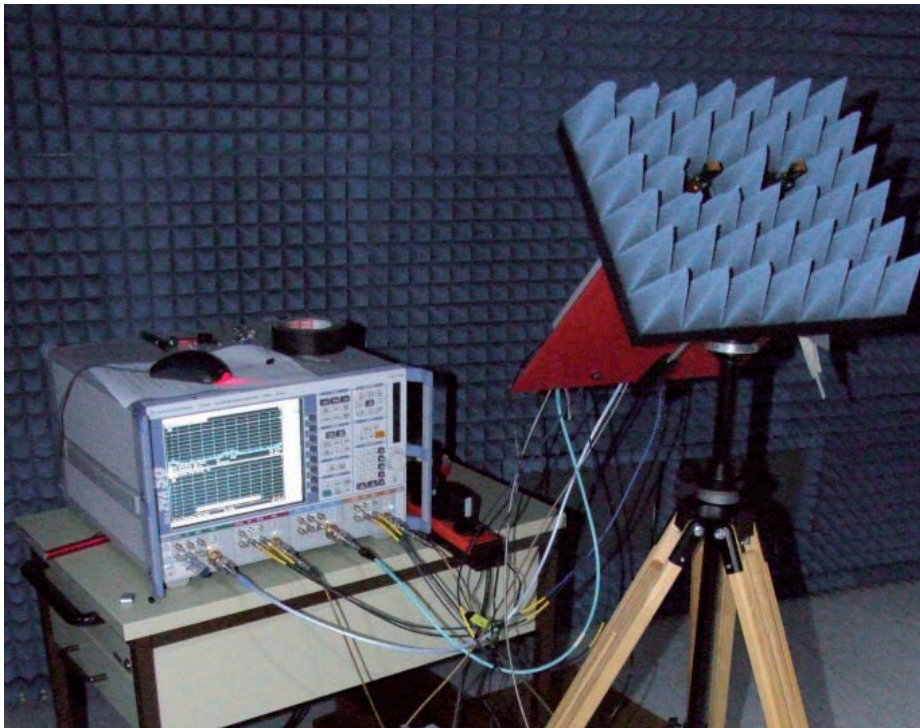


Bild 7: Vektornetzwerk-analysator zur Messung der Übertragungseigenschaften zwischen Sende- und Empfangsantenne. Die Antennen sind zusammen mit den erforderlichen Frequenzbereichserweiterungen auf einem Stativ montiert, um winkelaufgelöste Messungen durchführen zu können.

chern. Um die Standardisierung der Messung der dynamischen Kenngrößen voranzutreiben, wurden im Rahmen eines europäischen Metrologieforschungsprojekts Referenzproben für induktive Messungen der Magnetisierungsdynamik entwickelt. In den neuen Referenzproben ist der zu untersuchende magnetische Dünnschicht in einen nichtmagnetischen Wellenleiter integriert (Bild 6). Diese Kapselung ermöglicht es, die dynamischen Eigenschaften unbeeinflusst von den Umgebungsbedingungen, wie z. B. der Luftfeuchtigkeit, zu messen. Die hohe Qualität dieser neuartigen Referenzproben wurde durch vergleichende Messungen der PTB und des italienischen nationalen Metrologieinstituts INRIM bestätigt.

Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie

Die Erweiterung der Messmöglichkeiten zu höheren Frequenzen ist das Ziel im Schwerpunktgebiet *Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie* mit seinen Unterthemen Feld- und Antennenmesstechnik, Leistungs-, Dämpfungs- und Streuparametermessung sowie Terahertz-Optoelektronik.

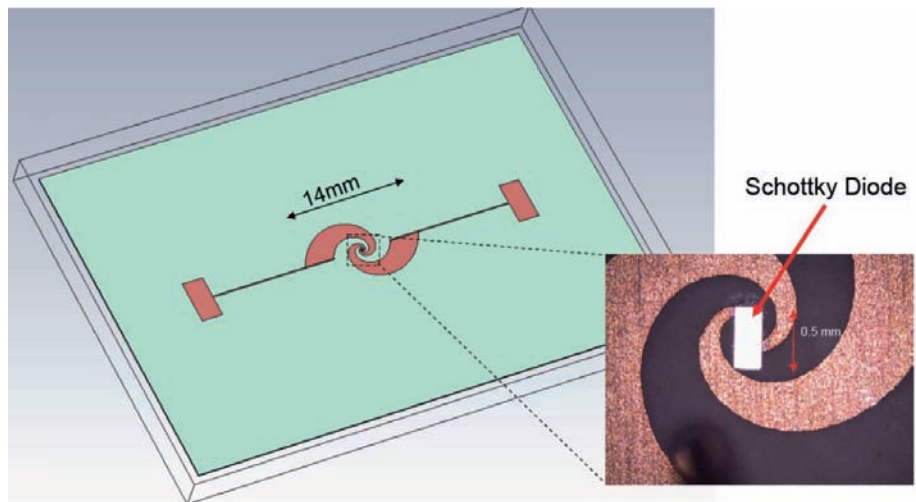
Um den Ausbau der Antennenmesstechnik bis zu 325 GHz voranzutreiben, wurden im Berichtsjahr die Dämpfungseigenschaften der im Jahr 2009 modernisierten Absorberhalle charakterisiert. Seit kurzem verfügt die PTB für solche Messungen über einen Vektornetzwerk-analysator mit den erforderlichen Frequenz-

bereichserweiterungen und über die erforderlichen Hornantennen für die Hohlleiterbänder zwischen 50 GHz und 325 GHz (Bild 7). Durch winkelaufgelöste Messungen im Zeitbereich konnten potenzielle Störquellen in der Halle lokalisiert und durch Verbesserung der Absorberauskleidung teilweise beseitigt werden. Die Halle ist geeignet für den zur Zeit im Aufbau befindlichen Antennenscanner, der den Frequenzbereich bis 325 GHz abdecken soll.

Im Rahmen eines europäischen Metrologieforschungsprojektes wurden Feldstärkesensoren für den Frequenzbereich zwischen 40 GHz und 300 GHz entwickelt. Die Herstellung der planaren Feldstärkesensoren erfolgte in Zusammenarbeit mit der TU Braunschweig. Die Feldstärkesensoren bestehen aus einer breitbandigen planaren logarithmisch-periodischen Antenne (Spiralantenne oder Bow-Tie-Antenne), in deren Speisepunkt sich eine Flip-Chip-Schottky-Diode zur Gleichrichtung des empfangenen Hochfrequenzsignals befindet (Bild 8). Derartige Sensoren sind erforderlich, um die Einhaltung der Grenzwerte zu überprüfen, die durch die EU-Richtlinie 2004/40/EC „Physical Agents Directive“ im Bereich des Arbeitsschutzes vorgegeben werden.

Methoden der Terahertz-Optoelektronik werden benutzt, um das Übertragungsverhalten von Geräten höchster Bandbreite zu bestimmen, für die es keine geeigneten rein elektronischen Referenznormale gibt. Ein wichtiges

Bild 8: Feldstärkesensor auf Basis einer planaren logarithmischen Spiralantenne. Das Foto vom Speisepunkt im Zentrum der Antenne zeigt die Schottky-Diode zur Gleichrichtung des Hochfrequenzsignals.



Beispiel sind breitbandige Oszilloskope, die bei der Entwicklung von Hochfrequenzelektronik eingesetzt werden. Nachdem in den vergangenen Jahren bereits Messmethoden zur Bestimmung der Zeitantwort von 50-GHz- und 70-GHz-Oszilloskopen entwickelt wurden, ist jetzt ein weiterer Fortschritt erzielt worden. In einem 100 ps langen Zeitfenster wurde die komplette Zeitantwort eines 110-GHz-Sampling-Oszilloskops charakterisiert. Für die Messung wurde eine vollständige Unsicherheitsanalyse durchgeführt. In Zukunft können sich damit Entwicklungsarbeiten in der Industrie auf rückgeführte Oszilloskopmessungen mit höchster Bandbreite abstützen.



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Verringerte Messunsicherheiten beim Wechsel-Gleich-Transfer

Die Anzahl der Aufbauschnitte für den Wechselspannungs-Gleichspannungs-Transfer mit planaren Thermokonvertern konnte durch Ausnutzung ihres Dynamikbereichs deutlich reduziert werden. Die Messunsicherheiten im Bereich von 1 mV bis 1000 V bei Frequenzen von 10 Hz bis 1 MHz haben sich dadurch teilweise auf weniger als ein Drittel verringert. Ähnlich deutliche Verbesserungen ergaben sich beim Wechsel-Gleich-Transfer für Stromstärken von 1 mA bis 100 A im Frequenzbereich von 10 Hz bis 100 kHz. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

Charakterisierung von Absorbern in Zeit- und Frequenzbereich

In der PTB wurden Messungen zur Charakterisierung von Hochfrequenzabsorbern bis zu Frequenzen von 325 GHz durchgeführt, um die Eignung von Absorberhallen auch im unteren THz-Frequenzbereich beurteilen zu können. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

Digitale Datenübertragung bei 300 GHz

In der PTB konnte mit Hilfe eines Übertragungssystems auf Basis von Schottky-Diodenmischern erstmals die hochbitratige Übertragung von Daten bei einer Trägerfrequenz von 300 GHz demonstriert werden. Dabei wurden die digitalen Signaleigenschaften im Übertragungskanal gemessen. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

Erfassung der Betriebs- und Schaltverluste von IGBTs in Umrichtern der Hochspannungs-Gleichstromübertragung

Die Eignung verschiedener Transientenrekorder für die Bestimmung der Verlustleistung an Insulated Gate Bipolar Transistoren (IGBTs) zum Einsatz in der Hochspannungs-Gleichstromübertragung wurde an einem Versuchstand überprüft. Für den zukünftigen Einsatz solcher Messgeräte in der PTB wurden die Messunsicherheiten ermittelt und verglichen. Anhand der anschließenden Schaltversuche konnte die Eignung der Transientenrekorder nachgewiesen werden. (J. Meisner, FB 2.3, jo-hann.meisner@ptb.de)

Bayessche Inferenz zur Charakterisierung komplexer Signale

Untersuchungen von digitalen Signalverarbeitungsmethoden deuten auf die Möglichkeit einer genaueren Rückführung von komplex verlaufenden elektrischen Signalen auf die SI-Einheiten hin. Dabei dient die Bayessche Inferenz als Werkzeug der Datenanalyse, mit dem z. B. Spektren genau ermittelt werden können. Die Genauigkeit eines solchen Verfahrens ist Gegenstand der aktuellen Untersuchungen. (W.G. Kürten-Ihlenfeld, FB 2.3, guilherme.ihlenfeld@ptb.de)

Erweiterung des Frequenzbereiches für das pulsgetriebene Josephson-AC-Spannungsnormal für beliebige Wellenformen

Der Frequenzbereich des pulsgetriebenen Josephson-AC-Spannungsnormal für die Erzeugung beliebiger Wellenformen wurde auf den Bereich 20 Hz bis 200 kHz erweitert. (O. Kieler, FB 2.4, oliver.kieler@ptb.de)

Josephson-Kontakte mit $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$ -Barrieren für das pulsgetriebene Josephson-AC-Spannungsnormal

Erste Schaltungen aus Josephson-Kontakten mit $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$ -Barrieren konnten für das pulsgetriebene Josephson-AC-Spannungsnormal hergestellt und erfolgreich getestet werden. (O. Kieler, FB 2.4, oliver.kieler@ptb.de)

Nano-SQUIDs mit sub- μm SNS-Josephson-Kontakten

In einer Kooperation mit der Universität Tübingen wurden verschiedene Mikro-SQUID-Schaltungen hergestellt. Die Josephson-Kontakte haben dabei Abmessungen von lediglich 200 nm x 200 nm. (O. Kieler, FB 2.4, oliver.kieler@ptb.de)

Hybride Supraleiter-Normalleiter(S/N)-Einzelelektronenfälle mit einem dissipativen Vorschaltelement

Mit dem Ziel, die intrinsische Leckrate eines hybriden Einzelelektronen-Turnstiles messtechnisch zu charakterisieren, wurde sein Einzelladungs-Schaltverhalten zeitaufgelöst untersucht. Für eine hybride Einzelelektronenfälle mit zwei Tunnelkontakten war die gemessene durchschnittliche Haltezeit – der Kehrwert der Leckrate des Turnstiles – bis zu 20 Sekunden lang. Das deutet auf eine effiziente Unterdrückung von parasitären Hintergrundeffekten durch den eigens dafür eingesetzten hochohmigen Mikrostreifen-Vorwiderstand hin. (S. Lotkhov, FB 2.4, sergey.lotkhov@ptb.de)

Entwicklung eines Nano-Mikrofons

Im Rahmen eines Verbundprojektes soll ein *Nano-Mikrofon* entwickelt werden, bei dem eine 1 nm dicke Kohlenstoff-Nanomembran (CNM) das empfindliche Diaphragma bildet. (T. Weimann, FB 2.4, thomas.weimann@ptb.de)

Stromquantisierung in kurzen Reihenschaltungen kleiner Josephson-Kontakte mit hochohmigen Vorwiderständen

Theoretisch sollte sich in kurzen Reihenschaltungen kleiner Josephson-Kontakte bei der Speisung durch Wechselspannung ein Plateau konstanten Stroms beobachten lassen. Es sollte, analog den Shapiro-Stufen konstanter Spannung beim Spannungsstandard, nur von der Frequenz der angelegten Wechselspannung abhängen. Um herauszufinden, ob und mit welchen realisierbaren Parametern diese Stufen beobachtbar sind, wurden Experimente und Simulationen durchgeführt. (F. Maibaum, FB 2.4, felix.maibaum@ptb.de)

Das Quanten-Ohm kommt aus der PTB

Auch mit der neuen Molekularstrahl-Epitaxie-Anlage ist die PTB weiterhin das einzige Metrologie-Institut, das Quanten-Hall-Effekt-Primärnormale herstellt. (K. Pierz, FB 2.5, klaus.pierz@ptb.de)

Die Rolle von Defekten in epitaktischem Graphen

Defekte wie Stufen und Korngrenzen können die Lebensdauer von Plasmonen in Graphen stark verkürzen. Dies zeigen Untersuchungen einer Forschungskoooperation der PTB und der Leibniz Universität Hannover. (H.W. Schumacher, FB 2.5, hans.w.schumacher@ptb.de)

Die natürliche Linienbreite von Kernresonanzspektren bei kleinen Feldern

Für die Untersuchung der Molekulardynamik in Flüssigkeiten mit der Kernresonanzspektroskopie muss man die natürliche Breite der Resonanzlinien ermitteln. Hierfür wurde ein neues Verfahren entwickelt, das mit einer Helmholtzspule in Kombination mit einer Erdfeldkompensation auskommt. Mit diesem relativ geringen Aufwand wurde die Breite der Protonenresonanzlinie von Wasser von etwa einem Achtel Hertz bestimmt. Durch aufwendigere Messungen mit einem supraleitenden Quanteninterferometer in einem magnetischen Abschirmraum wurde das Ergebnis bestätigt. (H. Harcken, L. Trahms, FB 2.5, 8.2, hans.harcken@ptb.de, lutz.trahms@ptb.de)

Einfluss von Bandmischung auf ein Transportphänomen

Valenzbandmischung in Halbleiternanostrukturen hat neben den bekannten Auswirkungen auf optische und magnetische Eigenschaften auch signifikanten Einfluss auf den elektrischen Transport: Neue Arbeiten haben gezeigt, dass die Mischung von leichten und schweren Lochbändern zu einer Umkehr von Fotoströmen führen kann. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

Umkehr von ultraschnellen Fotoströmen durch Intersubband-Streueffekte

Durch Anregung von Halbleiternanostrukturen mit einem Femtosekundenlaser wurden ultrakurze Stromimpulse erzeugt. Messungen der THz-Strahlung zeigen, dass die Streuung zwischen leichten und schweren Lochbändern in den Nanostrukturen zu einer Umkehr der Fotoströme führt. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)



Skalierbare quantisierte Ströme durch Parallelschaltung von Halbleiter-Einzelelektronenpumpen

Erstmals konnten drei Halbleiter-Einzelelektronenpumpen in einer Parallelschaltung mit demselben Modulationssignal betrieben werden. Damit wurde ein Konzept für die Erhöhung der Stromstärke quantisierter Ströme demonstriert, das Anwendung bei der Darstellung des Ampere gemäß der zu erwartenden neuen Definition finden soll. (B. Kästner, FB 2.5, bernd.kaestner@ptb.de)

Präzision des „Electron Counting Capacitance Standard“-Experiments weiter gesteigert

Die Anwendung von Einzelelektronen-Schaltungen für ein grundlegendes Experiment der elektrischen Quantenmetrologie basiert auf dem hochpräzisen Aufbringen einzelner Elektronen auf die Elektroden eines Kondensators mittels einer elektronischen Nanoschaltung. In der PTB ist es nun gelungen, die Präzision des Experiments weiter zu steigern: Die Unsicherheit des Transfers einzelner Ladungsträger konnte durch eine Verbesserung der Einzelelektronen-Schaltung deutlich verringert werden, und die Kapazität des Kondensators wurde mit hoher Präzision gemessen. (H. Scherer, FB 2.6, hansjoerg.scherer@ptb.de)

Josephson-Doppelpotentiometer für hochpräzise Widerstandsverhältnismessungen

Für Widerstandskalibrierungen wurde ein Josephson-Doppelpotentiometer entwickelt. Es ermöglicht hochpräzise Messungen von Widerstandsverhältnissen auf der Basis zweier Josephson Spannungsnormale bei einer automatisierten und sehr flexiblen Arbeitsweise. (F. Beug, FB 2.6, florian.beug@ptb.de)

Erste Anwendung des pulsgetriebenen AC-Josephson-Spannungsnormals

Als erste Anwendung des pulsgetriebenen AC-Josephson-Spannungsnormals „JAWS“ wurde ein Breitband-Verstärker charakterisiert. (D. Schleußner, FB 2.6, detlef.schleussner@ptb.de)

AC-DC-Kalibrierverfahren mit binären Josephson Schaltungen

Verschiedene Kalibrierverfahren für AC-DC-Transfermessungen mit binären Josephson-Schaltungen wurden im Rahmen des gemeinsamen europäischen Forschungsprojekts JOSY untersucht. (R. Behr, FB 2.6, ralf.behr@ptb.de)

Josephson-Impedanzmessbrücken

Erstmals wurde eine neuartige Josephson-Impedanzmessbrücke mit zwei binär geteilten Josephson-Schaltungen für flexible Impedanzmessungen entwickelt. (L. Palafox, FB 2.6, luis.palafox@ptb.de)

AC-Quanten-Hall-Widerstand noch besser als erwartet

Der mit Wechselstrom gemessene Quanten-Hall-Widerstand ist heute so präzise, reproduzierbar und zuverlässig wie das seit 1990 etablierte Gegenstück bei Gleichstrom, wie eine modellgestützte Analyse der Messdaten gezeigt hat. (J. Schurr, FB 2.6, juergen.schurr@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Verbesserung der Messmöglichkeiten bei Gleichstromstärken im Bereich 1 A bis 100 A

Zur Unterstützung der Forschung und Entwicklung im Bereich Energiemesstechnik ist die präzise Messung von Gleichstromstärken bis zu 100 A notwendig. Die bisher vorhandenen Messmöglichkeiten ließen dies nur eingeschränkt zu. Der Ersatz von Strommesswiderständen durch Gleichstromwandler erlaubte es nun, die Messunsicherheit um einen Faktor drei zu verbessern. (B. Schumacher, FB 2.1, bernd.schumacher@ptb.de)

Hochfrequenz-Streuparameter bis 325 GHz

Mit der Inbetriebnahme eines 4-Tor-Netzwerkanalysators bis 50 GHz sowie der Hohlleiter-Frequenzkonverter für den Frequenzbereich 50 GHz bis 325 GHz können in der PTB zukünftig Messungen von Hochfrequenz-Streuparametern bis 325 GHz durchgeführt werden. (T. Schrader, FB 2.2, thorsten.schrader@ptb.de)

Hochfrequenz-Leistungskalibrierung bis 50 GHz

Mit dem Aufbau und der Inbetriebnahme eines Hohlleitermikrokalorimeters für den Frequenzbereich 33 GHz bis 50 GHz und dem Aufbau eines Transfermessplatzes für das koaxiale Leitungssystem 2,4 mm können in der PTB zukünftig rückgeführte Kalibrierungen von Hochfrequenzleistungssensoren bis 50 GHz durchgeführt werden. (R. Judaschke, FB 2.2, rolf.judaschke@ptb.de)

Wie viel Energie aus Offshore-Anlagen kommt wirklich an?

Windkraft dort nutzen, wo der Wind am stärksten bläst – eine faszinierende Idee. Die ersten Offshore-Anlagen entstehen bereits, viele weitere sind geplant. Doch je weiter sie von der Küste entfernt liegen, desto drängender wird das Problem der möglichst verlustarmen Übertragung des Stromes. Auf weite Strecken geht das nur mit Gleichstrom. Um die unvermeidlichen Verluste auch hier genau zu erfassen und um für ein zukünftiges Netz von Gleichstrom-Übertragungswegen eine messtechnische Infrastruktur aufzubauen, ist jetzt ein europäisches Kooperationsprojekt gestartet, an dem eine Vielzahl von Metrologie-Instituten beteiligt ist. Der Startschuss dafür kam aus Braunschweig, von einer engen Kooperation der Technischen Universität (TU) und der PTB, die beide jetzt intensiv an dem neuen Projekt beteiligt sind. (M. Kurrat, Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen, Technische Universität (TU) Braunschweig, m.kurrat@tu-bs.de, W. Lucas, FB 2.3, wolfgang.lucas@ptb.de)

Optimierte programmierbare Spannungsnormal-Schaltungen als Ziel eines MNPQ-Projekts

Die Optimierung von 10-V-Schaltungen für programmierbare Josephson-Spannungsnormale ist das Ziel eines Projekts im MNPQ-Programm des BMWi. Verbesserungen des Designs und der Technologie sollen die Grundlage für ein kommerzielles Produkt schaffen. (J. Kohlmann, FB 2.4, johannes.kohlmann@ptb.de)

Charakterisierung der Zeitantwort von 110-GHz-Samplingszilioskopen

Mittels elektrooptischer Methoden konnte die komplette Zeitantwort eines 110 GHz-Samplingszilioskops in einem Zeitfenster von 100 ps charakterisiert werden. In der zugehörigen Unsicherheitsanalyse wurden erstmals Korrelationen berücksichtigt. (H. Füser, FB 2.5, heiko.fueser@ptb.de)

Integrierte induktive Referenzproben für den Nanomagnetismus

Im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts wurde ein neuer Typ von Referenzproben zur Messung der dynamischen Eigenschaften ferromagnetischer Dünnschichten hergestellt und durch vergleichende Messungen validiert. (H.W.Schumacher, FB 2.5, hans.w.schumacher@ptb.de)

Hochlinearer digitaler Spannungsrampengenerator zur Erzeugung von kleinsten Stromstärken – Technologietransfer-Projekt erfolgreich abgeschlossen

Im Rahmen des MNPQ-Programms des BMWi wurde ein hochlinearer digitaler Spannungsrampengenerator zur Serienreife entwickelt. Das in Kürze kommerziell erhältliche Gerät kann zur hochpräzisen Erzeugung von kleinsten Stromstärken im Bereich von etwa 100 pA bis 1 fA eingesetzt werden. (G.-D. Willenberg, FB 2.5, gerd-dietmar.willenberg@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Forschungsprojekt „Energy harvesting“

Im Rahmen des von der EU geförderten europäischen Metrologie-Forschungsprogramms EMRP wurde ein Projekt gestartet, das dazu beitragen soll, bisher ungenutzte Energieresourcen mittels spezieller Generatoren optimal auszunutzen („Energy harvesting“). Dazu werden neue Materialien und Mechanismen erforscht, u.a. im Bereich Nanotechnologien, und die Effizienz solcher Generatoren wird auf eine metrologisch abgesicherte Basis gestellt. (J. Melcher, FB 2.1, juergen.melcher@ptb.de)



Feldsensoren für den unteren Terahertz-Frequenzbereich

Um Feldstärkemessungen in Zukunft auch im immer stärker kommerziell genutzten Terahertz-Frequenzbereich durchführen zu können, wurden in der PTB Feldstärkesensoren für Frequenzen zwischen 40 GHz und 300 GHz entwickelt, hergestellt und charakterisiert. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

Projekt zur Feldexposition von Hautzellen im Terahertz-Frequenzbereich vor dem Abschluss

Das vom Bundesamt für Strahlenschutz geförderte Projekt „Gentoxische Effekte von Terahertz-Strahlung in vitro?“ steht kurz vor dem Abschluss. In dem interdisziplinären Vorhaben wurden Hautzelllinien mit Terahertz-Strahlung exponiert, um nach möglichen gentoxischen Effekten zu suchen. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

Lebensdauerprognose moderner Verbrauchszähler zur Ermittlung angemessener Eichgültigkeitsdauern

Für die Ermittlung einer angemessenen Eichgültigkeitsdauer sind Verfahren zur Prognose der Lebensdauer erforderlich, die den Aufbau und die Eigenschaften dieser Messgeräte sowie die Einflussmöglichkeiten auf das spezifische Alterungsverhalten berücksichtigen. (T. Almeroth, TU Ilmenau, tino.almeroth@tu-ilmenau.de, M. Kahmann, FB 2.3, martin.kahmann@ptb.de)

TET-Watt: Ein neues Konzept zur hochgenauen Darstellung elektrischer Leistung

In Zusammenarbeit zwischen dem Institut für theoretische Elektrotechnik (TET) und der PTB wurde ein neuartiges Konzept zur hochgenauen Darstellung elektrischer Leistung entwickelt, das den direkten Bezug einer Wechselgröße auf eine Gleichspannungsreferenz ermöglicht. Durch den verwendeten Kodier-Algorithmus können zudem hohe Genauigkeiten bei sehr niedrigen Schaltraten erreicht werden. (J. Wellmann, Institut für theoretische Elektrotechnik (TET), Universität Hannover, jan.wellmann@uni-hannover.de, M. Kahmann, FB 2.3, martin.kahmann@ptb.de)

Erweiterung des Stromstärkemessbereiches am Leistungsnormal auf 100 A

In das Leistungsnormal der PTB wurden zur Erweiterung des Stromstärkebereichs von 10 A auf 100 A ein neuer Stromverstärker und ein zusätzlicher Kaskadenstromwandler integriert. Damit wurde die Unsicherheit der Leistungsmessung im Strombereich von 10 A bis 100 A deutlich verringert. (E. Mohns, FB 2.3, enrico.mohns@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Europäische Roadmap zur Supraleiterelektronik

Eine im Rahmen des EU-Projekts S-PULSE erstellte Roadmap beschreibt den aktuellen Stand und die Perspektiven der Supraleiterelektronik in Europa. (J. Kohlmann, FB 2.4, johannes.kohlmann@ptb.de)



Chemische Physik und Explosionsschutz



Berichte der Abteilungen

BAM und PTB – gemeinsam für die Physikalisch-Chemische Sicherheitstechnik

Unter diesem Motto arbeiten die BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) und die PTB abgestimmt, aber mit eigenen Schwerpunkten, eng auf dem Gebiet des Brand- und Explosionsschutzes zusammen. Kernaufgaben sind die Beratung von Politik und Industrie, die Förderung der Wirtschaft durch international anerkannte Dienstleistungen und die Erarbeitung wissenschaftlicher Erkenntnisse auf dem Gebiet der physikalisch-chemischen Sicherheitstechnik. Das Ziel dieser Zusammenarbeit sind eine sichere Prozessführung und sichere Technik in einem sich ständig ändernden technischen und industriellen Umfeld.

Seit 1981 veranstalten BAM und PTB gemeinsam die Kolloquien zu Fragen der chemischen und physikalischen Sicherheitstechnik. Auch beim 12. Kolloquium dieser Reihe präsentierten beide Bundesinstitutionen am 15. und 16. Juni 2010 in der BAM in Berlin wieder aktuelle Entwicklungen und Forschungsergebnisse aus ihrem gemeinsamen Arbeitsbereich, zum Teil in gemeinsamen Darstellungen von BAM- und PTB-Autoren. Schwerpunkt der Vorträge war das Themenfeld „Zündquellen für explosionsfähige Gemische“. Neueste Erkenntnisse zu elektrischen Entladungen, zu Zündquellen in Brennstoffzellen, zu mechanisch erzeugten Zündquellen und heißen Oberflächen sowie zu Selbstentzündungsvorgängen bei Feststoffen wurden vorgestellt. Weiterhin wurden Explosionsauswirkungen diskutiert, die in mikrostrukturierten Reaktoren auftreten können oder bei Explosionsbelastungen von Gebäudestrukturen und Explosionsentlastungsvorgängen zu beachten sind. Aktuelle Informationen über Gaswarngeräte und die Präsentation der

gemeinsam von BAM und PTB betriebenen Datenbank CHEMSAFE rundeten die Veranstaltung ab. In zwei Tagen intensiver wissenschaftlicher und sicherheitstechnischer Diskussion wurde die große Bandbreite und technisch-wissenschaftliche Expertise von BAM und PTB auf dem Gebiet der physikalisch-chemischen Sicherheitstechnik deutlich.

Vergleichsmessungen zwischen den nach ATEX benannten Stellen und IECEx-Prüflaboratorien

Auch im Explosionsschutz nimmt die Bedeutung des internationalen Marktes immer mehr zu. Besonders die deutsche Industrie ist überdurchschnittlich stark involviert in den weltweiten Handel mit Geräten und Ingenieurdienstleistungen, dessen Grundlage möglichst vollständig harmonisierte ISO- und IEC-Normen, Zertifizierungsverfahren und staatliche Verordnungen sein sollten. Der Konvergenzprozess innerhalb der Normung muss aber zwecks nachhaltiger Umsetzung in die Praxis der Mess-, Prüf- und Bewertungstätigkeiten durch eine enge Kommunikation zwischen den benannten Stellen begleitet werden. Deswegen wurde im Jahr 2008 weltweit damit begonnen, ein umfangreiches systematisches Programm mit Vergleichsmessungen zwischen den benannten Stellen zu planen und umzusetzen. Gleichzeitig soll dabei ein Referenz-QM-Handbuch (ISO/IEC 17025, 17065) entstehen, mit dem Ziel, dass in Zukunft alle benannten Stellen nach denselben Regeln Geräte und Dienstleistungen zertifizieren.

Auf die Fachbereiche des Explosionsschutzes in der PTB kommt dabei praktisch die Rolle des weltweiten Koordinators bzw. die Funktion eines Referenzlaboratoriums zu. Das Programm der Vergleichsmessungen zielt auf die Messgrößen für den Explosionsdruck und die Eigensicherheit, die Anwendung der ISO/IEC 17043 „Proficiency Testing“ auf die Programme des Explosionsschutzes sowie auf die Entwicklung von Labornormalen zur Rückführung der Messgrößen für Explosionsdruck und Eigensicherheit. Ziel ist es, die Teilnahme an den Programmen zumindest im IECEx-System als Bedingung für die Ausstellung von IECEx-Zertifikaten festzuschreiben. Erste Ergebnisse aus den bereits laufenden Vergleichsmessungen werden für den Beginn des Jahres 2011 erwartet.

Titelbild:
Reibstift aus Titan zur Erzeugung mechanischer Funken nach einem Versuch in Argon-Atmosphäre



Neue Entwicklungen in der Zusammenarbeit der PTB mit anderen Zertifizierungsstellen

In Fragen der Sicherheit arbeiten die Kompetenzstellen international mit hoher Motivation zusammen, um ihre Erfahrungen auszutauschen und um die Einheitlichkeit in der Anwendung von Regelwerken in den weltweit über 50 Laboratorien sicherzustellen. Der wissenschaftlich-technische Erkenntnisstand im Fachgebiet des Explosionsschutzes wird daher vorzugsweise in internationalen ISO- und IEC-Normen niedergeschrieben. Die Regelwerke werden weltweit u. a. zur Durchführung von Konformitätsbewertungen an explosionsgeschützten Geräten angewendet. Underwriters Laboratories Inc. (UL) und die Physikalisch-Technische Bundesanstalt haben sich daher entschlossen, einige ihrer Fachexperten auf dem Gelände der PTB in einer gemeinsamen Arbeitsgruppe zusammenzufassen. Hauptsächlich die Konformitätsbewertungen auf der Basis der Normengruppe der IEC 60079-0 werden in gemeinsamen Teams durchgeführt. Es ist zu erwarten, dass dadurch das Qualitätsniveau der Konformitätsbewertungen hoch- und die Fehlerquote niedriggehalten werden können. Die Fachexperten von UL bearbeiten auch Konformitätsbewertungen nach NEC-Artikel 500/Divison 1 und 2, NEC-Artikel 505/Zone, Class I, II und III. Die deutschen Hersteller können durch die enge Zusammenarbeit von UL und PTB nun in Braunschweig sowohl Konformitätsbewertungen für den nordamerikanischen Markt als auch für den EU-Binnenmarkt erhalten. Dies stellt eine erhebliche Vereinfachung für den Zugang zu den wichtigsten Märkten dar. UL und PTB werden den Erfolg der engen Zusammenarbeit anhand von Kundenbefragungen überprüfen und voraussichtlich weiter ausbauen. Weitere Kompetenzstellen des Explosionsschutzes sind eingeladen, sich diesem Organisationsmodell anzuschließen.

Mikroverfahrenstechnik

In der chemischen Industrie werden seit einigen Jahren in den letzten Jahren in zunehmendem Maße Methoden der Mikroverfahrenstechnik eingesetzt. Der wesentliche Vorteil dieser Technik liegt in einer verbesserten Beherrschung der Reaktionsparameter, insbesondere der Temperaturführung. Das ist insbesondere dann wichtig, wenn als Oxidationsmittel reiner Sauerstoff, Distickstoffmonoxid oder ähnliche

Substanzen mit hohem Oxidationspotential eingesetzt werden.

Häufig wird dabei angenommen, dass mikroverfahrenstechnische Apparaturen wegen ihrer geringen inneren charakteristischen Abmessungen inhärent sicher gegenüber Zünddurchschlagvorgängen (Deflagrations- und Detonationsvorgängen) sind. Dass diese Annahme vor allem dann nicht zutrifft, wenn die gewünschten chemische Synthesen bei erhöhten Temperaturen und Drücken ablaufen und insbesondere wenn als Oxidator nicht Luft, sondern reiner Sauerstoff, Distickstoffmonoxid oder ähnliche Substanzen eingesetzt werden, haben u. a. Untersuchungen der BAM gezeigt. Wenn aufgrund der kleinen inneren Strukturen der Mikroapparatur eine Ausbreitung der Flammenfront in der Apparatur verhindert werden soll, ist zu klären, wie die charakteristischen Abmessungen der Einrichtung auszulegen sind. Daher müssen die charakteristischen Eigenschaften, die das Flammendurchschlagsverhalten von Brennstoff/Oxidator-Gemischen in mikrostrukturierten Bauteilen unter typischen Reaktionsbedingungen beschreiben, bekannt sein.

Zur Untersuchung der Durchschlagvorgänge in mikrostrukturierten Bauteilen wurden zwei Ansätze gewählt. Detonative Flammendurchschläge durch eine Einzelkapillare aus Edelstahl oder Glas mit einem für Mikroreaktoren typischen Durchmesser wurden messtechnisch verfolgt oder direkt beobachtet (vgl. Bild 1). Weiterhin wurden Reaktionscharakteristika wie Detonationsgeschwindigkeit, Detonationsdruck und Detonationszellbreite aus Detonationsdurchschlägen durch Rohre mit größeren Durchmessern (10 mm) ermittelt, um daraus sinnvolle Rückschlüsse auf das Verhalten in Kapillaren zu ziehen. Mit den nach diesen Ansätzen entwickelten Apparaturen sind Untersuchungen für Temperaturen bis 150°C, Ausgangsdrücke bis 20 bar und Oxidationsmittel mit hohem Oxidationspotential möglich.

Die Untersuchungen an unterschiedlichen Kohlenwasserstoff/Sauerstoff-Gemischen ergaben, dass Kapillarrohre unter Reaktionsbedingungen, wie sie in der Mikroreaktionstechnik häufig anzutreffen sind, auch bei Einsatz sehr geringer Rohrdurchmesser keinesfalls inhärent sicher gegen den Durchschlag einer Detonation sind. Die in den Glaskapillaren beobachteten Fortpflanzungsgeschwindigkeiten sind zwar



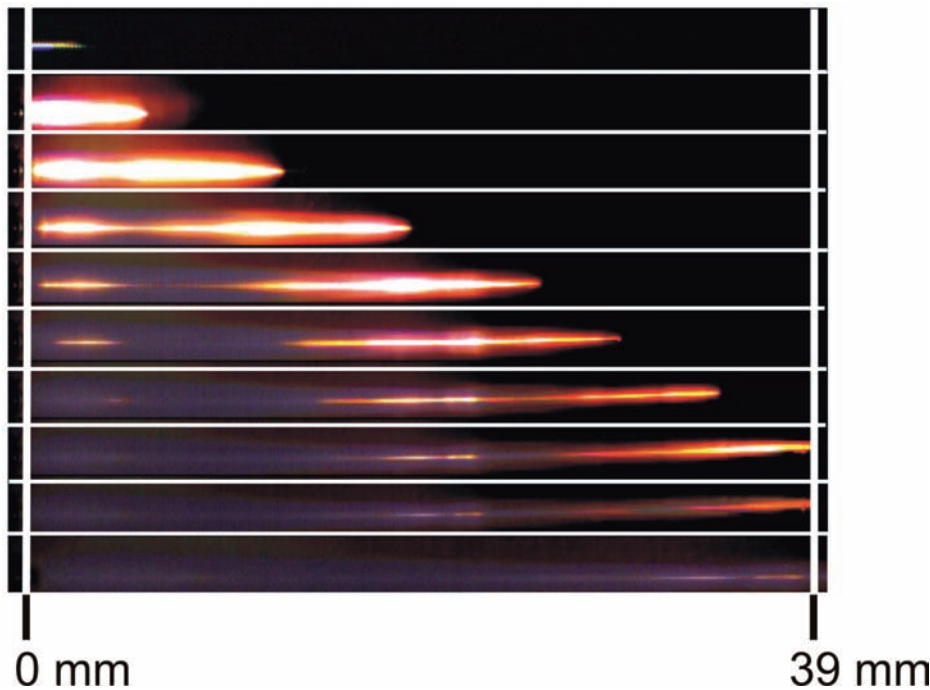


Bild 1: Durchschlag einer Ethan/O₂-Detonation bei 1 bar durch eine Glaskapillare mit dem Durchmesser 0,5 mm, dargestellt als 10 versetzte Einzelbilder (Δt : 37 μ s)

deutlich geringer als in Röhren mit größeren Durchmessern, liegen aber eindeutig im detonativen Bereich.

Die $\lambda/3$ -Regel, nach der der Rohr-/Kapillardurchmesser für einen erfolgreichen Zünddurchschlag mindestens $1/3$ der sog. Detonationszellbreite betragen muss, wurde bestätigt. Somit kann die Gefahr eines Zünddurchschlages durch mikrostrukturierte Bauteile entweder durch die Ermittlung der Breite der Detonationszellen unter Anwendung der $\lambda/3$ -Regel oder durch direkte Beobachtung des Durchschlagvorganges bei einer chemischen Reaktion beurteilt werden. Diese Ergebnisse stehen in guter Übereinstimmung mit Untersuchungen, welche die BAM an anderen Stoffsystemen erzielt hat.

Identifikation wirksamer Zündquellen einer PEM-Brennstoffzelle

In bestimmten Bereichen der Prozessindustrie kann die Einbindung von dezentralen Energieversorgungskonzepten sinnvoll sein. Dieser Markt kann durch ein Polymerelektrolytmembran(PEM)-Brennstoffzellensystem mit einer elektrischen Leistung im unteren Kilowattbereich bedient werden. Um diese innovative Technologie für den Betrieb innerhalb explosionsgefährdeter Betriebsstätten zu qualifizieren, ist auf Grundlage einer Zündgefahrenbeurteilung die Entwicklung eines Explosionsschutzkonzeptes notwendig. Im Folgenden wird auf mögliche Fehlerszena-

rien eingegangen, welche zu einer wirksamen Zündquelle für eine die Brennstoffzelle umgebende explosionsfähige Atmosphäre führen können.

Während des Betriebes sind die Komponenten einer Brennstoffzelle chemischen, thermischen und mechanischen Einflüssen ausgesetzt. Die Degradation der Materialien kann zur Aufhebung von sicherheitsrelevanten Funktionen führen. Beispielsweise ist bezüglich der Membran eine Riss- und Lochbildung möglich, so dass innerhalb der Brennstoffzelle die Gas-separation und die elektrische Isolation zwischen dem Anoden- und Kathodenraum nicht mehr gewährleistet sind. Über ihre Lebensdauer kann eine Brennstoffzelle nach den Maßstäben des Explosionsschutzes demnach nicht als inhärent sicher angesehen werden.

Bei Verlust der Separationsfunktion würden interne Leckagen zu einer direkten exothermen Umsetzung des sich bildenden Wasserstoff/Luft-Gemisches an den Katalysatorschichten des Energiewandlers führen. Des Weiteren kann eine inhomogene Stromdichteverteilung bei internem Kurzschluss der Elektroden oder der Separatorplatten zu einer Aufheizung der inneren Strukturen führen. Dies macht sich in einem Anstieg der Temperatur der äußeren Oberfläche und der abgeführten Prozessgase bemerkbar. Das Erwärmungsverhalten wird bezüglich dieser Fehlerszenarien als sicherheitskritisch eingeschätzt.



Als weiterer Fehlerfall wird das Umschalten einzelner Zellen eines Blocks in den Elektrolysebetrieb betrachtet. Dieser Zustand kann sich beispielsweise durch Verarmung der elektrochemisch aktiven Zonen an Prozessgasen aufgrund einer Blockade der Gaskanäle mit Produktwasser oder Fremdkörpern einstellen. Auch die elektrische Überlastung einzelner Membran-Elektroden-Einheiten bei inhomogener Leistungsfähigkeit von Einzelzellen durch beispielsweise unterschiedlich ausgeprägte Degradationsgrade innerhalb des Zellverbundes kann als Ursache genannt werden. Mit dem Umschalten einer Zelleinheit in den Elektrolysebetrieb geht eine Umkehr des Energieflusses einher. Die Zelle wird von einem Erzeuger elektrischer Energie zu einem elektrischen Verbraucher. Dabei wird das Erwärmungsverhalten durch die elektrische Leistungsaufnahme der fehlerhaften Zelle bestimmt. Hierbei werden die erreichbaren Temperaturwerte wieder als sicherheitskritisch eingeschätzt.

Bei Vorhandensein eines brennbaren Wasserstoff/Luft-Gemisches und heißer Oberflächen innerhalb eines Brennstoffzellenblocks sind innere explosionsartige Verbrennungsreaktionen prinzipiell denkbar. Unter den Prozessbedingungen während des Brennstoffzellenbetriebes wird jedoch die Zündwilligkeit eines Gemisches aufgrund der hohen Feuchte stark herabgesetzt. Das Auftreten einer wirksamen Zündquelle in Form eines Flammendurchschlags bzw. heißer Gase, welche aufgrund einer Explosion innerhalb der Brennstoffzelle durch die äußere Umschließung oder die Prozessgasauslässe entweichen, wird demnach als unwahrscheinlich eingeschätzt.

Bild 2 stellt das Ergebnis hinsichtlich einer Identifikation der als wirksam erachteten Zündquellen zusammenfassend dar. Die gestrichelt umkreisten Basisereignisse sind externer Natur und werden aus Gründen der Vollständigkeit mit aufgeführt.

Einrichtung einer DFG-Forschergruppe zur Untersuchung sicherheitstechnisch relevanter Zündprozesse

Die sicherheitstechnische Beurteilung von Explosionsgefährdungen ist von entscheidender Bedeutung für viele technische Prozesse. Neben einer Vermeidung explosionsfähiger Gemische steht dabei die Kenntnis möglicher Zündquellen im Vordergrund. Die Zündprozesse selbst laufen auf vielen verschiedenen Zeitskalen ab. Je nach Art der Zündquelle interagieren so unterschiedliche physikalische und chemische Prozesse. Dabei konkurriert die Wärmezufuhr durch die Zündquelle bzw. durch ablaufende chemische Reaktionen mit Wärmeverlusten vor allem durch Transportprozesse.

Aufgrund der Komplexität werden daher für eine praxisnahe sicherheitstechnische Beurteilung verschiedene empirisch ermittelte sicherheitstechnische Kenngrößen wie Zündtemperatur oder Mindestzündenergie verwendet. Diese hängen jedoch von der Art und Weise ihrer Bestimmung ab und sind oft auch nur für einen engen Anwendungsbereich verwendbar. Zur Unterstützung möchte die PTB daher Grundlagen für präzisere Sicherheitsbetrachtungen schaffen. Dazu werden im Rahmen einer durch die DFG eingerichteten Forschergruppe zusammen mit Partnern vom Karlsruher Institut für Technologie sowie der Univer-

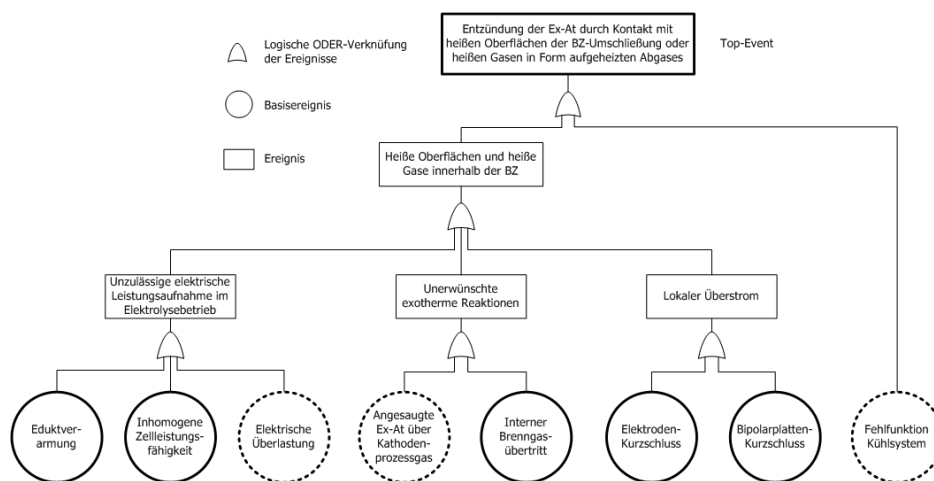
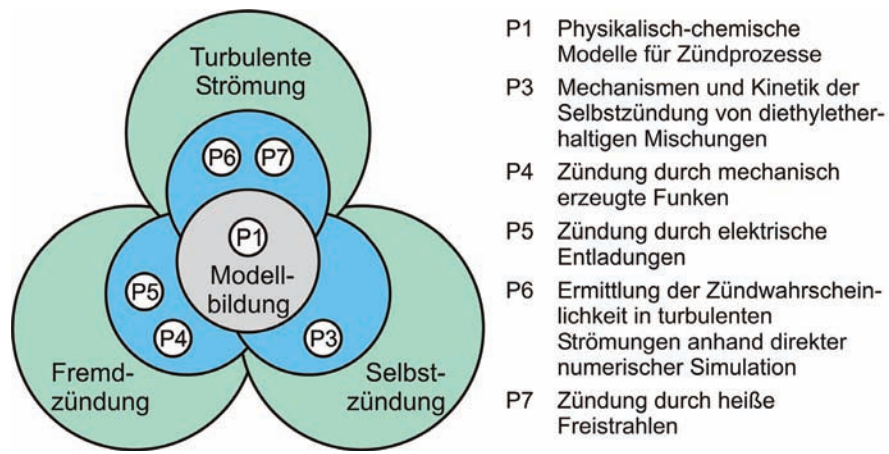


Bild 2: Fehlerbaum bezüglich wirksamer Zündquellen einer PEM-Brennstoffzelle

Bild 3: Übersicht über die DFG-Forschergruppe FOR 1447



sität Magdeburg sicherheitstechnisch relevante Zündvorgänge untersucht. Ziel ist es dabei, ein umfassendes numerisches Modell zu entwickeln, welches die physikalischen und chemischen Prozesse exakt beschreibt und somit auf Modellannahmen verzichtet.

Wie in Bild 3 dargestellt, werden in der Forschergruppe durch moderne experimentelle und numerische Verfahren verschiedene Zündquellen behandelt. Darüber hinaus wird auch der Einfluss turbulenter Strömungen auf die Zündprozesse durch direkte numerische Simulation sowie durch eine statistische Beschreibung der Turbulenz untersucht. Die PTB wird in zwei Projekten die Zündung durch elektrische Entladungen sowie durch heiße Freistrahlen experimentell mittels laserspektroskopischer Verfahren untersuchen.

Zündwirksamkeit mechanisch erzeugter Kurzzeit-Reibfunken

Als mechanisch erzeugte Zündquellen gelten durch Reib- oder Schlagvorgänge entstandene abgetrennte Partikel erhöhter Temperatur bzw. Funken und ggf. zusätzlich entstehende heiße

Oberflächen (s. Bild 4). Für die Entstehung von Funken existieren – abhängig von deren Entstehungsmechanismus – jeweils einige Grenzwerte, die jedoch bisher nicht vergleichbar waren. Daher wurden die Funkenentstehung sowie insbesondere die Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Reib- und Schlagfunken gegenüber explosionsfähigen Wasserstoff/Luft-Gemischen unter möglichst ähnlichen Randbedingungen verglichen und deren Unterschiede und Gemeinsamkeiten aufgezeigt.

Während für die Entstehung zündfähiger Schlagfunken eine Mindestschlagenergie von 3 Nm notwendig ist, gilt für Reibfunken eine maximale Relativgeschwindigkeit von 1,0 m/s, unterhalb der bei üblichen Stahlwerkstoffen keine Funken oder heiße Oberflächen entstehen. Für Schlagfunken bei homogenen Werkstoffkombinationen aus ferritischem Stahl existieren für alle Referenz-Brenngas/Luft-Gemische bestimmte Zündwahrscheinlichkeiten.

Die Zündwirksamkeit von Kurzzeit-Reibfunken und Schlagfunken in Wasserstoff/Luft- sowie Ethen/Luft-Gemischen wird unter vergleichbaren Bedingungen mit homo-

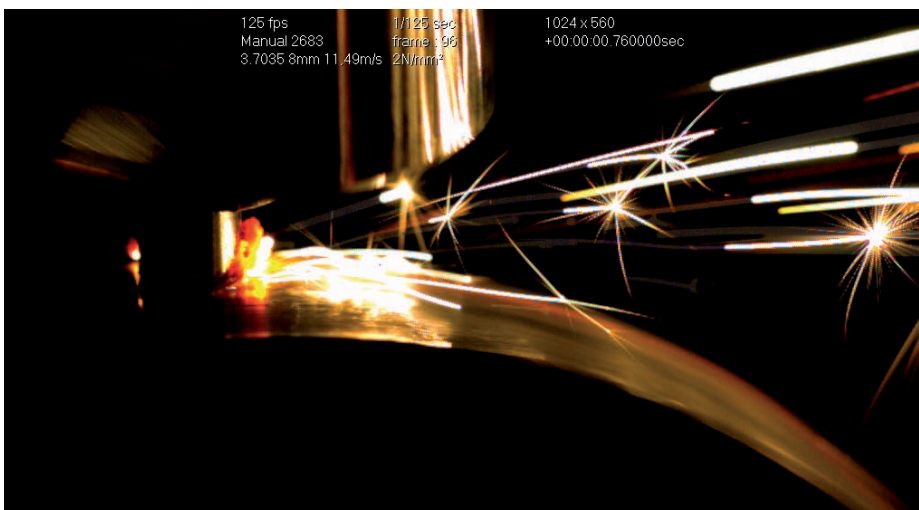


Bild 4: Entstehung mechanisch erzeugter Zündquellen in Reibsituationen

genen Werkstoff-Kombinationen unlegierter Stähle untersucht. Nach bereits 0,1 s werden Kurzzeit-Reibfunken erzeugt, die ein Brenngas/Luft-Gemisch mit hohem Sauerstoff-Anteil zünden können. Höhere Brennstoffkonzentrationen dagegen erhöhen die Zündwirksamkeit der heißen Oberfläche und verhindern die Vergleichbarkeit der Schlag- und Kurzzeit-Reibfunken. Temperaturmessungen ergaben bei beiden Funken erzeugenden Prozessen, dass zur Bildung von Funken eine Mindesttemperatur von 400 °C bis 500 °C notwendig ist. Schlagfunken sollten mit Hilfe des Energiekriteriums, Reibfunken mit Hilfe des Leistungskriteriums bewertet werden. Eine einheitliche Bewertung ist jedoch nicht sinnvoll.

Zündung durch Streamerentladungen

Transiente Überspannungen bei Verwendung von umrichtergespeisten drehenden elektrischen Maschinen können zu Streamerentladungen führen, die ein explosionsfähiges Gemisch entzünden können. Anders als bei elektrischen Funken, bei denen im Wesentlichen nur der Temperaturanstieg im Funkenkanal zu einer Zündung führt, liegen bei Streamerentladungen Nichtgleichgewichtsplasmen vor. Bei der Verwendung von gerade zur Zündung ausreichenden Energien führen Streamerentladungen daher nur zu einem geringen Temperaturanstieg im Gasvolumen. Jedoch wird in Wasserstoff/Luft-Gemischen durch Elektronenstoßdissoziation atomarer Sauerstoff und Wasserstoff gebildet. Diese Radikale können in den einleitenden Kettenverzweigungsreaktionen dazu führen, dass sich trotz der geringen Erwärmung eine sich selbst erhaltende Flammenfront bilden kann.

Durch die experimentelle Untersuchung der Zündung durch Streamerentladungen zusam-

men mit numerischen Simulationen werden Kriterien für Zündung bzw. Nicht-Zündung erarbeitet. Zeitlich und örtlich aufgelöste Messungen der laserinduzierten Fluoreszenz von OH-Radikalen ermöglichen detaillierte Aussagen über die Flammenausbreitung sowie über die Flammengeschwindigkeiten. Bild 5 zeigt die Zündung eines Wasserstoff/Luft-Gemisches (25 Vol.% Wasserstoff) durch 30 Schwingungszyklen bei einer verwendeten Hochspannung von 11 kV. Die Teilbilder in Bild 5 wurden aus drei verschiedenen Experimenten erhalten. Wie in Bild 5 zu erkennen ist, erfolgt bei Verwendung der genannten elektrischen Parameter die Zündung direkt an der Spitze der Elektrode. Danach ist eine kugelförmige Flammenausbreitung zu beobachten.

Bei einem einzelnen Zündversuch werden vier Bilder der OH-Fluoreszenz erhalten. Dadurch ist nicht nur eine Reduzierung der notwendigen Experimente möglich. Auch Schwankungen der Zündinduktionszeit können so berücksichtigt werden. Die Messungen ermöglichen die Bestimmung der Mindestzündenergiedichte. Durch einen Vergleich mit numerischen Berechnungen können so Informationen über die Erwärmung durch Streamerentladungen sowie über gebildete Mengen atomaren Sauerstoffs und Wasserstoffs erhalten werden.

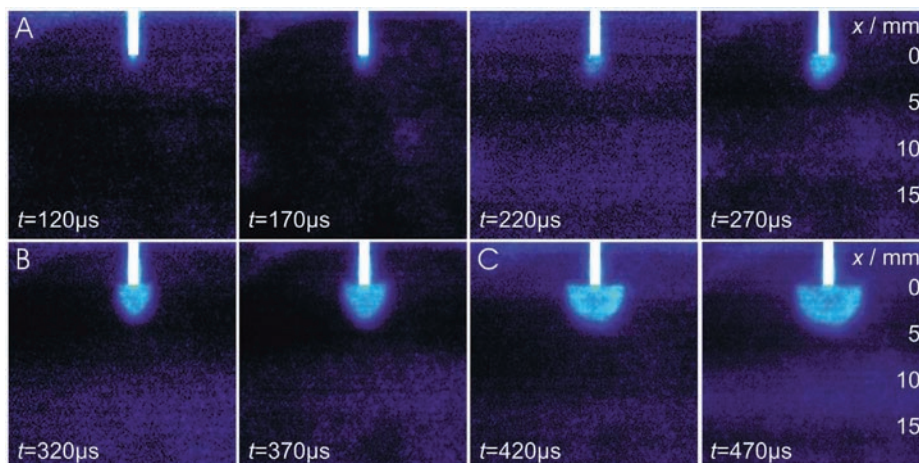


Bild 5: Bildsequenz der OH-Fluoreszenz aus drei Experimenten nach Zündung durch Streamerentladungen (Teilbild 1 bis 4: Exp. A; Teilbild 5 und 6: Exp. B; Teilbild 7 und 8: Exp. C)

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Molare Masse von hochangereichertem Silizium mit einer relativen Unsicherheit von $7 \cdot 10^{-8}$ bestimmt

Im Rahmen des Projektes zur Neubestimmung der Avogadro-Konstante konnte mit Hilfe der Plasma-Massenspektrometrie ein neues Präzisionsmessverfahren zur Bestimmung der Isotopenhäufigkeit von Siliziummaterialien realisiert werden. (A. Pramann, FB 3.1, axel.pramann@ptb.de)

Bestimmung von Wachstumshormon im Serum: Vergleichsmessung zweier NMI-Laboratorien

Das Protein Wachstumshormon wird in der PTB mit Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie (IDMS) im Serum bestimmt. Dieses im Rahmen des europäischen Metrologieforschungsprogramms Clinbiotrace in der PTB entwickelte Verfahren wurde erfolgreich mit einer alternativen IDMS-Methode, die kürzlich im Laboratorium des LGC in England entwickelt wurde, verglichen. (C. Arsene, FB 3.1, cristian.arsene@ptb.de)

Messaufbau für die SI-rückgeführte Messung der elektrolytischen Leitfähigkeit wässriger Lösungen im Bereich unterhalb 10 mS / m

Im Rahmen des Europäischen Metrologieforschungsprogramms mit dem Schwerpunkt Gesundheit entwickelt die AG 3.13 einen Messaufbau, mit dem die elektrolytische Leitfähigkeit von wässrigen Elektrolytlösungen im Bereich zwischen $5,5 \mu\text{S} / \text{m}$ (Reinstwasser) und $10 \text{ mS} / \text{m}$ erstmals primär auf das SI rückgeführt gemessen werden kann. (P. Spitzer, FB 3.1, petra.spitzer@ptb.de)

Metrologie an Biokraftstoffen

Im Rahmen des Europäischen Metrologieforschungsprogramms EMRP, mit dem Schwerpunkt Energie, werden in Abteilung 3 Messungen von Dichte, Viskosität und Heizwert von Biokraftstoffen durchgeführt und Rückführungen für diese Messungen auf das SI entwickelt. Ebenso werden elektrochemische Untersuchungsmethoden und Verfahren zur Herkunftsanalyse von Biokraftstoffen mittels Isotopenanalysen entwickelt. (H. Wolf, FB 3.3, henning.wolf@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Bestimmung der elastischen Konstanten von Kolben-Zylinder-Systemen mithilfe der resonanten Ultraschall-Spektroskopie

Die Messung hoher Drücke mithilfe von Kolbenmanometern erfordert eine genaue Kenntnis der druckbedingten elastischen Verformung von Kolben und Zylinder. Zur Ermittlung der elastischen Konstanten der für Kolbenmanometer verwandten Wolframkarbid-Materialien wurde die resonante Ultraschall-Spektroskopie als zerstörungsfreies Analyseverfahren mit wesentlich kleinerer Messunsicherheit als etablierte statische Spannungs-Dehnungsverfahren eingesetzt. (Ahmed Salama, FB 3.3, ahmed.d.salama@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Entzündung von Wasserstoff/Luftgemischen durch Streamerentladungen

Bei elektrischen Geräten mit kurzfristigen hochfrequenten Überspannungen infolge von Schaltvorgängen muss die Zündfähigkeit von Streamerentladungen an den spannungsführenden Teilen betrachtet werden. (T. Langer, FB 3.7, tim.langer@ptb.de)



Zündwirksamkeit mechanisch erzeugter Kurzzeit-Reibfunken

Als mechanisch erzeugte Zündquellen gelten durch Reib- oder Schlagvorgänge entstandene abgetrennte Partikel erhöhter Temperatur bzw. Funken und ggf. zusätzlich entstehende heiße Oberflächen. Für die Entstehung von Funken existieren – abhängig von deren Entstehungsmechanismus – jeweils einige Grenzwerte, die jedoch bisher nicht vergleichbar waren. Ziel dieser Untersuchung war es, die Funkenentstehung sowie insbesondere die Zündwirksamkeit von mechanisch erzeugten Reib- und Schlagfunken gegenüber explosionsfähigen Wasserstoff/Luft-Gemischen unter möglichst ähnlichen Randbedingungen zu vergleichen und deren Unterschiede und Gemeinsamkeiten aufzuzeigen. (F. Welzel, FB 3.7, felix.welzel@ptb.de)

Untersuchungen zur Wicklungstemperaturbestimmung an frequenzumrichter gespeisten Maschinen während des Betriebes

Für den Schutz elektrischer Maschinen vor unzulässigen Erwärmungen, z.B. infolge von Überlastung, ist es erforderlich, die Temperaturen während des Betriebes zu überwachen. In einer ersten Untersuchung sollte geklärt werden, ob es prinzipiell möglich ist, die Temperatur einer Asynchronmaschine über die Auswertung der Oberschwingungsimpedanz zu bestimmen. (C. Lehrmann, FB 3.7, christian.lehrmann@ptb.de)

Wirkungsgradbestimmung an (explosionsschutzten) elektrischen Maschinen – eine Übersicht

Unter den Aspekten der in der Zukunft durch die EU-Verordnung 640/2009 geforderten Mindestwirkungsgrade für neu in Verkehr gebrachte elektrische Maschinen kommt der Wirkungsgradbestimmung mit möglichst geringen Unsicherheiten eine immer größer werdende Bedeutung zu. In der Arbeitsgruppe 3.72 (Explosionsschutzte elektrische Antriebssysteme) wurden hierzu detaillierte Untersuchungen zum Einfluss der Messunsicherheiten der verwendeten Messmittel auf den ermittelten Maschinenwirkungsgrad mittels des Verfahrens nach GUM durchgeführt. (C. Lehrmann, FB 3.7, christian.lehrmann@ptb.de)

Untersuchungen zur Zündfähigkeit von Teilentladungen an Wicklungen von Hochspannungsmaschinen

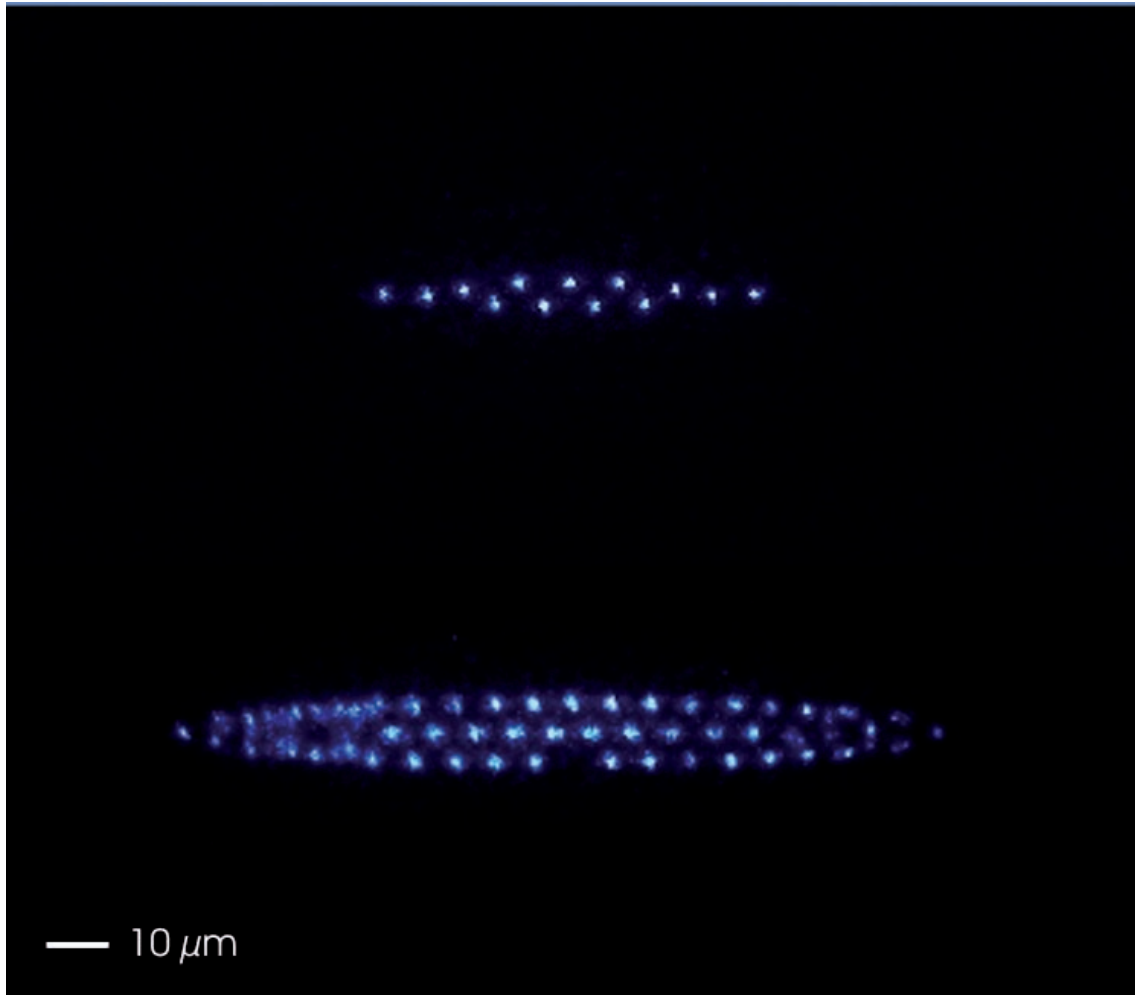
Für explosionsgeschützte elektrische Betriebsmittel in der Zündschutzart Erhöhte Sicherheit "e" müssen Zündquellen auch im Inneren des Gerätes vermieden werden. Eine potentielle Zündquelle ist die elektrische Entladung. Hochspannungsmaschinen können bis zu einer Bemessungsspannung von 11 kV ausgelegt werden. Die Norm EN 60079-7 fordert zur Beurteilung von elektrischen Maschinen > 1kV die Prüfung der Ständerwicklung im zündfähigen Gas/Luftgemisch. (F. Lienesch, FB 3.7, frank.lienesch@ptb.de)

Vermeidung von Tankstellenbränden

Das Betanken von Kraftfahrzeugen an Tankstellen ist sehr sicher. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass es in Ausnahmefällen während des Betankens zu Entzündungen von Kraftstoffdämpfen am Tankstutzen kommt. In diesem Fall ist Besonnenheit das oberste Gebot. Wer in Panik das noch laufende Zapfventil aus der Tanköffnung reißt, setzt mit großer Wahrscheinlichkeit das eigene Auto, die Tankstelle oder umstehende Personen in Brand. Da sich in letzter Zeit leider mehrere solcher Unfälle ereignet haben, möchte die PTB Ratschläge für das richtige Verhalten bei derartigen Situationen geben. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)







Die Abteilung *Optik* stellt – aufbauend auf drei der sieben Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems (SI), nämlich Länge, Zeit und Lichtstärke – Einheiten dar, gibt sie auf unterschiedlichen Wegen weiter und betreibt dazu Forschung und Entwicklung für höchstgenaue Normale und Messmethoden. Somit sind die Aufgaben der Abteilung *Optik* der PTB im Wesentlichen den metrologischen Aufgabenfeldern *Länge und dimensionelle Metrologie*, *Zeit und Frequenz* und *Radiometrie und Photometrie* zuzuordnen. Die Abteilung *Optik* bearbeitet diese Aufgabenfelder in ihren fünf Fachbereichen *Photometrie und angewandte Radiometrie*, *Bild- und Wellenoptik*, *Längeneinheit und Quantenoptik*, *Zeit und Frequenz* und *Optische Technologien*. Dabei teilt sich die Abteilung *Optik* die PTB-Aufgaben in der *Radiometrie* mit der PTB-Abteilung *Temperatur und Synchrotronstrahlung* und im Aufgabenfeld *Länge und dimensionelle Messtechnik* mit der PTB-Abteilung *Fertigungsmesstechnik*. Die Aufgaben in *Zeit und Frequenz* deckt die Abteilung *Optik* vollständig ab, arbeitet aber in der Spitzenforschung sehr intensiv mit dem Center for Quantum Engineering and Space-Time Research (QUEST), dem Exzellenzcluster an der Leibniz Universität Hannover, zusammen, mit dem sie vor kurzem auch das *QUEST-Institut an der PTB* mit einer gemeinsamen Professur auf dem Campus der PTB eingerichtet hat.

Die verstärkte Zusammenarbeit in der Forschung und Entwicklung auf internationaler Ebene (z. B. im Europäischen Metrologie-Forschungsprogramm EMRP), mit den Universitäten in Deutschland (z.B. mit den regionalen Universitäten von Hannover und Braunschweig) und der deutschen und europäischen Industrie haben in den letzten Jahren zu einem gesteigerten Drittmittelaufkommen und einem erhöhten Anteil temporärer Mitarbeiter in der Abteilung *Optik* geführt. Neben 82 Mitarbeitern

Titelbild:

(oben) Kette von einzelnen $^{172}\text{Yb}^+$ -Ionen, die für Ihre Nutzung in optischen Frequenznormalen in der PTB untersucht werden. Die elektrostatische Abstoßung der positiv geladenen Ionen führt zu einer Zick-Zack-Anordnung des Ionenkristalls entlang der Fallenmitte.

(unten) Coulomb-Kristall mit $^{172}\text{Yb}^+$ -Ionen. Die dunkle Fehlstelle entspricht einem sich in einem metastabilen Zustand befindenden Ion, welches vom Laserlichtfeld entkoppelt ist.

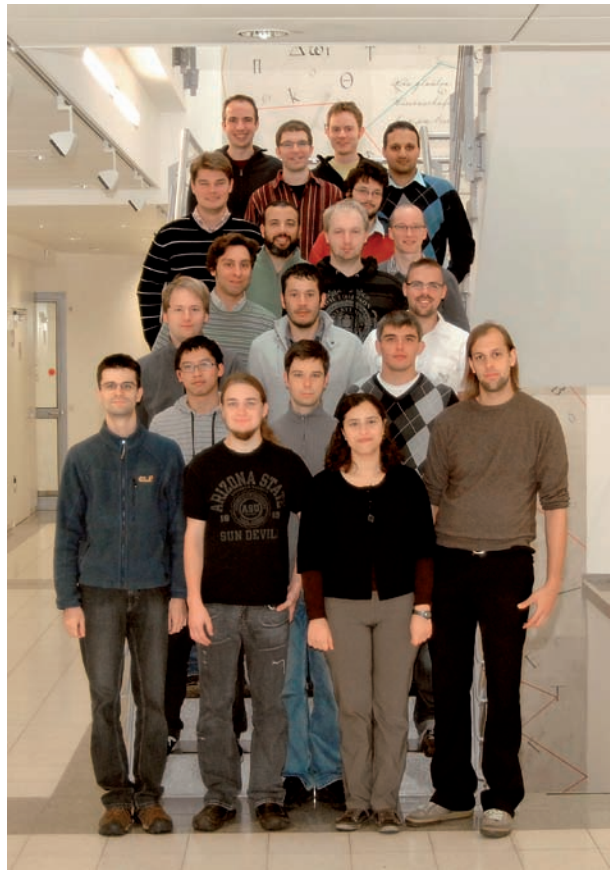


Bild 1: In Projekten der Abteilung *Optik* und dem QUEST-Institut an der PTB arbeiteten Ende 2010 26 junge Forscher an ihrer Doktorarbeit. 1. Reihe von vorne links: Börge Hemmerling, Sebastian Häfner (Master Student), Sana Amairi, Florian Gebert. 2. Reihe: Yong Wan, Jonas Keller, Nils Huntemann. 3. Reihe: Karsten Pyka, Oscar Andrey Herrera Sancho, Max Kahmann. 4. Reihe: Christian Hagemann, Oliver Appel. 5. Reihe: Waldemar Schmunk, Alaa Eldin Abd El Mageed, Stefan Vogt, Thomas Middelman. Letzte Reihe: Tobias Klein, Christoph Böker, André Zschenker, Osama Terra. Auf dem Bild fehlen: Jannes Wübbena, Tatsiana Atamas, Wenke Yang, Oleg Bucicov, Katharina Predehl, Michaela Schuster.

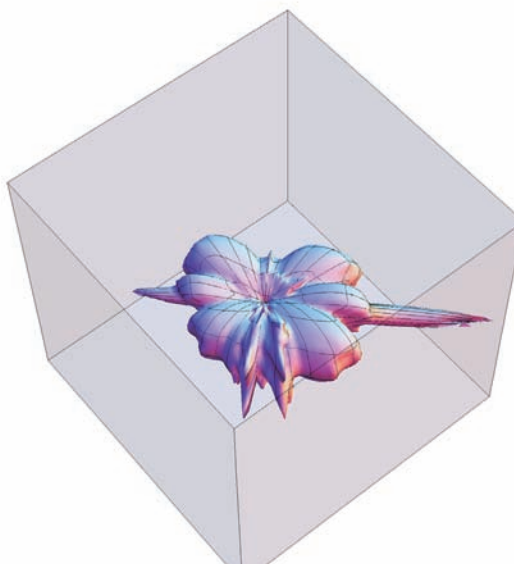
auf Planstellen gibt es gegenwärtig fast 50 temporäre Mitarbeiter. So arbeiteten Ende 2010 in der Abteilung *Optik* einschließlich des *QUEST-Instituts* 24 Doktoranden und Doktorandinnen (Bild 1) und zwei außerhalb der PTB an ihrer Dissertation, während es zum Vergleich vor neun Jahren noch 12 waren (s. Jahresbericht 2001, Bild 5).

Einige der wichtigsten Entwicklungen und Fortschritte im Jahr 2010 in den Arbeitsschwerpunkten der Abteilung *Optik* und des *QUEST-Instituts an der PTB* werden im Folgenden nach Schwerpunkten gegliedert vorgestellt.

Licht genauer messen und bewerten

Die Arbeitsschwerpunkte im Fachbereich *Photometrie und angewandte Radiometrie* sind die Entwicklung von angepassten Messverfahren für die Photometrie neuartiger Lichtquellen, die Spektroradiometrie von Strahlern im Spektralbereich 200 nm bis 2500 nm und die Metrologie von Solarzellen. In jedem dieser Gebiete wurden im Jahr 2010 besondere Ergebnisse erzielt.

Für die Photometrie neuartiger Lichtquellen hat die PTB in den vergangenen Jahren ein neuartiges Roboter-Goniophotometer entwickelt, bei dem ein Roboterarm die zu untersuchende Lichtquelle trägt und zwei andere Roboterarme mit verschiedenen Detektoren die von dem Prüfling ausgehende Strahlung charakterisieren. Nach abgeschlossener Validierung durch Vergleich mit dem früheren kardanischen Goniophotometer der PTB wird seit Beginn des Jahres 2010 das Roboter-Goniophotometer für den regulären Kalibrierbetrieb zur fundamentalen Realisierung und Weitergabe der Einheit des Lichtstroms (Lumen) eingesetzt (s. Nachrichten aus der Abteilung). Die erreichte Genauigkeit bei der Messung und Kalibrierung erfordert jetzt, dass auch die Streulichtanteile von den Wänden und Einbauten des Goniophotometer-Messraums quantitativ erfasst werden, die sonst die Messung um bis zu einem Promille verfälschen können. Bild 2 zeigt den gemessenen Verteilungskörper der Streuleuchtdichte bei der Messung eines Normals (1000-W-Halogenlampe). Dieser Anteil, der von den Eigenschaften der zu messenden Lampe oder Leuchte abhängt, wird neuerdings



durch jeweils ein eigenes Streulichtphotometer an den Photometerarmen ermittelt und korrigiert, was die erreichte Unsicherheit an dieser Messeinrichtung weiter verbessert.

Neuartige Strahlungsquellen für den blauen und ultravioletten Spektralbereich haben wachsende Verbreitung in neuen Anwendungsbereichen, wie Härten von Kunststoffen oder der Entkeimung von Wasser, wo hohe Bestrahlungsstärken im UV benötigt werden. Damit einher gehen gesteigerte Anforderungen an die Messtechnik im kurzwelligen Bereich des Spektrums. Die spektral aufgelöste Radiometrie (Spektroradiometrie) wird oft mit Messeinrichtungen durchgeführt, bei denen PTFE-beschichtete Ulbrichtkugeln zur Strahlhomogenisierung benützt werden. Diese neigen im Ultravioletten allerdings zur Fluoreszenz (Bild 3) und können damit die Messungen wesentlich verfälschen. In der PTB wurde jetzt ein einfaches Verfahren gefunden, mit dem durch Bestrahlen und Erhitzen der Ulbrichtkugel die störende Fluoreszenz ausgeschaltet werden kann. Obwohl die Fluoreszenz des PTFE-Materials mit der Zeit wieder zunimmt, steht damit jetzt eine Methode zur Verfügung, mit der mögliche Fehler bei der Kalibrierung erkannt und vermieden werden können.

Um die Vorteile von Laserstrahlung für genauere Messungen und schnellere Kalibrierungen auch für die Photometrie zu nutzen, ohne ihre Nachteile beizubehalten, hat die PTB in den vergangenen Jahren eine Messeinrichtung TULIP (TUNeable Lasers In Photometry) aufgebaut und kontinuierlich weiterentwickelt. Damit konnte in einer jetzt abgeschlossenen Arbeit gezeigt werden, wie die spektrale Bestrahlungsstärke von Normallampen mit durchstimmbaren Lasern auf Empfängernormale zurückgeführt werden kann, ohne den bisher benutzten Schwarzen Strahler als primäres Normal zu nutzen. Da insbesondere im kurzwelligen Spektralbereich Hochtemperaturhohlraumstrahler eine vergleichsweise geringe optische Strahlungsleistung abgeben,

Bild 2: Gemessene Verteilung der Leuchtdichteverteilung, die durch Streuung von den Wänden und Einbauten im Goniophotometer-Messraum entsteht, mit seiner Lage im Messraum. (Kubus des Messraums nicht maßstäblich und ohne Details).

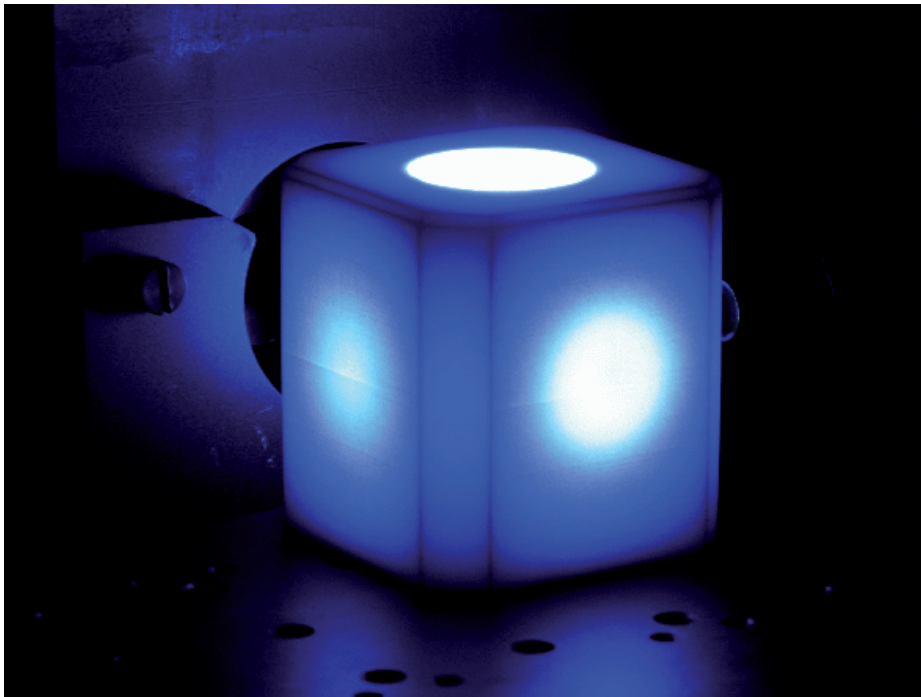


Bild 3: PTFE-Ulbrichtkugel unter UV-Bestrahlung

hat die neue Methode das Potenzial, dort die Messunsicherheit deutlich zu verringern.

Durch die Förderung nachhaltiger und umweltfreundlicher Energieerzeugung kommen auch auf die Solarzellenmetrologie neue Anforderungen zu. Der optische Wirkungsgrad von Solarzellen ist dabei wichtige Kenngröße und wirtschaftliches Argument zugleich. Oft werden in der PTB kalibrierte Referenzsolarzellen auch unter Außenbedingungen benutzt. Untersuchungen in der PTB haben allerdings gezeigt, dass durch die Winkelabhängigkeit der im Außenbereich vorhandenen diffusen Strahlung Fehler von bis zu 10 % auftreten können, die bei Standardtestbedingungen weitgehend vermieden werden.

Ein Arbeitsschwerpunkt im Fachbereich *Optische Technologien* liegt in der Metrologie zur Reflexion und Transmission makroskopischer und mikroskopischer Materialien. Mit der stetig zunehmenden Verbreitung von Effektpigmentbeschichtungen, bei denen die Farbe des reflektierten Lichtes vom Winkel der Beleuchtung und der Beobachtung oder Beleuchtung abhängt, ergeben sich neue Herausforderungen an die optische Metrologie und Rückführung. Um dem gerecht zu werden, wurde ein neuer robotergestützter Appearance-Messplatz entwickelt (Bild 4), bei dem Einfallswinkel und Reflexionswinkel der Strahlung und die Probenorientierung unabhängig eingestellt und die Reflexionseigenschaften spektral abhängig untersucht werden können. Die Ortsauflösung auf der Probe liegt hierbei unter 30 μm und ist

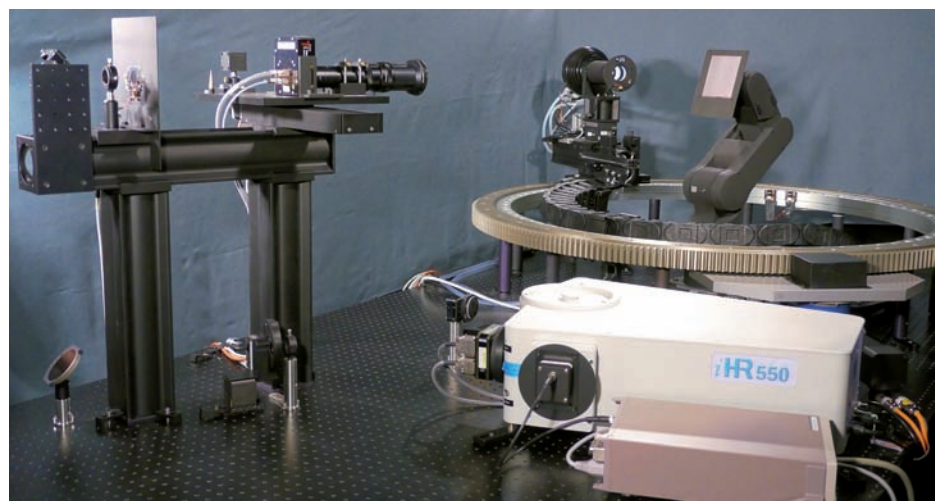


Bild 4: Neuer Messplatz der PTB für die Messung der „optischen Appearance“



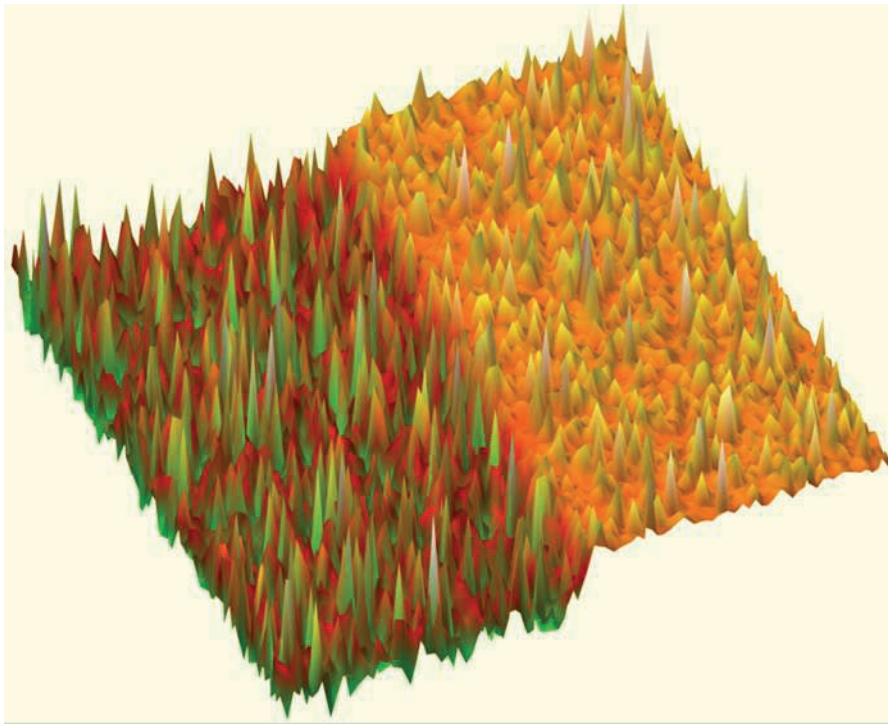


Bild 5: Leuchtdichte einer Oberfläche mit Effektpigment aus Calcium-Aluminium-Borosilikat-Plättchen auf schwarzem (linke Hälfte) und weißem Untergrund (rechte Hälfte) in Falschfarbendarstellung. Die logarithmische Farbcodierung entspricht Leuchtdichten zwischen 15 cd/m^2 (grün) und 1500 cd/m^2 (hellgelb).

daher besonders für die Mikrooptik prädestiniert.

Bild 5 zeigt die ortsaufgelöste Leuchtdichte einer effektpigmentierten Oberfläche, die auf unterschiedlicher Unterlage (schwarz/weiß) appliziert ist. Die nadelförmigen Bereiche mit erhöhter Leuchtdichte zeigen das Glitzern der Effektpigmente, was zu einem optischen Eindruck wie bei einem funkelnden Sternenhimmel führt. Mit der Fähigkeit, subjektive visuelle Wahrnehmungen quantitativ metrologisch zu erfassen und mit der mikroskopischen Struktur zu korrelieren, besteht in Zukunft die Mög-

lichkeit, sie zukünftig auch zu erklären und weitergehend auch vorherzusagen.

Metrologie mit Licht – Messtechnik vom „Feinsten“

Eine stetige Herausforderung an die Metrologie mit Licht stellen die immer kleineren Strukturen dar, die mit optischer Strahlung aufgelöst werden müssen. Um mit dem kontinuierlichen Fortschritt in der Nanometrologie Schritt halten zu können, werden sowohl in der Produktion als auch in der Messtechnik immer kürzere Wellenlängen verwendet. In der PTB wurde dazu ein neues optisches Mikroskopiesystem



Bild 6: Aufbau des 193-nm-Mikroskops der PTB

entwickelt, mit dem bei einer Arbeitswellenlänge im tiefen ultravioletten Spektralbereich quantitative Messungen für gegenwärtige und zukünftige Lithografieverfahren bei 193 nm durchgeführt werden (Bild 6). Mit seiner hohen lateralen Auflösung und den flexiblen Beleuchtungs- und Abbildungsoptionen wird das Mikroskopiesystem die Anforderungen z.B. in der Maskenmetrologie für aktuelle und zukünftige Lithografieschritte erfüllen können.

Die Anforderungen an die optische Formmessung von Spiegeln, Freiformflächen oder Asphären mit immer größeren Durchmessern erfordern zukünftig Unsicherheiten von Sub-Nanometern an optischen Oberflächen mit geringer Rauigkeit und großer lateraler Ausdehnung. Zur quantitativen Charakterisierung von optischen Referenzflächen mit Durchmessern bis zu einem Meter z.B. in Interferometern oder in abbildenden Systemen hat die PTB zwei neue optische Einrichtungen für die höchstgenaue Ebenheitsmessung installiert (s. Abb. 4 im Jahresbericht 2009 und Bild 7). Zwei unterschiedliche Anordnungen werden erforderlich, da die Form der Prüflinge sich im Schwerfeld der Erde lageabhängig ändert. Nach der Validierung können im Jahr 2011 erste Messungen für Kunden durchgeführt werden.

Genauere Zeit für jedermann

Mit dem Einheiten- und Zeitgesetz hat die PTB die Aufgabe, die gesetzliche Zeit in Deutschland darzustellen und Zeit und Frequenz in geeigneter Form weiterzugeben. Diese Aufgaben werden in den Fachbereichen *Zeit und Frequenz* und *Längeneinheit und Quantenoptik* bearbeitet. Die PTB trägt maßgeblich zur koordinierten internationalen Zeitskala UTC bei und realisiert die deutsche Zeitskala UTC(PTB). Seit dem Jahr 2010 wird UTC(PTB) direkt von einem kurzzeitstabilen Wasserstoffmaser abgeleitet, dessen Frequenz an die jeweils beste Caesium-Atomuhr der PTB, z. B. CSF1, angekoppelt wird. Damit wird die Zeitskala der PTB sowohl bei kurzen als auch bei langen Mittelungszeiten stabiler als je zuvor.

Die PTB gibt Zeit und Frequenz je nach Genauigkeitsansprüchen über Internet, das Telefonnetz, Langwellensender und Satelliten weiter. Ein besonderes Potenzial für höchste Ansprüche an Genauigkeit und Stabilität bietet auch die Weitergabe über Glasfasern. Untersuchungen auf dem Campus der PTB Braunschweig zeigten, dass die Zeitinformation zwischen verschiedenen Laboratorien der PTB mit einer Unsicherheit von weniger als 100 Piko-sekunden weitergegeben werden kann. Damit können insbesondere Satellitenzeitvergleiche genauer werden, bei denen die Sende- und Empfangsantennen von den primären Uhren räumlich getrennt sind.

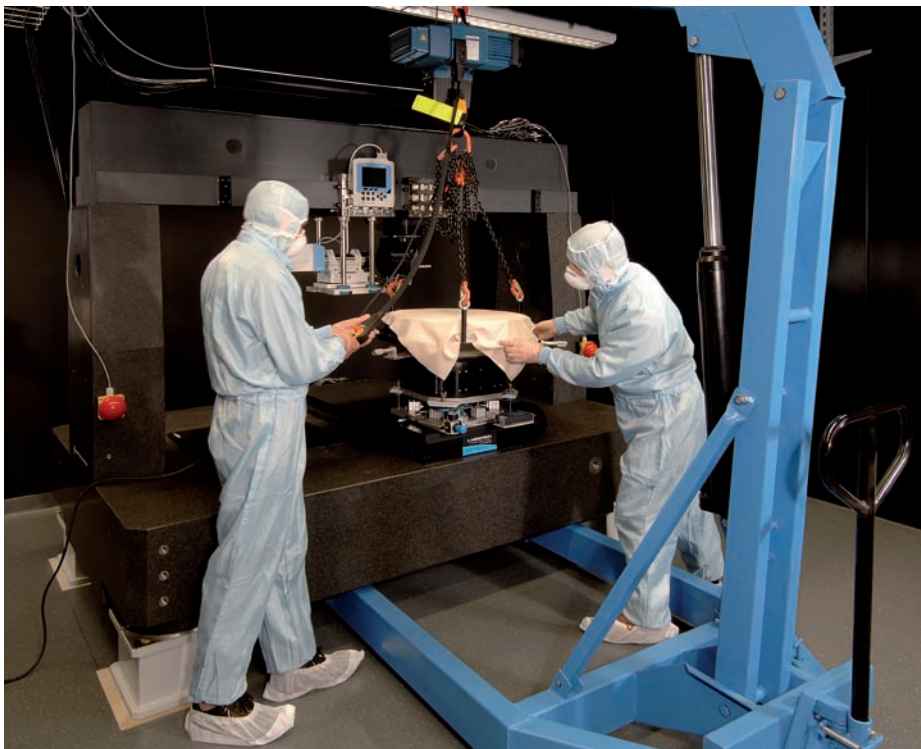


Bild 7: Einbringen eines Prüflings in das deflektometrische Messsystem für ebene Spiegel mit großem Durchmesser

Die aufgebaute Glasfaserverbindung zwischen der PTB und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching wurde als weltweit erste phasenkohärente Langstreckenverbindung für die Metrologie charakterisiert. Es wurde jetzt nachgewiesen, dass damit die Frequenzen hochstabiler Laser und optischer Uhren schon in einer Mittelungszeit von einer Sekunde mit einer relativen Unsicherheit von $3 \cdot 10^{-14}$ verglichen werden können. Die Verbindung wurde für erste Kalibrierungen im Mikrowellen- und optischen Spektralbereich genutzt. An dieser Faserstrecke wurde im Jahr 2010 auch erstmals eine Verstärkungsmethode untersucht, bei der die Brillouin-Verstärkung in der Faser selbst ausgenutzt wird, um größere Distanzen rauscharm ohne zusätzliche Verstärker zu überbrücken.

Atomuhren – immer genauer mit immer neuen Anwendungen

Atomuhren stellen gegenwärtig die genauesten Messgeräte dar und gleichzeitig wird ihre Genauigkeit stetig verbessert. Dies geschieht sowohl bei den Caesiumatomuhren, die als primäre Uhren die SI-Einheit Sekunde realisieren, als auch bei den optischen Atomuhren. Bei diesen wird die Frequenz höchststabiler Laser auf Übergänge in einzelnen gespeicherten Ionen oder in Wolken von neutralen Atomen stabilisiert. Da bisher noch nicht klar ist, welche der beiden Ansätze zukünftig die besten Uhren liefern wird, werden in der PTB beide Ansätze mit der Ytterbium-Einzelionenuhr und der Stronti-

um-Neutralatom-Gitteruhr verfolgt. Die Frequenz der Strontium-Gitteruhr wurde durch Vergleich mit der Caesiumfontänenuhr gemessen und zeigt gute Übereinstimmung mit den weltbesten Strontium-Frequenznormalen.

Bei der Ytterbium-Einzelionenuhr wurde neben dem Quadrupolübergang der optischen Atomuhr der ultraschmale Oktupolübergang charakterisiert, wobei gezeigt werden konnte, dass die ungestörte Übergangsfrequenz mit einer relativen Unsicherheit unter 10^{-15} realisiert werden kann. Eine weitere Steigerung der Genauigkeit ist möglich, wenn das Verfahren der sogenannten Hyper-Ramsey-Anregung zur Unterdrückung der Lichtverschiebung genutzt wird. Diese neue Methode war in einer Gemeinschaftsanstrengung zwischen dem Institut für Laserphysik in Novosibirsk, dem amerikanischen Staatsinstitut NIST und der PTB kürzlich entwickelt worden. Beide optischen Atomuhren haben als sekundäre Realisierungen der Sekunde das Potenzial, die Atomzeitskalen zu verbessern und eine zukünftige Neudefinition der Sekunde vorzubereiten, die erforderlich wird, weil die optischen Uhren die besten Caesiumatomuhren hinsichtlich Genauigkeit und Stabilität übertreffen.

Die stetig steigende Genauigkeit optischer Uhren führt zu neuen Einsatzgebieten, von denen zwei Beispiele genannt seien: Bei einer relativen Unsicherheit von $1 \cdot 10^{-16}$ werden optische Uhren schon auf Änderungen

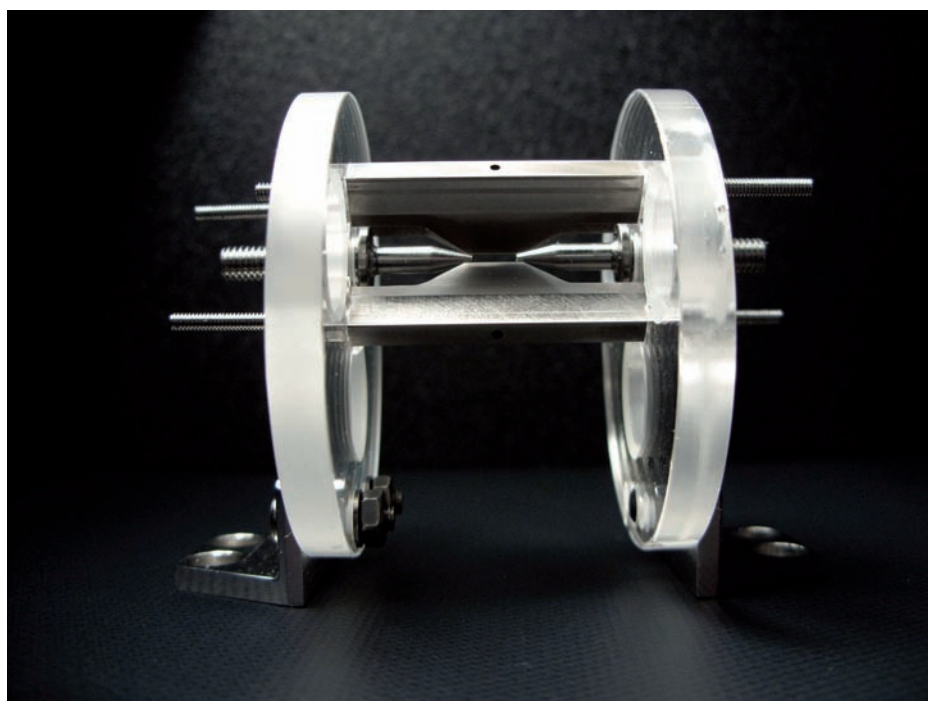


Bild 8: Lineare Ionenfalle für die zukünftige Aluminium-Ionenuhr, die im QUEST-Institut an der PTB entwickelt wird

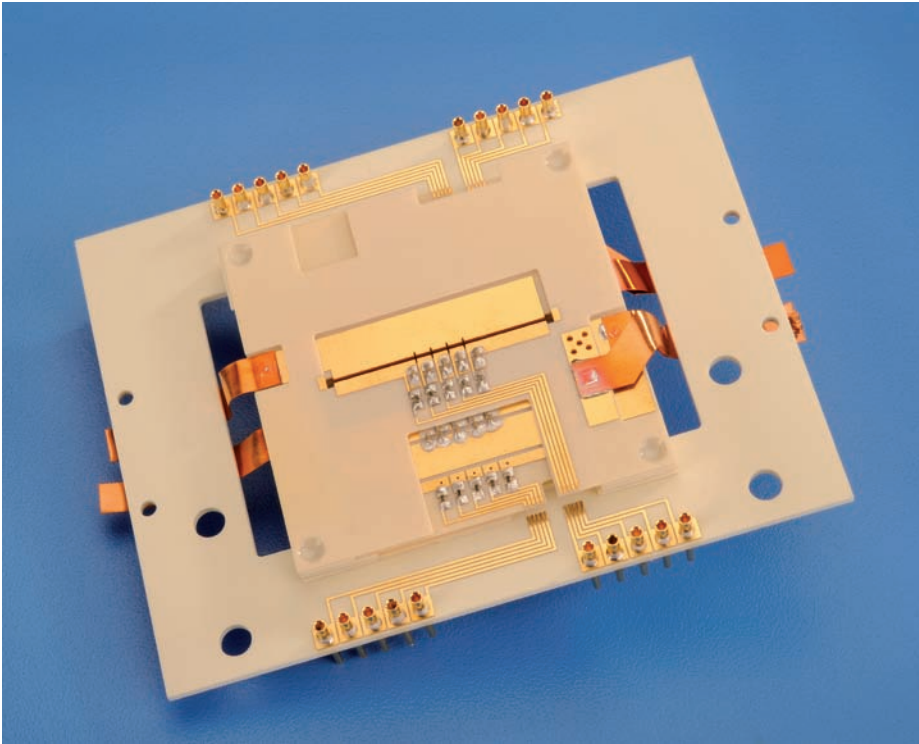


Bild 9: Lineare Ionenfalle („Chipfalle“) bestehend aus vier Platinenlagen. Die Ionen (siehe Titelbild) werden im 1 mm breiten, laserschnittenen Spalt in der Mitte der Platinenstruktur gefangen.

des Gravitationspotenzials empfindlich, die einer Höhendifferenz von einem Meter entsprechen. Dies verspricht für Untersuchungen in der Geophysik interessant zu werden. Das Frequenzverhältnis der beiden Übergänge im Ytterbiumion ist ein sehr empfindlicher Indikator für mögliche zeitliche Änderungen von Fundamentalkonstanten, die von praktisch allen Theorien gefordert werden, die allgemeine Relativitätstheorie und Quantentheorie verbinden wollen. In diesen Forschungs- und Technologiefeldern wie der Entwicklung optischer Uhren für Weltraumanwendungen arbeitet die PTB sehr eng mit der universitären Forschung zusammen. Bei dieser Forschung und Entwicklung erhält die PTB wesentliche Unterstützung z. B. durch QUEST, wo neue Konzepte wie die Aluminium-Quantenlogik-Uhr (Bild 8) oder Multionenuhren (Bild 9) entwickelt werden. Die gleichzeitige parallele Abfrage von vielen Ionen (Titelbild) soll dabei ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis liefern.

Quantenoptik – an den Grenzen der Optik

In der Metrologie werden in immer weiteren Bereichen die prinzipiellen, durch die Quantenmechanik gegebenen Grenzen erreicht, die die Empfindlichkeit der Messungen begrenzen. So sind die besten Caesiumfontänenuhren heute schon durch das durch die Atomzahl gegebene Quantenprojektionsrauschen in ihrer Stabilität

begrenzt, und auch in der Lichtmessung sind diese Grenzen für die Messtechnik relevant. Andererseits kann die unterschiedliche Photonstatistik von Einzelphotonenquellen, wie sie für die Quantenkryptografie benötigt werden, oder von abgeschwächter Laserstrahlung die Detektionseffizienz von Einzelphotonendetektoren beeinflussen. Die PTB hat dazu im Rahmen von extern geförderten Forschungsprojekten Einzelphotonenquellen untersucht. Hierbei zeigt eine auf Stickstoff-Fehlstellen basierende Einzelphotonenquelle sowohl eine hohe Photonenrate von über $10^6/s$ bei einer Bandbreite von 75 nm als auch ein besonders ausgeprägtes sogenanntes Antibunching, d. h. es wird immer nur ein Photon zur gleichen Zeit emittiert.

Für die Spektroskopie bisher schwierig zu kühlender Ionen wurde im *QUEST-Institut an der PTB* ein einzelnes Magnesium-Ion in einer optischen Falle eingefangen und mittels Laserkühlung (Bild 10) in den Bewegungsgrundzustand gebracht. Mit diesem Ion können dann andere Ionen mit komplizierter Niveaustuktur mit den Methoden der Quantenlogik gekühlt und manipuliert werden (s. Jahresbericht 2009). Damit werden zukünftig auch andere Spezies für die Spektroskopie zugänglich. Im Fachbereich *Quantenoptik und Längeneinheit* konnte jetzt die Erzeugung des erstmalig in der PTB erzeugten ^{40}Ca Bose-Einstein-Kondensats (Bild 11) wesentlich vereinfacht werden. Dies war eine

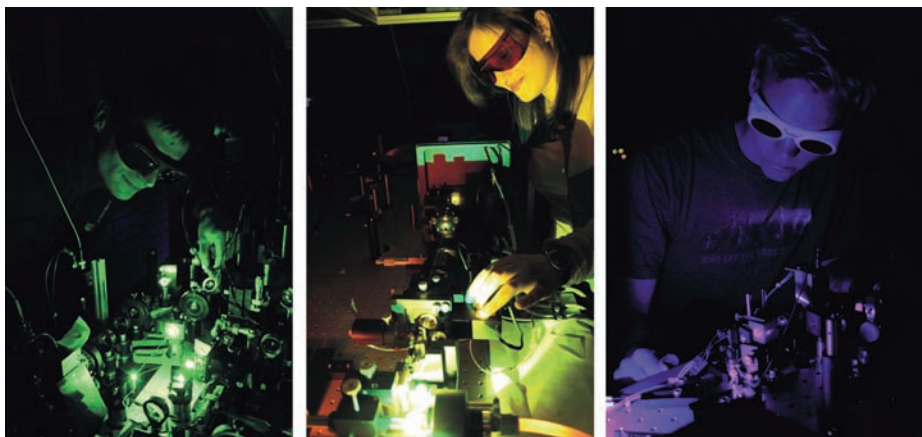


Bild 10: Die Manipulation der inneren und äußeren Freiheitsgrade einzelner Ionen wird durch Laser mit verschiedenen Wellenlängen des optischen Spektrums durchgeführt.

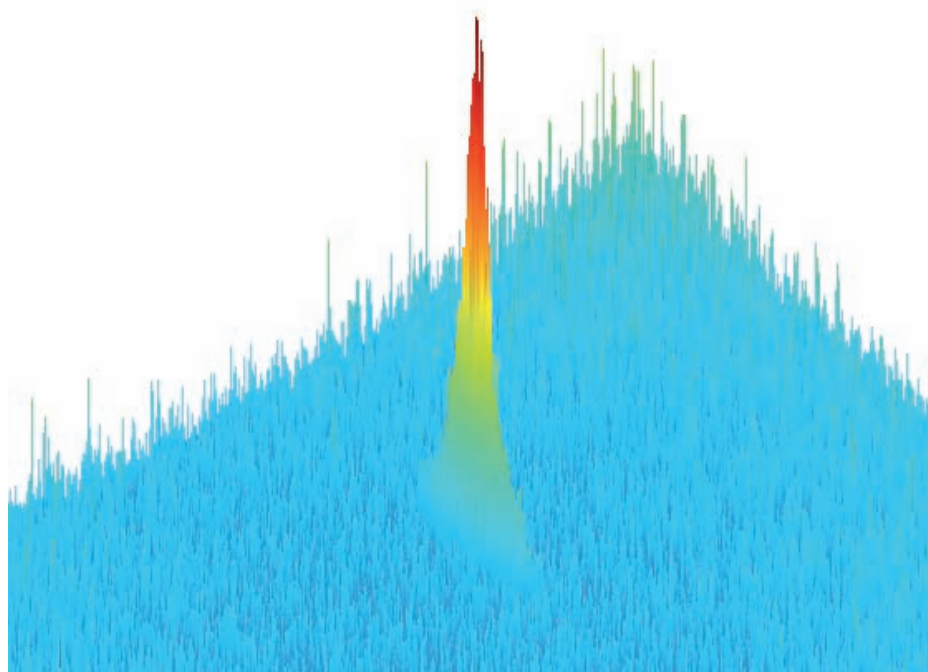
Vorbedingung, um die schmalen optischen Interkombinationsübergänge in Calcium für neuartige Anregungen des ultrakalten Quantengases anzuwenden.

Technologieentwicklung und -transfer

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der Abteilung *Optik* führten im Jahr 2010 zum Abschluss von verschiedenen Technologietransferprojekten; drei davon waren durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert worden. Dazu gehörte ein Verfahren zur Bestimmung der Winkelabhängigkeit des Farbortes von farbigen und weißen Leuchtdioden unterschiedlicher Hersteller für die Qualitätssicherung bei ihrer Nutzung in optischen Systemen. Daneben wurde ein in der PTB erfundenes Verfahren für die hochgenaue Messung der Form optischer Oberflächen zu einem Industriepartner transferiert und der kommerziellen Nutzung zugeführt. In einem dritten Projekt wurde ein hochstabiles trans-

portables Lasersystem mit einer Wellenlänge bei $1,5 \mu\text{m}$ für den Einsatz in Industrie und Forschung entwickelt und weitergegeben, dessen Kurzzeitstabilität eine Größenordnung besser ist als bei Mikrowellenoszillatoren. Ebenso wurde an das Kontrollzentrum des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo in Oberpfaffenhofen ein Referenzuhrenensemble übergeben, mit dessen Hilfe die Systemzeit für Galileo erzeugt wird.

Bild 11: Gemessene Dichteverteilung in einem Bose-Einstein-Kondensat aus Calciumatomen



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Ein neues Verfahren zur spektralen Bestrahlungsstärke-Kalibrierung von Lampennormalen

Am Messplatz TULIP (Tuneable Lasers in Photometry) wurde erfolgreich demonstriert, dass die spektrale Bestrahlungsstärke-Kalibrierung von Lampennormalen grundsätzlich auch mithilfe eines Lasersystems ohne einen Hochtemperatur-Hohlraumstrahler rückgeführt werden kann. Basis für alle Messungen bleibt dabei das Kryoradiometer, das nationale radiometrische Strahlungsempfängernormal für optische Strahlungsleistung. Die neue Methode hat das Potenzial, die Messunsicherheit insbesondere im kurzwelligen Spektralbereich zu verringern. (K. Stock, FB 4.1, klaus.stock@ptb.de)

Fluoreszenz bei PTFE-beschichteten Ulbrichtkugeln und Rezepte zur Beseitigung ihres Einflusses

In spektrometrischen Messeinrichtungen werden oft PTFE-beschichtete Ulbrichtkugeln als Eingangsoptik verwendet. Es hat sich gezeigt, dass PTFE-Ulbrichtkugeln zu Fluoreszenz im Wellenlängenbereich 270 nm bis 365 nm neigen. Durch Erhitzen und Bestrahlung konnte die Fluoreszenz deutlich reduziert bzw. sogar komplett ausgelöscht werden. Obwohl dieser Zustand nicht langzeitstabil ist, steht damit eine Methode zur Verfügung, um mögliche Fehler durch die Fluoreszenz bei der Kalibrierung zu vermeiden. (S. Pape, FB 4.1, sven.pape@ptb.de)

Vereinfachte Erzeugung eines Calcium-Bose-Einstein-Kondensats

Nachdem es 2009 in der PTB weltweit erstmals gelungen ist, ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC) aus Erdalkali-Atomen, in unserem Fall ^{40}Ca , herzustellen, wurde dieses Jahr die Erzeugung optimiert und vereinfacht. Es ist jetzt möglich, ein BEC in einer einfachen optischen Dipolfalle zu erzeugen. Damit werden jetzt die sehr schmalen optischen Interkombinationsübergänge in Calcium für präzise Untersuchungen der optischen Anregungen eines ultrakalten Quantengases anwendbar. (S. Kraft, FB 4.3, sebastian.kraft@ptb.de)

Neues Verstärkerkonzept für die Langstreckenübertragung von optischen Frequenzen an einer 480-km-Faserstrecke verifiziert

Eine alternative Verstärkermethode, die Faser-Brillouin-Verstärkung, wurde erstmalig für die Übertragung optischer Frequenzen eingesetzt und an einer 480-km-Faserstrecke des Deutschen Forschungsnetzes (DFN) experimentell untersucht. Im Vergleich zu konventionellen Verstärkern können mit der neuen Technik größere Distanzen rauscharm überbrückt werden. (G. Grosche, FB 4.3, gesine.grosche@ptb.de)

Monte-Carlo-Simulationen zur Berechnung der Messunsicherheit von Kugelinterferometern

Für das internationale Avogadro-Projekt (IAC) ist die interferometrische Bestimmung des mittleren Durchmessers von Silizium-Kugeln von entscheidender Bedeutung. Speziell entwickelte, neuartige Strahlverfolgungsalgorithmen liefern in Monte-Carlo-Simulationen Unsicherheitsangaben für die eingesetzten Kugelinterferometer der PTB und des japanischen Staatsinstituts NMIJ. (B. Andreas, FB 4.3, birk.andreas@ptb.de)

Transportabler, resonatorstabilisierter 1,5- μm -Laser

Im Rahmen eines vom BMWI geförderten Technologietransfers (MNPQ-Projekt) wurde ein Prototyp eines hochstabilen, transportablen Lasersystems für eine Wellenlänge von 1,5 μm entwickelt. Das komplette System besteht aus einem kommerziell erhältlichen Faserlaser, Referenzresonator und Elektronik und ist in ein 19-Zoll-Einschubsystem integriert. Das Lasersystem erreicht mit $\sigma_y(1\text{s}) < 5 \cdot 10^{-15}$ eine mehr als 10fach bessere Kurzzeitstabilität als derzeit zur Verfügung stehende Mikrowellenoszillatoren und soll als optischer Lokaloszillator in Industrie und Forschung eingesetzt werden. (T. Legero, FB 4.3 thomas.legero@ptb.de)

Frequenzvergleich hochstabiler Laser mit einer 900 km langen Glasfaser

Glasfaserverbindungen erlauben den Vergleich optischer Uhren mit bisher unerreichter Stabilität und Genauigkeit. Im vergangenen Jahr wurde eine Glasfaserstrecke zwischen der PTB in Braunschweig und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching in Betrieb genommen und charakterisiert. Erste Ergebnisse an dieser 900 km langen optischen Verbindung zeigen, dass es möglich ist, die Frequenzen hochstabiler Laser mit einer Kurzzeitstabilität von $\sigma_y(\tau) \leq 3 \cdot 10^{-14} \text{ s}/\tau$ miteinander zu vergleichen. (H. Schnatz, FB 4.3, harald.schnatz@ptb.de)

Entfernung der Metallkontamination auf Siliziumkugeln

Die Nickel- und Kupferkontamination der 1-kg-Kugeln aus angereichertem Si-28 des Avogadroprojekts wurde mit Hilfe einer speziellen Ätzmischung entfernt. Die danach manuell nachpolierten Kugeln haben eine so gut wiederhergestellte Oberflächenqualität, dass die Oxidschichtanalyse und die interferometrische Volumenmessung mit den angestrebten Messunsicherheiten möglich sind. (P. Becker, FB 4.3, peter.becker@ptb.de)

Kampf dem thermischen Rauschen – Neuartige ultrastabile Resonatoren für optische Uhren

Innerhalb des QUEST-Forschungsprojektes *Sub-Hz Lasers and high performance cavities* wurde ein optischer Resonator mit einem Abstandshalter aus monokristallinem Silizium realisiert. Das System wird bei einer Temperatur von -150 °C betrieben und ermöglicht eine relative Kurzzeitstabilität von unter 10^{-16} in einer Sekunde. (T. Kessler FB 4.3 / QUEST, thomas.kessler@ptb.de)

Frequenzmessung an der Strontium-Gitteruhr der PTB

In der PTB wurde erstmals die Frequenz des Uhrenübergangs von ^{87}Sr gegen eine Cs-Fontänenuhr gemessen. Der Beitrag der Gitteruhr zur Gesamtunsicherheit liegt bei nur $4 \cdot 10^{-16}$. Die Messungen zeigen gute Übereinstimmung mit den Messungen anderer Staatsinstitute. (Ch. Lisdat, FB 4.3, christian.lisdat@ptb.de)

Kalibrierte Zeitvergleiche über Glasfasern

Die Möglichkeit zum kalibrierten Vergleich von Zeitskalen über Glasfasernetze wurde untersucht. Unter Verwendung herkömmlicher elektro-optischer Komponenten und auf dem PTB-Campus verlegter Single-Mode-Glasfasern wurde ein System entwickelt und spezifiziert, mit dem eine in einem räumlich getrennten Labor realisierte Zeitskala mit einer Unsicherheit $< 100 \text{ ps}$ an UTC(PTB) angebunden werden kann. (M. Rost, FB 4.4, michael.rost@ptb.de)

Neue Atomstrahlquelle für die Fontänenuhr CSF2

Ein großer Beitrag zur Frequenzinstabilität der Fontänenuhren resultiert aus dem atomzahlabhängigen „Quantenprojektionsrauschen“. Um dieses in Zukunft zu verringern, wurde eine Apparatur zur Erzeugung eines kalten Atomstrahls aufgebaut und in die Fontäne CSF2 integriert. Für den Betrieb mit dieser neuen Caesiumquelle konnte eine sechsmal höhere Atomzahl demonstriert werden, was eine Reduktion des Quantenprojektionsrauschens um 60 % ermöglicht. (N. Nemitz, FB 4.4, nils.nemitz@ptb.de)

Neue Methode zur In-situ-Positionsbestimmung der Caesium-Wolke in einer Fontänenuhr

Experimente mit der Fontänenuhr CSF2 bestätigen, dass eine einfache Neigung des vorhandenen Magnetfelds es möglich macht, die genaue Position der Atomwolke im Resonator zu bestimmen. Damit können engere Grenzen für Frequenzverschiebungen aus Phasengradienten des Mikrowellenfeldes gesetzt werden, was die Gesamtunsicherheit in der Bestimmung der Caesiumsekunde reduzieren wird. (N. Nemitz, FB 4.4, nils.nemitz@ptb.de)

Absolutfrequenzmessung des S-F-Oktupolübergangs in $^{171}\text{Yb}^+$

Ein gespeichertes Ytterbiumion bietet zwei Referenzübergänge für optische Frequenznormale: einen Quadrupolübergang bei 688 THz und einen Oktupolübergang bei 642 THz. Bei der Anregung des Oktupolübergangs ergibt sich eine erhebliche lichtinduzierte Verschiebung der Übergangsfrequenz. Es konnte erstmals gezeigt werden, dass trotz dieses Effekts die ungestörte Frequenz mit einer relativen Unsicherheit von höchstens $1 \cdot 10^{-15}$ dargestellt werden kann. (E. Peik, FB 4.4, ekkehard.peik@ptb.de)

Prototyp einer skalierbaren Ionenfalle für optische Uhren

Für hochstabile und genaue optische Ionenuhren wurde in der QUEST-Nachwuchsfor- schergruppe ein neuer Fallentyp basierend auf einer segmentierten Chipfalle entwickelt. In diesem aus HF-Thermoplasten bestehen- den Prototypen mit vergoldeten und laser- strukturierten Platinenchips wurden erstmals Coulomb-Kristalle mit Ytterbium-172-Ionen erzeugt. Die Dynamik von kontrollierten Ionenketten soll damit für ein Frequenznormal mit relativer Frequenzunsicherheit von 10^{-18} untersucht werden. (T. E. Mehlstäubler, FB 4.4, tanja.mehlstaebler@ptb.de)

Speicherung und Laseranregung von Thorium-Ionen

Der Atomkern Thorium-229 besitzt einen an- geregten Zustand bei einer ungewöhnlich niedrigen Energie und erscheint damit geeig- net, die Basis einer neuartigen und äußerst präzisen optischen Uhr zu bilden. In einem vorbereitenden Experiment zum Nachweis des optischen Kernübergangs konnte die effiziente Erzeugung, Speicherung und Laseranregung von Th^+ -Ionen demonstriert werden. (E. Peik, FB 4.4, ekkehard.peik@ptb.de)

Zeitgemäße Realisierung von UTC(PTB)

Seit Anfang Februar wird UTC(PTB) von einem aktiven Wasserstoffmaser abgeleitet, dessen Frequenz an die verfügbaren langzeit-stabilen Atomuhren der PTB, vorzugsweise die Cae- siumfontäne CSF1, angeschlossen ist. Damit ist UTC(PTB) sowohl bei kurzen als auch bei langen Mittelungszeiten stabiler als je zuvor. (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

Robuste Messung der Gruppenlaufzeitdis- persion

Ein präzises und gegenüber zahlreichen sys- tematischen Fehlerquellen robustes Mess- verfahren für die Gruppenlaufzeitdispersion optischer Übertragungsstrecken wurde imple- mentiert. Es ist geeignet für Faserlängen von einigen Metern bis zu einigen Kilometern und bietet eine Auflösung der Gruppenlaufzeit- messung im Bereich einer Pikosekunde, was z. B. bei der Dispersionskompensation in einer photonischen Mikrowellenquelle eingesetzt werden soll. (E. Benkler, FB 4.5, erik.benkler@ ptb.de)

Einfluss der Photonenstatistik auf die Mes- sung der Detektionseffizienz

Einzelphotonendetektoren unterschiedlicher Detektionseffizienz wurden relativ zueinan- der unter Verwendung von Strahlung ver- schiedener Photonenstatistik (Einzelphotonen- quelle, abgeschwächter Laser, abgeschwächte Halogenlampe), aber gleicher Wellenlänge ka- libriert. Dabei wurden unterschiedliche rela- tive Verhältnisse der detektierten Zählraten gemessen. Dieses Ergebnis lässt sich durch die digitale Antwort der als Detektoren verwendeten Silizium-Avalanche-Photodioden und mit- tels statistischer Betrachtungen erklären und hat große Bedeutung hinsichtlich der Rück- führung von Detektionseffizienzen von Einzel- photonendetektoren. (S. Kück, FB 4.5, stefan. kueck@ptb.de)

Reflexionsmessungen an gepressten Staub- proben

In einer Kooperation mit dem Institut für Geo- physik und Extraterrestrische Physik der Uni- versität Braunschweig wurden Indikatrixmes- sungen zum Reflexionsverhalten durchgeführt. An gepressten SiO_2 -Staubproben (Silikaten) wurde bei einer Wellenlänge von 812 nm die Winkelabhängigkeit des Strahldichtefaktors bestimmt. Aus diesen Messungen lassen sich Reflexionskoeffizienten für optische Strahlung berechnen, eine wichtige Größe für Modell- rechnungen zur Entstehung von Protoplanete- simalen, der Vorstufe von planetaren Körpern. (A. Höpe, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

Stickstoff-Fehlstellen-basierte Einzelpho- tonenquelle hoher Effizienz

Im Rahmen der Forschungsprojekte qu-Can- dela und EPHQUAM wurde eine Einzelpho- tonenquelle basierend auf dem Stickstoff-Fehl- stellen-(NV)-Zentrum hoher Effizienz und Photonenrate untersucht. So wurde bei einer Photonenrate von ca. $2,45 \cdot 10^5/\text{s}$ und einer Bandbreite von 75 nm ein $g^2(\tau = 0)$ -Wert von 0,03 gemessen. Außerdem konnte ein weiteres Zentrum identifiziert werden, welches bei glei- cher Bandbreite und einem $g^2(\tau = 0)$ -Wert von 0,19 eine Photonenrate von ca. $1,4 \cdot 10^6/\text{s}$ auf- weist. Die hohen Bandbreiten sind insbesonde- re für die wellenlängenabhängige Kalibrierung von Einzelphotonendetektoren interessant. (S. Kück, FB 4.5, stefan.kueck@ptb.de)



Einzelne Ionen ganz kalt

Ein einzelnes Magnesium-Ion konnte in einer Falle eingefangen und mittels Laserkühlung in den Bewegungsgrundzustand gebracht werden. Dazu wurde ein neuartiges Lasersystem entwickelt, das ausgehend von einer einzigen Quelle alle dafür notwendigen Lichtstrahlen zur Verfügung stellt. Dies ist ein wichtiger Schritt zur Spektroskopie an schwierig zugänglichen Ionen, die zusammen mit dem Magnesium-Ion gefangen und gekühlt werden sollen. (P.O. Schmidt, QUEST, piet.schmidt@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

„Reference Clock Ensemble“ und „GST Realization Subsystem“ im GALILEO-Kontrollzentrum

Zwei wichtige, in der PTB entwickelte Systeme für die Precise Timing Facility des Satellitennavigationssystems Galileo wurden in das Bodenkontrollzentrum nach Oberpfaffenhofen transferiert und dort in Betrieb genommen: Das Reference Clock Ensemble, bestehend aus vier kommerziellen Caesium-Atomuhren, dient im Zusammenwirken mit zwei Wasserstoff-Masern als Rückgrad der Galileo-Systemzeit. Das GST Realization-Subsystem generiert diese Systemzeit aus den Uhrensensoren für das gesamte Galileo-Bodensegment. (M. Rost, FB 4.4, michael.rost@PTB.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Kalibrierte Referenzsolarzellen im Außen-einsatz

Im Labor kalibrierte Referenzsolarzellen werden immer häufiger auch bei Außenbedingungen benutzt. Es wurde in der PTB untersucht, in wieweit eine solche Solarzelle korrekte Bestrahlungsstärken für die Wirkungsgradbestimmung liefert. Dabei wurde festgestellt, dass bereits aufgrund der Winkelabhängigkeit bei diffuser Strahlung durchaus Fehler von bis zu 10 % möglich sind, bei Standardtestbedingungen jedoch normalerweise nicht mehr als 1 %. Falls die Referenzsolarzelle nicht nur für Messungen am Sonnensimulator eingesetzt werden soll, sondern auch für Outdoormessungen, muss für genaue Messergebnisse deren Winkelabhängigkeit berücksichtigt werden. (S. Winter, FB 4.1, stefan.winter@ptb.de)

LED-Lichtquellen: Langzeitstabilität, Winkelabhängigkeit der Farbe und Strahlenkörper

Im Rahmen eines dreijährigen MNPQ-Transfer-Projektes wurde ein universeller Messplatz zur Charakterisierung von LEDs (und ihres Strahlenkörpers) entwickelt, die als Referenz für Hochleistungs- und Weißlicht-LEDs breite Anwendung finden. Zahlreiche Untersuchungen zur Langzeitstabilität und Winkelabhängigkeit des Farbortes von farbigen und weißen LED-Lichtquellen unterschiedlicher Hersteller ergaben z. T. starke Veränderungen während der ersten 1000 Brennstunden. Nach dieser „Einbrennphase“ zeigt sich im Ergebnis eine hohe Langzeitstabilität von Hochleistungs-LEDs für den Rest der Lebensdauer sowohl bzgl. ihres Lichtstroms als auch ihres Farbortes. (A. Sperling, FB 4.1, armin.sperling@ptb.de)

Neuartige Lichtleiter-Einkoppeloptik mit Photometer bzw. Radiometer am Roboter-Goniophotometer

Für den Einsatz am Roboter-Goniophotometer wurde eine neuartige Lichtleiter-Einkoppeloptik mit konzentrisch positioniertem Photometer bzw. Radiometer entwickelt. Sie dient der Bestimmung photometrischer, radiometrischer und spektrometrischer Größen wie Lichtstärke (Strahlstärke) und Lichtstrom (Strahlungsfluss), aber auch colorimetrischer Kennzahlen wie Farbort, ähnlichste Farbtemperatur und dominante Wellenlänge. Hiermit ist eine synchrone Erfassung integraler und spektral aufgelöster Daten möglich. (M. Lindemann, FB 4.1, matthias.lindemann@ptb.de)

Roboter-Goniophotometer im Kalibriereinsatz

Das Roboter-Goniophotometer hat Anfang 2010 den regulären Kalibrierbetrieb zur fundamentalen Realisierung und Weitergabe der Lichtstromeinheit Lumen aufgenommen. Durch Rekalibrierung bewährter, bereits früher sorgfältig charakterisierter Lichtstromnormlampen konnte die Überprüfung des neuen Systems erfolgreich abgeschlossen werden. (M. Lindemann, FB 4.1, matthias.lindemann@ptb.de)

Synchrone Bestimmung des Streulichtstromanteils vom Gesamtlichtstrom am Roboter-Goniophotometer

Unvermeidbare Streulichtanteile auf den Wänden des Goniophotometer-Messraumes verfälschen bei der Lichtstrommessung von Lampen die Messung ihres Gesamtlichtstroms um bis zu 10^{-3} . Ein Verfahren wurde entwickelt und implementiert, bei dem jetzt routinemäßig die verfälschende streulichtinduzierte Beleuchtungsstärke ermittelt und für jede Lampe unabhängig vom Lampentyp eine individuelle Streulichtkorrektur bestimmt wird. (M. Lindemann, FB 4.1, matthias.lindemann@ptb.de)

193-nm-Mikroskop für Strukturbreitenmessung

Ein neuartiges optisches Mikroskopie-System zur Strukturbreitenmessung an Photomasken wird in der PTB entwickelt und realisiert. Hiermit soll eine Messunsicherheit unter 10 nm erreicht werden. Die Arbeitswellenlänge von 193 nm bietet die Möglichkeit, "at-wavelength"-Messungen für aktuelle und zukünftige 193-nm-Lithografieverfahren durchzuführen. (B. Bodermann, FB 4.2, bernd.bodermann@ptb.de)

Neues Ebenheitsreferenzsystem installiert

In der PTB wurden zwei neue optische Messeinrichtungen für die höchstgenaue Ebenheitsmessung installiert. Damit können Prüflinge mit einer Größe von bis zu 1 m sowohl liegend als auch stehend gemessen werden. Damit werden mit den neuen Anlagen Ebenheitsmessungen mit bislang unerreichten Genauigkeiten im sub-Nanometerbereich möglich. (G. Ehret, FB 4.2, M. Stavridis, FB 8.4, gerd.ehret@ptb.de)

Traceable Multiple Sensor-Messtechnik in die Industrie transferiert

Im Rahmen eines „MNPQ-Transfer“-Projektes des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie wurde das an der PTB erfundene TMS-Messverfahren für die hochgenaue Formmessung optischer Oberflächen zum Projektpartner TRIOPTICS GmbH transferiert und zur kommerziellen Nutzung verfügbar gemacht. (M. Schulz, FB 4.2, michael.schulz@ptb.de)

Charakterisierung der optischen Wirkung von diffraktiven optischen Elementen

Die optische Wirkung von diffraktiven optischen Elementen (DOEs), die in der Halbleiterlithographie zur Beleuchtung mit der Wellenlänge 193 nm eingesetzt werden, wurde mit dem DUV-Scatterometer der PTB und mit einem abbildenden Messsystem bei der Firma Carl Zeiss SMT gemessen. Durch den Vergleich konnten sowohl die Messgeräte als auch die DOEs selbst hochgenau charakterisiert werden. (M. Wurm FB 4.2, matthias.wurm@ptb.de)

Entwicklung neuer Justierverfahren für die hochgenaue Topografie-Messung von Synchrotronspiegeln

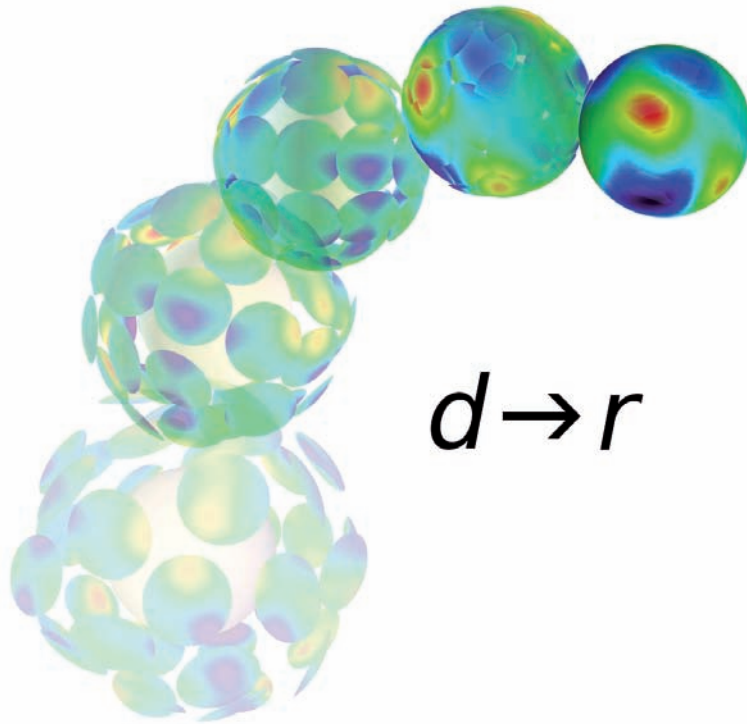
In Kooperation mit dem neuen spanischen Synchrotron „ALBA“ wurden neue Justierstrategien für die optische Messung der Oberflächenform von vertikal stehenden Spiegeln entwickelt. Die neuen Justierverfahren ermöglichen Winkelausrichtungen der einzelnen Komponenten mit Genauigkeiten von 0,1 arcsec. Dies ist mehr als ausreichend, um Messungen der Oberflächenform mit Unsicherheiten im sub-Nanometerbereich zu erzielen. (G. Ehret, FB 4.2, gerd.ehret@ptb.de)

Farbkoordinaten mit einer räumlichen Auflösung von 30 µm

Ein neuartiger Messplatz wurde speziell für Messungen zum visuellen Erscheinungsbild von Oberflächen entwickelt. Mit einer Leuchtdichtekamera mit Spezialoptik ist es möglich, Farbkoordinaten an Probenoberflächen mit einer räumlichen Auflösung von 30 µm zu bestimmen. Spezielle Anwendungsgebiete sind die Charakterisierung von Effekt-Pigmenten und deren winkelabhängiger Farbeindruck. (A. Höpe, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)



Fertigungsmesstechnik



Berichte der Abteilungen

Die Abteilung *Fertigungsmesstechnik* wurde 1985 im Zuge einer größeren Reorganisation der PTB gegründet, sie existiert somit seit nunmehr 25 Jahren. Ausgangspunkt der Überlegungen zur Struktur der neu gegründeten Abteilung war eine möglichst enge inhaltliche und organisatorische Anbindung des *Wissenschaftlichen Gerätebaus* der PTB an die technisch-wissenschaftlichen Arbeitsgruppen mit Schwerpunkt in der dimensionellen Messtechnik, die in den Fachgruppen *Industrielle Längenmesstechnik* und *Koordinatenmesstechnik* organisiert waren.

Unter der Leitung von Dr. Horst Kunzmann (Abteilungsleiter bis 1998, danach Mitglied des Präsidiums der PTB) wurden in der neu gegründeten Abteilung insbesondere für die industrielle Anwendung vielversprechende, neue thematische Schwerpunkte gesetzt. Hierzu zählten unter anderem die rechnergesteuerte Koordinatenmesstechnik als flexible 3D-Messtechnik inklusive der Datenanalyse, die Nutzung der Rastersondenmikroskopie für dimensionelle Metrologie an Nanostrukturen, die Anwendung von verschiedenen Laserlichtquellen für die interferometrische Längenmesstechnik sowohl an Luft als auch im Vakuum, die 2D-Positionsmesstechnik an Fotomasken für die Halbleiterindustrie sowie die Entwicklung von hochgenauen Messgeräten der Längen- und Winkelmesstechnik, die unter den sehr guten Umgebungsbedingungen des im Jahr 1993 bezugsfertigen neuen Reinraumzentrums der PTB betrieben werden konnten. Aus Anlass des 70. Geburtstags von Dr. Horst Kunzmann fand im November 2010 ein Festkolloquium statt, bei dem Prof. Weckenmann von der Universität Erlangen über das Thema „Messen als Motor der Produktivität“ vortrug. Dieses Thema begleitet auch die Arbeiten in der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* weiterhin.

Titelbild:

Mit einem neu entwickelten Stitching-Verfahren ist jetzt auch die Bestimmung absoluter Radien-topografien von Präzisionskugeln möglich. Das Verfahren stellt eine funktionelle Erweiterung der ursprünglichen Durchmesserbewertung von Messdaten des Kugelinterferometers der PTB dar. Die Illustration veranschaulicht den Vorgang, wie aus einzelnen gemessenen Oberflächensegmenten die Radiustopografie eines sphärischen Messobjekts zusammengesetzt wird.

Der *Wissenschaftliche Gerätebau* fungiert nach wie vor als zentraler Dienstleister für die gesamte PTB und deckt dabei die folgenden Aufgabenfelder ab: Entwicklung, Konstruktion und Fertigung von (Ultra-) Präzisionsgeräten, Herstellung von ultra-präzisen Bauteilen einschließlich der Optimierung der benötigten Fertigungsprozesse, Forschung und Entwicklung zur Bereitstellung neuer Fertigungstechnologien und zur Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit sowie die berufliche Ausbildung zum Feinwerkmechaniker.

Bewährt hat sich, dass in den Arbeitsgruppen der Abteilung sowohl Forschungs- und Entwicklungsaufgaben als auch messtechnische Dienstleistungsaufgaben durchgeführt werden. Die Forschungs- und Entwicklungsaufgaben sind daran orientiert, entweder bestehende messtechnische Dienstleistungen, wie z. B. Kalibrierungen, zu verbessern oder aber notwendige neue Dienstleistungen zügig zu etablieren und anbieten zu können.

Diese Forschungsarbeiten konnten oftmals erst durch die erfolgreiche Einwerbung von zusätzlichen Finanzmitteln aus geförderten Drittmittelprojekten in dem erforderlichen Umfang durchgeführt werden. Gefördert wurden die Projekte von verschiedenen Organisationen wie DFG, BMBF, BMWi, EU, aber auch oft im Rahmen von bilateralen Industrieprojekten.

Mit dem seit 2009 laufenden Europäischen Metrologieforschungsprogramm (EMRP) sowie dem Vorläufer-Programm iMERA-plus, die von den teilnehmenden nationalen Mitgliedsstaaten der EU sowie der Europäischen Kommission ko-finanziert werden, können sich Metrologieinstitute Europas in Projektkonsortien kompetitiv um die Bearbeitung von ausgeschriebenen Forschungsthemen in bestimmten thematischen Programmen bewerben. Im Jahr 2010 war neben dem Thema „Metrology for Environment“ auch das Thema „Metrology for Industry“ ausgeschrieben, im folgenden Jahr 2011 wird unter anderem das Thema „Metrology for New Technologies“ inklusive der Nanometrologie zur Ausschreibung kommen.

Das EMRP bietet neue Möglichkeiten zur Bildung von Projektkonsortien – im Wesentlichen aus den Metrologieinstituten – zur Bearbeitung wichtiger, aus einem öffentlichen Ausschreibungsprozess hervorgegangener und selektierter Forschungsthemen der Metrologie auf



europäischer Ebene. Das EMRP ergänzt somit die anderen Möglichkeiten der Förderung von Forschungsarbeiten, die in der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* auch weiterhin zusätzlich genutzt werden.

Auf die bislang vorliegenden Ergebnisse der vier europäischen Forschungsprojekte im Themenbereich „Länge“ (iMERA-plus), die in der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* bearbeitet werden, soll in diesem Bericht näher eingegangen werden. Zuvor wird aber ein anderes Forschungsprojekt vorgestellt, in das sowohl die fertigungs- als auch messtechnischen Möglichkeiten der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* erfolgreich eingebracht werden konnten.

Microscope-Projekt zum Test der Äquivalenz von träger und schwerer Masse

Ziel des von der europäischen Raumfahrtagentur (ESA) und dem französischen Institut für Luft- und Raumfahrt (ONERA) gemeinsam geförderten Projekts „Microscope“ ist die Durchführung eines satellitengestützten Tests des Äquivalenzprinzips von träger und schwerer Masse mit einer angestrebten Unsicherheit von 10^{-15} . Diese Unsicherheit ist um einen Faktor 100 geringer als alle bisherigen – ausnahmslos erdgestützten – Experimente. Die Versuche zum Äquivalenzprinzip basieren auf der Messung der Relativlage von einem Paar konzentrisch ineinander angeordneter Metallzylinder verschiedenen Materials, die im Satelliten den Bedingungen des freien Falls unterworfen werden. Dabei halten sich im Weltraum die Kräfte

aufgrund der Anziehungskraft der Erde (die auf die schwere Masse der Zylinder wirkt) und der Zentrifugalkraft (die auf die träge Masse der Zylinder wirkt) im Gleichgewicht.

Die Unsicherheit der Beschleunigungsexperimente hängt wesentlich von der Qualität der eingesetzten Testmassen ab. Um die möglicherweise sehr kleinen Differenzen zwischen träger und schwerer Masse auf dem Unsicherheitsniveau von 10^{-15} überhaupt feststellen zu können, müssen die Masse, die Form, die Dichte und die thermische Ausdehnung der Zylinder sehr genau bekannt sein sowie die spezifizierten, eng tolerierten geometrischen Abmessungen bei der Herstellung genau eingehalten werden. Dem *Wissenschaftlichen Gerätebau* ist es gelungen, den Herstellungsprozess für die Testmassen – aus einer Standard-Titan-Legierung sowie einer speziellen Platin-Rhodium-Legierung – so weit zu optimieren, dass die geringen Form- und Maßtoleranzen von $0,5 \mu\text{m}$ bis zu wenigen Mikrometern eingehalten werden konnten. Diese Präzision konnte letztlich nur durch die Integration von geeigneter Messtechnik zur Achssteuerung der verwendeten Bearbeitungsmaschinen sowie durch neue Aufspannkonzepte erreicht werden. Die derart gefertigten Zylinder wurden anschließend auf den speziellen Koordinaten- und Formmessgeräten der Abteilung charakterisiert und deren Ergebnisse zur Feinjustage der integrierten Messtechnik in den Bearbeitungsmaschinen verwendet (Bild 1). Darüber hinaus dienten Interferenzkomparatoren zur Präzisionsmessung der thermischen Ausdehnung der Testmassen.

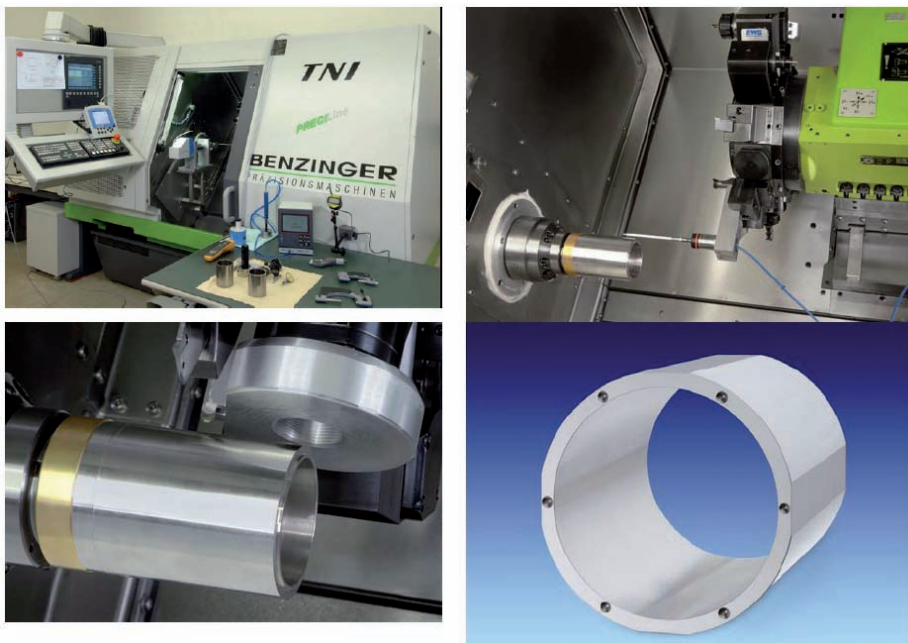


Bild 1:
oben, links: Bearbeitungsmaschine mit aufgebautem Autokollimator;
oben, rechts: Testzylinder mit Werkzeugen und Messtaster;
unten, links: Testzylinder mit Werkzeug zur Seitenflächenbearbeitung;
unten, rechts: fertig bearbeiteter Testzylinder



Dafür wurde ein spezielles Verfahren entwickelt, welches die Anwendung interferentieller Längenmessung ermöglicht, obwohl die Oberflächen der Probekörper nicht direkt optisch antastbar waren. Der Start des Satelliten mit den in der PTB gefertigten Testmassen ist jetzt für das Jahr 2014 vorgesehen.

Das „Microscope“-Projekt ist eng verzahnt mit einem weiteren Projekt, bei dem Messverfahren in die Fertigung integriert und erprobt werden. Damit werden die Möglichkeiten zur Fertigung präziser Komponenten für die anspruchsvollen Aufgaben in der PTB weiter ausgebaut.

iMERA-plus-Projekte

Die Ergebnisse der vier seit Frühjahr 2008 bearbeiteten gemeinsamen iMERA-plus-Forschungs-Projekte im Themenbereich „Länge“ sollen kurz vorgestellt werden. Der Abschluss der Projekte ist für Frühjahr bzw. Frühsommer 2011 vorgesehen.

Traceable Nanoparticle Characterisation (Nanoparticle)

Bei den verschiedenen Anwendungen von Nanopartikeln kommt es häufig auf deren Größe und Form sowie die Größenverteilung an. Es existieren zwar schon Referenzmaterialien für die Kalibrierung von Partikelmessgeräten, allerdings sind diese bislang noch nicht mit verschiedenen Messverfahren unabhängig rückgeführt und verglichen worden.

In diesem JRP (JRP = joint research project) erarbeitet ein Konsortium von neun europäischen Metrologieinstituten unter Koordination des britischen NPL sowohl Methoden zur Probenpräparation als auch zur Charakterisierung von sphärischen und nicht-sphärischen Nanopartikeln. Als Messmethoden werden dabei sowohl mikroskopische, bildgebende Messverfahren an Partikeln auf ebenen Substraten angewandt (TEM, SEM, AFM, optische Mikroskopie), als auch Streulichtmethoden an Partikeln in wässriger Umgebung (SAXS, PCCS).

Die Arbeiten in der PTB konzentrieren sich auf die Anwendung und Weiterentwicklung der Röntgen-Kleinwinkelstreuung (SAXS) zur Messung an Partikel-Ensembles in wässriger Umgebung mittels Synchrotronstrahlung (Bessy II) sowie die Messung an einzelnen, auf einem dünnen Substrat abgeschiedenen Par-

tikeln mittels Rasterelektronenmikroskopie in Transmission (TSEM). Das zuletzt genannte Verfahren – gemeinsam bearbeitet durch Mitarbeiter der Abteilungen *Optik* und *Fertigungsmesstechnik* – zeichnet sich als mikroskopisches Verfahren dadurch aus, dass es neben dem Durchmesser von Partikeln auch Messergebnisse zur Form von Partikeln liefert.

Da das durch die Partikel transmittierte Signal der Elektronen von dem Durchmesser sowie dem Material der Partikel, aber auch der Primärenergie der Elektronen abhängt, ist für eine exakte Größenbestimmung eine Modellierung bzw. theoretische Abstützung des Signal-contrastes erforderlich. Erst die Modellierung erlaubt die Durchmesserbestimmung durch Analyse des Signalprofils, z. B. anhand des wählenden Schwellwertes. Für die Signalmodellierung wird die Methode der Monte-Carlo-Simulation genutzt, die bereits für vielfältige Anwendungen im Bereich der Charakterisierung von Nanostrukturen im Rasterelektronenmikroskop oder auch in der Elektronenstrahlithografie erfolgreich angewandt wurde.

Das SAXS-Messverfahren der PTB wird inzwischen bereits als Dienstleistung im Rahmen der Zertifizierung von Partikelnormalen in Anspruch genommen, für das TSEM-Messverfahren wird dies bis zum Abschluss des Projektes angestrebt, auch für nichtsphärische Partikel. Dabei sind mit dem TSEM-Messverfahren mittlere Partikelgrößen bis herab zu etwa 7 nm mit Unsicherheiten von 1 nm bis 2 nm bestimmbar.

New Traceability routes for nanometrology (NANOTRACE)

Das Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung von optischen Interferometern mit Messunsicherheiten von 10 pm. Im Konsortium mit sieben Partnern unter Koordination des italienischen Institutes INRIM wird dieses Ziel durch Optimierung der Elektronik zur Messung der Interferenzphase, durch neue optische Interferometer-Anordnungen oder durch Kombination mit einem kapazitiven Sensor zur Detektion der Nichtlinearität angestrebt. Es werden dabei verschiedene Anordnungen parallel aufgebaut und getestet.

Als Referenz zur Verifikation der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Entwicklungen wird ein Röntgen-Verschiebeinterferometer



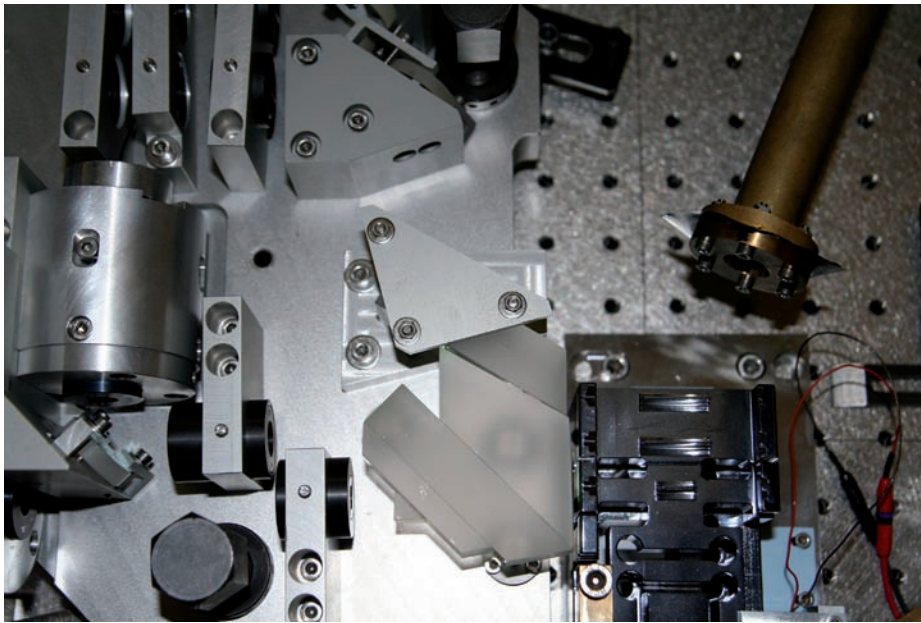
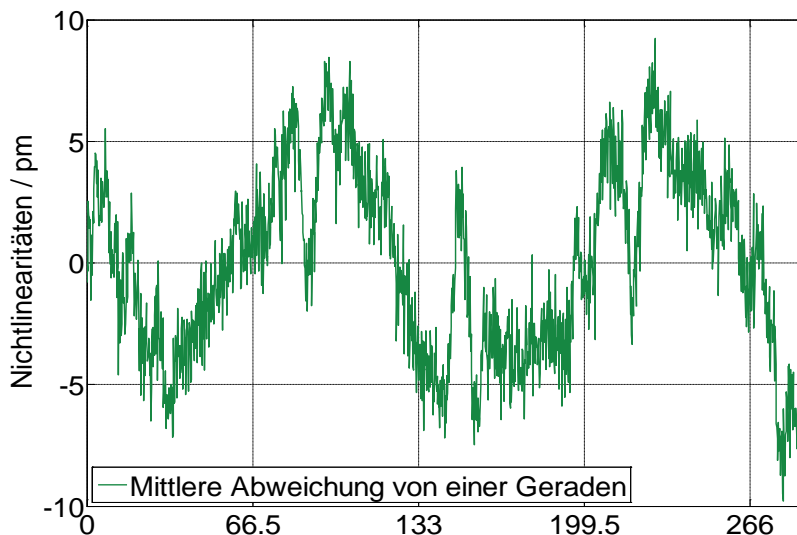


Bild 2:
oben: Bild des neu entwickelten optischen Interferometers am Röntgeninterferometer des NPL;
unten: Vorläufige Ergebnisse der Messungen zur verbleibenden Nichtlinearität des optischen Interferometers.



am britischen Institut NPL eingesetzt, welches im Rahmen des Projektes mit moderner Röntgenoptik optimiert wurde. Als Maßstab dient hierbei das Gitter eines Silizium-Einkristalls, das von Röntgenstrahlen abgetastet wird und somit intrinsisch eine sehr kleine Signalperiode im Sub-nm-Bereich besitzt.

In der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* konzentrieren sich die Arbeiten auf die Entwicklung einer hochauflösenden Phasenbestimmung des Interferenzsignals eines Heterodyn-Interferometers mittels eines digitalen Lock-In-Verstärkers sowie die Realisierung eines speziellen optischen Interferometers für die winkelkompensierende Längenmessung mit räumlich getrennter Strahlzuführung und hoch symmetrischen optischen Weglängen.

Als Beispiel für die Leistungsfähigkeit der in der PTB entwickelten Komponenten sind in Bild 2 der Aufbau des neu entwickelten Interferometers am Röntgeninterferometer des NPL sowie erste Ergebnisse der gemessenen Nichtlinearitäten des optischen Interferometers gezeigt.

Die neu entwickelte Interpolationselektronik wird bereits jetzt auch für andere Längenmesssysteme in der PTB verwendet. Für das neue optische Interferometer sind bereits weitere Anwendungen in der Präzisions-Längenmesstechnik vorgesehen.



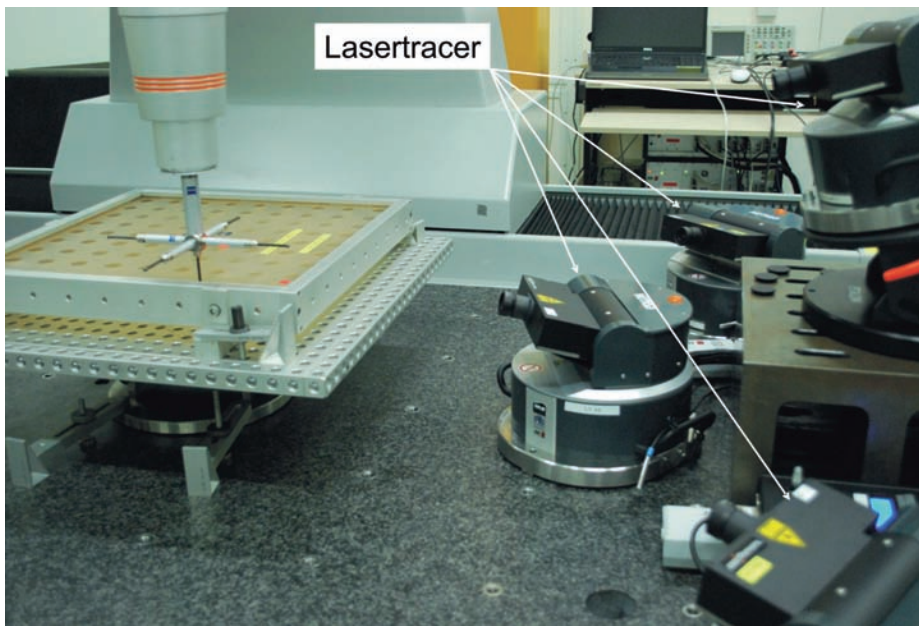


Bild 3: Foto der vier selbstnachführenden Lasertracer, hier eingesetzt bei einer Testmessung an einer kalibrierten Zerodur-Lochplatte im Rahmen der Validierung des neuen lasertracer-basierten 3D-Messverfahrens (M3D3)

Metrology for new industrial measurement technologies (NIMTech)

Das JRP NIMTech verfolgt im Wesentlichen zwei Ziele: die Rückführung komplexer geometrischer Strukturen von 0,5 m bis zu mehreren zehn Metern Abmessung unter Verwendung von Laserscannern, Indoor-GPS und hochgenauen Laserinterferometern sowie die online-Validierung mathematischer Auswertelgorithmen von Koordinatenmesssystemen.

Zur Sicherstellung der Rückführung neuartiger Messsysteme, wie z. B. von Laserscannern, Indoor-GPS oder hochgenauen Laserinterferometern, wird insbesondere untersucht, wie diese transportablen Systeme eingesetzt werden können, um vor Ort große Strukturen bis zu mehreren zehn Metern flexibel messen zu können. Des Weiteren wird u. a. ein Messsystem zur erstmaligen hochgenauen dreidimensionalen Kalibrierung großer Objekte bis zu $(6 \times 6 \times 6) \text{ m}^3$ entwickelt. Kernstück dieses von der PTB zu entwickelnden Messsystems mit der Bezeichnung M3D3 (Bild 3) ist die Kombination aus vier hochgenauen selbstnachführenden Lasertracern (Fa. Etalon).

Um alle o. g. neuartigen 3D-Messsysteme metrologisch rückzuführen, werden neue Prüfkörper entwickelt, wie z. B. Normale mit einer Freiformoberfläche, ein Verzahnungsnormale mit einem Durchmesser von einem Meter (siehe Nachrichten des Jahres) sowie ein Evolventennormale mit wellenbehafteter Oberfläche. Eine Pilotanwendung wird u. a. die Kalibrierung des großen Zahnradnormals unter Labor-

sowie Produktionsumgebungen mittels der selbstnachführenden Lasertracer sein.

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Bedeutung mathematischer Auswerteverfahren wird auch der Frage nachgegangen, wie die Auswertesoftware von Koordinatenmesssystemen zuverlässig auf Richtigkeit der Berechnungsergebnisse geprüft werden kann. Dazu werden Grundlagen erarbeitet, um mittels geprüfter Testdaten, die weltweit über einen Internet-Dienst abgerufen werden können, geometrische Auswertelgorithmen automatisch zu prüfen. Mit dem Projekt NIMTech soll erreicht werden, dass in der Koordinatenmesstechnik die messtechnische Rückführung auch für die kommende Generation von Mess- und Auswerteverfahren mithilfe neuartiger verkörperter und numerischer Normale garantiert werden kann. Die Koordination der fünf Partner des JRPs wird von dem Fachbereich *Koordinatenmesstechnik* der PTB wahrgenommen.

Novel techniques for absolute long-range distance measurements in air (Long Range)

Die Anforderungen an die Genauigkeit der Längenmessung in bestimmten Bereichen der industriellen Fertigung von Großanlagen, z. B. im Flugzeug- oder Windkraftanlagenbau, oder auch in der Geoüberwachung, z. B. in erdbebengefährdeten Regionen, nehmen weiter zu. Diese Anforderungen können aktuelle Messmethoden, z. B. Lasertracer, elektronische oder auch GPS-basierte Distanzmesser oftmals nur unzureichend erfüllen. Weiterhin erfordert

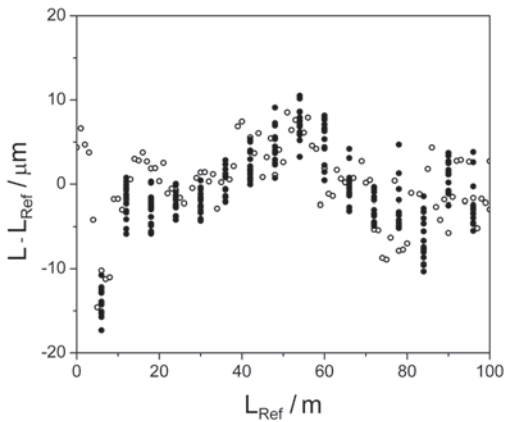


Bild 4: Übereinstimmung der in der PTB entwickelten, auf fs-Laser basierten Entfernungsmessung bis 100 m mit einem HeNe-Laserinterferometer als Referenz

die extrem zeitaufwendige Kalibrierung dieser Instrumente stabile äußere Bedingungen.

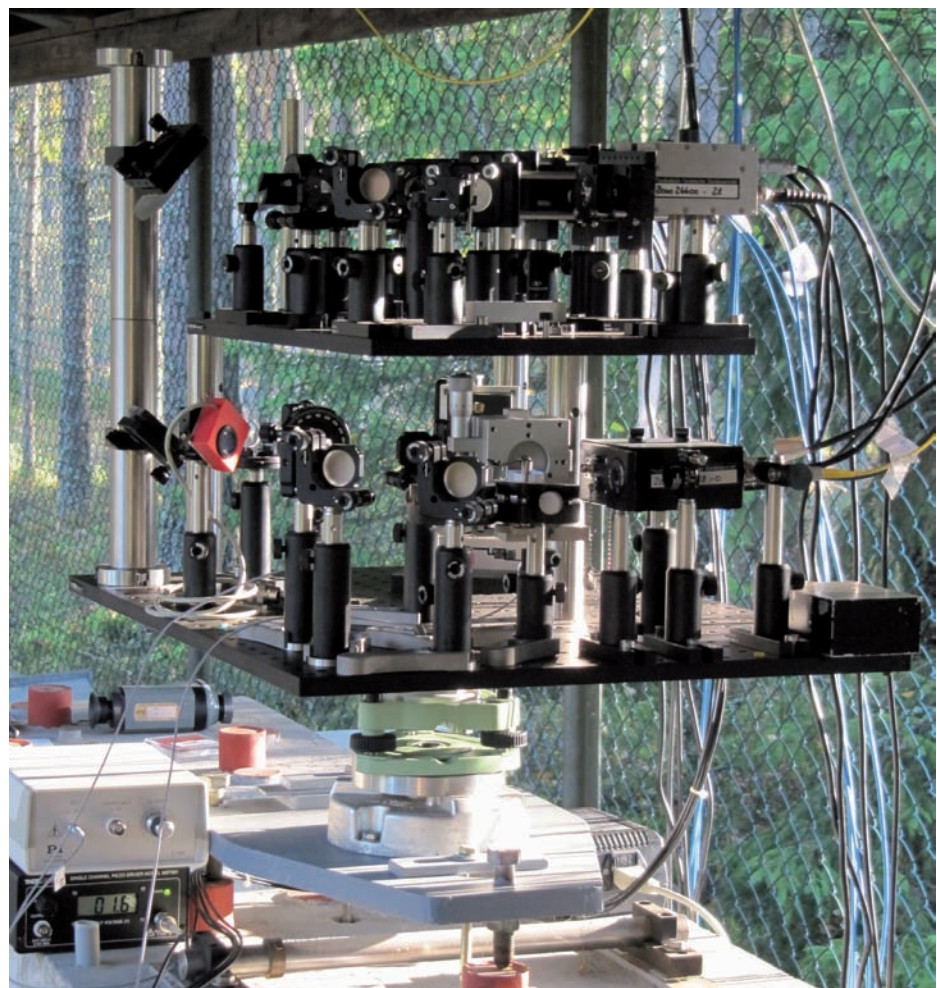
Das JRP Long Range befasst sich deshalb mit der Entwicklung von rückführbaren Längenmessmethoden für Längen bis zu 1 km. Dabei

wird die Verbesserung der relativen Messunsicherheit auf $1 \cdot 10^{-7}$ mit modernen optischen Methoden, u. a. interferometrischer Mehrwellenlängenmessung, auf Femtosekundenlaser basierender Laufzeitmessung und einer In-situ-Kompensation der Brechzahl angestrebt. Das JRP besteht aus einem Konsortium von acht europäischen Metrologieinstituten mit dem französischen Institut LNE-INM als Koordinator.

In der PTB wird u.a. ein Ansatz verfolgt, der auf Laufzeitmessungen mittels fs-Laser beruht. Der realisierte Aufbau konnte bereits erfolgreich bis 100 m mit einer Messunsicherheit von $1 \cdot 10^{-7}$ unter Laborbedingungen demonstriert werden, siehe Bild 4.

Die Verfahren zur brechzahlkompensierenden Mehrwellenlängen-Interferometrie und zur Feuchtemessung wurden in der PTB bislang noch auf kürzeren Strecken von 50 m und 100 m untersucht. Im Herbst 2010 konnten die neu entwickelten Verfahren erfolgreich auf einer geodätischen Referenz-Messstrecke von 864 m Länge im finnischen Nummela erprobt werden (Bild 5). Im nächsten Schritt werden die

Bild 5: Bild des neu entwickelten, brechzahlkompensierenden Mehrwellenlängen-Interferometers, eingesetzt bei den Freiluftmessungen auf der geodätischen Messstrecke im finnischen Nummela (Gesamtsystem gelagert auf Standardhalterung. Obere Ebene: Interferometerkopf. Untere Ebene: Spektrometerkopf mit Strahlauflerung. Links: Strahlgestabilisierung)



Instrumente auch auf der PTB-eigenen, im Jahr 2010 weiterentwickelten 600-m-Pfeilerstrecke getestet.

Die hier dargestellten Arbeiten der PTB im Rahmen verschiedener Verbund-Forschungsprojekte haben deutlich gemacht, dass das Engagement in drittmittelfinanzierten Projekten immer dann anzustreben ist, wenn zwischen den Zielen der Verbund-Projekte und den mittel- bis langfristigen Entwicklungszielen der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* eine hinreichend gute Überdeckung besteht. In diesem Fall kann das Projekt-Engagement die Abteilung bei der Erreichung ihrer eigenen Ziele deutlich unterstützen, um sowohl für die Industrie notwendige Dienstleistungen, aber auch Messtechnik für wissenschaftliche Grundlagenexperimente auch weiterhin zügig und mit der geforderten Qualität bereitstellen zu können.



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Kartografie der Oxidschichtdicke von Siliziumkugeln mit hoher Punktdichte

Ein neues Ellipsometer mit speziellen Anpassungen für die Charakterisierung von Siliziumkugeln im Rahmen des Avogadro-Projekts ermöglicht, die komplette Oberfläche mit einem ausreichend dichten Raster von 5000 und mehr Messpunkten zu messen, um die geforderte Messunsicherheit von $u(d_{\text{ox}}) = 0,1 \text{ nm}$ für die Oxidschichtdicke zu erreichen. (I. Busch, FB 5.1, ingo.busch@ptb.de)

Optimierte Selbstkalibrierung des Winkelprimärnormals der PTB

Bei der Selbstkalibrierung des Winkelprimärnormals WMT 220 kamen erstmalig verbesserte Algorithmen zum Einsatz, welche bei der Bestimmung des Fourierspektrums der Winkelabweichungen des Normals Verfahren zur optimalen Gewichtung berücksichtigen. Damit konnte die Auswirkung zufälliger Messfehler gegenüber den bisherigen Algorithmen nahezu um den Faktor 3 reduziert werden. (R. Geckeler, FB 5.2, ralf.geckeler@ptb.de)

Langzeitstabilität der Nano3-Quarz-Strichmaßstäbe

Die für die Nano3-Vergleichsmessung gefertigten 280-mm-Strichmaßstäbe wurden über die letzten fünf Jahre regelmäßig gemessen. Innerhalb einer Reproduzierbarkeit von $\pm 2 \text{ nm}$ können keine Alterungseffekte festgestellt werden. (R. Köning, FB 5.2, rainer.koenig@ptb.de)

Realisierung kantensensitiver AFM-Messverfahren durch Einzelpunktantastung

Es wurde ein Verfahren zum Abtasten von Strukturkanten mittels Einzelpunktantastung mit Kraftmikroskopen erprobt. Das Wesen dieser Strategie ist es, die Sonde aus zur lokalen Oberflächenneigung optimalen Richtung antasten zu lassen. Dies liefert die Möglichkeit, Steigung und Verrundung von Kantenübergängen an Nanostrukturen zu ermitteln. (D. Hüser, FB 5.2, dorothee.hueser-espig@ptb.de)

Messung der Testmassen für das MICROSCOPE-Experiment

Für das Weltraumprojekt „Microscope“ sind in der PTB hochpräzise Testmassen hergestellt worden. Hierbei handelt es sich um Hohlzylinder aus Platin-Rhodium und Titan, deren geometrische Gestalt nur sehr kleine Toleranzabweichungen von einer Nennform aufweisen dürfen. (K. Wendt, FB 5.3, klaus.wendt@ptb.de)

Absolute Kugelradiustopografien zur Formbestimmung von sphärischen Maßverkörperungen

In der PTB wurde beim Kugelinterferometer ein Verfahren implementiert, die absolute Form einer Kugel – also eine Radiustopografie – zu rekonstruieren. Damit lassen sich nunmehr nicht nur die bei herkömmlichen Rundheitsmessungen ermittelten relativen Formabweichungen, sondern auch die absoluten Radien bis auf wenige Nanometer genau angeben. (G. Bartl, FB 5.4, guido.bartl@ptb.de)

Prototyp eines beidseitig antastenden Interferometers erfolgreich aufgebaut

Es wurde ein Prototyp für ein beidseitig antastendes Interferometer aufgebaut, um die Länge von Maßverkörperungen beidseitig, d. h. ohne Anspregung einer Endplatte, höchstgenau zu messen. Dieses dient als Vorstufe für ein Interferometer, welches die einzigartigen Vorteile der vorhandenen Präzisionsinterferometer mit der beidseitigen Antastung verbindet. (R. Schoedel, A. Abdelaty, FB 5.4, rene.schoedel@ptb.de)

Spektroskopische Inline-Messung der relativen Luftfeuchte zur präzisen Längenmessung

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes „Absolute long distance measurements in air“ wurde in der PTB ein Spektroskopie-basiertes Verfahren entwickelt, mit dem entlang und in dem Strahl eines optischen Entfernungsmessers die relative Luftfeuchtigkeit mit einer Unsicherheit von 4 % bestimmt werden kann. (F. Pollinger, R. Doloca, K. Meiners-Hagen, FB 5.4, florian.pollinger@ptb.de)

Absolutinterferometrie für geodätische Längen

Ziel des europäischen Forschungsprojekts „Absolute long distance measurement in air“ ist es, eine rückführbare Längenmessung auf Distanzen bis zu 1 km im Freien mit einer Messunsicherheit von 0,1 mm zu erreichen. (K. Meiners-Hagen, F. Pollinger, FB 5.4, karl.meiners-hagen@ptb.de)

Konstruktion und Fertigung eines Neigungssensors zur Stabilisierung des Tisches für das neue Nanokraft-Primärnormal

Für die Nanokraftmesseinrichtung der PTB wurde ein Neigungssensor entwickelt und gefertigt, der auf kapazitivem Weg die Neigung eines optischen Tisches in 2 Achsen mit einer Auflösung von wenigen Pikorad misst. (M. Müller, FB 5.5, michael.mueller@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Zwei neue Mikrotasterdesigns für μ -KMG's

Zwei neue Designs für 3D-Boss-Mikrotaster wurden entwickelt und mittels FEM-Simulationen hinsichtlich geringerer Biegesteifigkeit und Erhöhung der Empfindlichkeit optimiert. Erste Prototypen wurden mit Silizium-Trocken- und -Nassätztechnik hergestellt. (S. Bütetfisch, FB 5.1, sebastian.buetefisch@ptb.de)

Erweiterte Nutzung von Tiefeneinstellnormalen für optische Oberflächenmessverfahren

In einer Kooperation wurden Tiefeneinstellnormale für die Rauheitsmesstechnik gezielt aufgeraut. Durch die erreichte Feinstruktur ($S_z = 50$ nm) können diese Normale noch mit Interferenzmikroskopen kalibriert werden und zur Kalibrierung anderer optischer Mikroskope benutzt werden. (R. Krüger-Sehm, FB 5.1, rolf.krueger-sehm@ptb.de)

Verbesserte Steifigkeitsmessungen von Cantileversensoren mit neuer Messkammer

In der PTB ist eine Messkammer für eine Mikrokräftkalibriereinrichtung aufgebaut worden, in der die Umweltbedingungen Temperatur, Luftdruck und -feuchte gut eingestellt und konstant gehalten werden können. Dies ermöglicht neben der Untersuchung der Empfindlichkeit von Waagen in Bezug auf Luftdruck und -feuchte auch genauere Kalibrierungen von Cantilevern. (L. Doering, FB 5.1, lutz.doering@ptb.de)

Anwendung des virtuellen Rastersondenmikroskopes auf ein kommerzielles Messgerät

Für die Bestimmung der Messunsicherheit von komplexen Messaufgaben an 3D-Strukturen mit dem Rastersondenmikroskop ist ein softwarebasiertes Verfahren, das virtuelle Rastersondenmikroskop, entwickelt worden. Dies ermöglicht es, Eigenschaften des Messgerätes, der Antastsonde und der Umgebung zu berücksichtigen, um deren Einfluss auf die Messgröße abschätzen zu können. Dieses Verfahren wurde nun erstmalig an einem kommerziell verfügbaren Rastersondenmikroskop erprobt. (M. Xu, FB 5.1, min.xu@ptb.de)

Flächenbestimmung von Nanostrukturen im Raster-Elektronenmikroskop

Für rasterelektronenmikroskopische Flächenmessungen an Nanostrukturen wurde ein neuer Auswerte-Algorithmus entwickelt, der auf der physikalischen Modellierung der Bildentstehung im Raster-Elektronenmikroskop basiert und auch die Form und Position von komplexen Probenstrukturen bestimmen kann. (K.-P. Johnsen, FB 5.2, klaus-peter.johnsen@ptb.de)

Sensorsystem mit neuartiger Stylus-Sonde für Mikro-/Nano-Koordinatenmessgeräte und Rasterkraftmikroskope

Eine Stylus-Sonde wird von einem Piezoelement in Längseigenschwingung versetzt und ist als dynamischer Taster in Rasterkraftmikroskopen und Mikrokoordinatenmessgeräten einsetzbar. Das Sensorsystem ist mit einem Mikroskopobjektiv kombinierbar und erlaubt auf diese Weise gleichzeitig hochauflösende taktile sowie optische Untersuchungen der Oberfläche. Weiterhin vereinfacht die Nutzung des „self-sensing“-Prinzips die direkte Messung der Sondenschwingung und ermöglicht eine Miniaturisierung der Sonde. (H.-U. Danzebrink, H. Illers, FB 5.2, hans-ulrich.danzebrink@ptb.de)



Metrologie für neue Messtechniken an großen Bauteilen

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes „Metrology for New Industrial Measurement Technologies“ (NIMTech) arbeitet die PTB mit vier weiteren europäischen Metrologieinstituten zusammen, um Fragen der Rückführung von neuartigen Messsystemen, wie z. B. Laserscannern, Indoor-GPS, hochgenauer 3D-Interferometrie, die direkt im Fertigungsumfeld mobil und flexibel zum Messen großer Strukturen bis zu mehreren zehn Metern eingesetzt werden, zu klären (F. Härtig, K. Wendt, FB 5.3, frank.haertig@ptb.de)

Vollständige und berührungslose Mikroverzahnungsmessung mittels Computertomografie

Vergleiche von Messungen mittels Computertomografie (CT) und taktiles Antastverfahren an Mikroverzahnungen ergaben nur sehr geringe Abweichungen im Mikrometerbereich. Die Ergebnisse zeigen, dass CT Geometrien von Außen- und Innenverzahnungen im Mikrobereich für industrielle Zwecke vollständig, berührungsfrei und hinreichend genau erfassen kann. (M. Neukamm, FB 5.3, marko.neukamm@ptb.de)

Formmessungen an dünnen Zylindern mittels Mehrwellenlängeninterferometrie

Ein neuartiges interferometrisches Messverfahren mit Anwendung von drei unterschiedlichen Wellenlängen wurde zur berührungslosen, nicht-scannenden Formmessung an dünnen Zylindern eingesetzt. (A. Höink, K. Meiners-Hagen, A. Abou-Zeid, FB 5.4, alexander.hoink@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Möglichkeiten zur Optimierung von Oberflächen durch Elektropolieren

Es wird über Untersuchungen zur Oberflächenoptimierung mittels Elektropolieren berichtet und die erzielten Ergebnisse werden am Beispiel der Reinstwasserleitfähigkeitsmesszelle aufgezeigt. (E. Luiken, FB 5.5, enno.luiken@ptb.de)

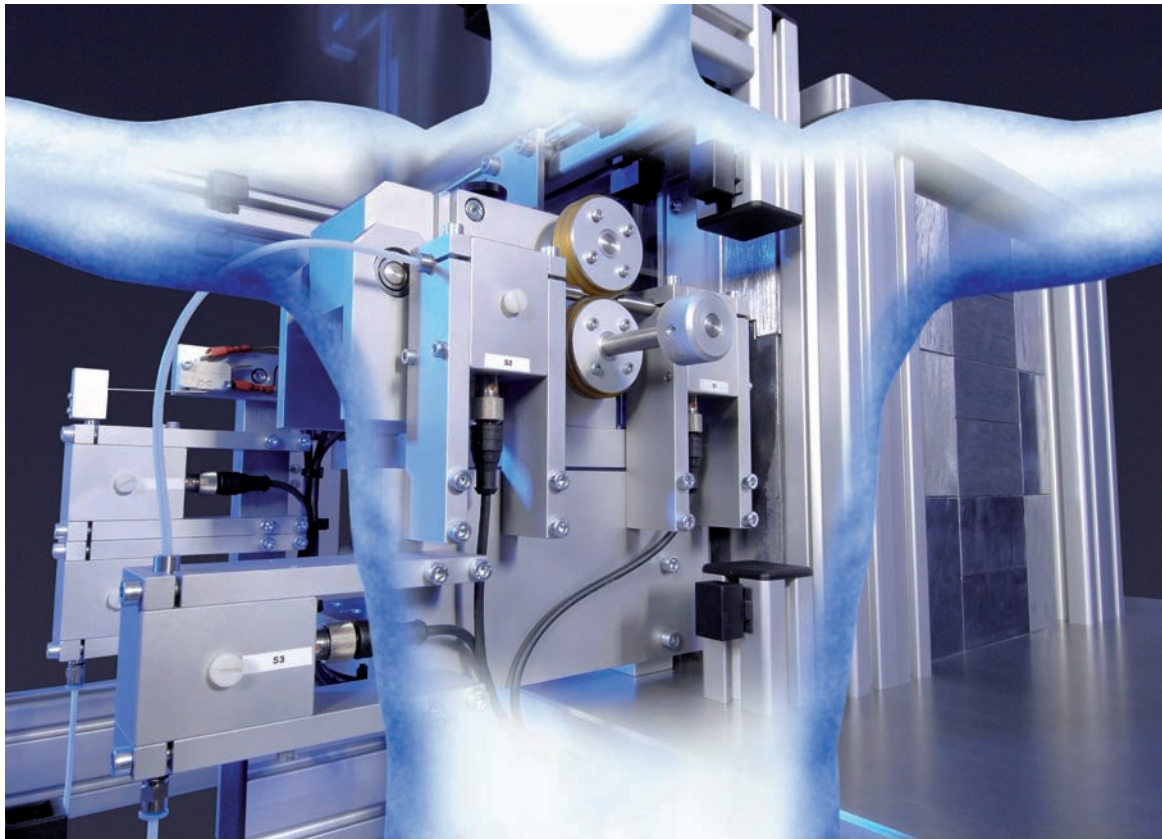
Neuer Messaufbau für die Bauartprüfung technischer Röntgenstrahler

Für die Bauartprüfung technischer Röntgenstrahler wurde ein neuer, mobiler Messaufbau für den Einsatz vor Ort bei Herstellern solcher Anlagen entwickelt. Mit dem Messaufbau wird das Umfeld eines Röntgenstrahlers in einem Kugelradius von einem Meter zum Brennfleck auf Einhaltung der zulässigen Strahlungsintensität überprüft. (F. Pilarski, FB 5.5, frank.pilarski@ptb.de)





Ionisierende Strahlung



Berichte der Abteilungen

Zerfallsdaten radioaktiver Elemente

Die Nutzung radioaktiver Stoffe für die unterschiedlichsten Zwecke erfordert immer wieder die Bestimmung oder Verbesserung von Zerfallsdaten der entsprechenden Isotope durch die PTB. Damit einher geht in der Regel auch die Entwicklung spezieller Kalibrierverfahren für Aktivitätsbestimmungen. Einige Beispiele aus dem Berichtszeitraum sollen das verdeutlichen.

In den Kontrollstäben und den Abschirmungen von Kernreaktoren entsteht auch das Isotop Cadmium-113m. Aufgrund der Halbwertszeit von etwa 14 Jahren muss dieses Nuklid bei der Behandlung und einer möglichen Endlagerung nuklearer Abfälle berücksichtigt werden. Zuverlässige Aktivitätsmessungen von Proben mit Cd-113m waren bisher kaum möglich. Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem National Oceanography Centre in Southampton war nun eine Cd-113m-Lösung mit hoher radiochemischer Reinheit verfügbar, deren spezifische Aktivität in der PTB durch Flüssigszintillationszählung gemessen werden konnte. Zusätzlich wurden sowohl die Photonen-Emissionswahrscheinlichkeit und die Halbwertszeit mit deutlich verbesserten Messunsicherheiten neu bestimmt.

Die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für Nuklearabfälle beruht unter anderem auf der möglichst genauen Kenntnis der Halbwertszeiten relevanter Nuklide. In diesem Zusammenhang ist Selen-79 eines der wenigen Nuklide, welche für die langfristige, potenzielle radiologische Gefährdung der Umwelt verantwortlich sind. Zudem kommt dem Se-79 in der Astrophysik als Verzweigungspunkt im sogenannten s-Prozess eine Schlüsselrolle für das Verständnis der Nukleosynthese schwerer Elemente zu. Deswegen haben die Fachleute ein großes Interesse daran, dieses experimen-

tel so schwer zugängliche Isotop genauer zu untersuchen. Forscher des Lehrstuhls für Radiochemie der Technischen Universität München, des Instituts für Transurane in Karlsruhe, des Paul Scherrer Instituts in Villigen und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig haben nun eine Neubestimmung der Halbwertszeit des Se-79 vorgenommen, deren publizierte Werte um etwa eine Größenordnung streuen. Das Ergebnis dieses neuen Experiments weist mit $T_{1/2} = (3,27 \pm 0,08) \cdot 10^5$ Jahren die bisher kleinsten erreichten Messunsicherheiten auf.

Für das BOREXINO-Experiment in den Laboratori Nazionali del Gran Sasso wird eine Thorium-228-Prüfquelle für Gammastrahlung benötigt, die nicht mehr als 10 Neutronen pro Sekunde emittiert. Das Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg und andere europäische Institute haben mit dieser wichtigen Nebenbedingung eine Quelle mit einer Aktivität von 5,4 MBq entwickelt und einen Prototyp hergestellt. Im Rahmen einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit hat die Arbeitsgruppe *Neutronenspektrometrie und Neutronenquellen* der PTB dann die Neutronenquellstärke dieser Quelle gemessen. Die Herausforderung bei der PTB-Messung lag in dem erwarteten geringen Verhältnis von Neutronen zu Gammastrahlung von etwa 10^{-6} . Mit einem mit He-3-Gas gefüllten Proportionalzählrohr, das standardmäßig in dem sehr gut charakterisierten Neutronenspektrometer NEMUS der PTB verwendet wird, können die durch Neutronen hervorgerufenen Messsignale von denen durch Gammastrahlung und anderen Störsignalen separiert werden. Zählrohr und Quelle sind bei den Messungen in einem Paraffinblock entsprechend der Skizze in Bild 1 angeordnet.

Die geringe prognostizierte Neutronenquellstärke der ^{228}Th -Quelle erforderte eine Messzeit von mehreren Tagen. Mit den Messungen in der PTB konnte schließlich nachgewiesen werden, dass die Neutronenquellstärke dieser Quelle die für eine Verwendung im BOREXINO-Experiment wichtige Bedingung erfüllt.

Sind die Halbwertszeiten radioaktiver Elemente konstant?

Die Frage der Veränderlichkeit charakteristischer Zerfallparameter radioaktiver Elemente durch äußere Einflüsse wird in der Fachwelt immer wieder diskutiert. So berich-

Titelbild:

Ansicht eines neuen Afterloaders für Hochdosisleistungs-Brachytherapiequellen. Das Gerät, das ^{192}Ir - und ^{60}Co -Quellen bis zu einer Aktivität von 500 GBq ferngesteuert handhaben kann, wurde speziell für die Mess- und Kalibrieranforderungen der PTB im Bereich der Dosimetrie für die Brachytherapie konzipiert.

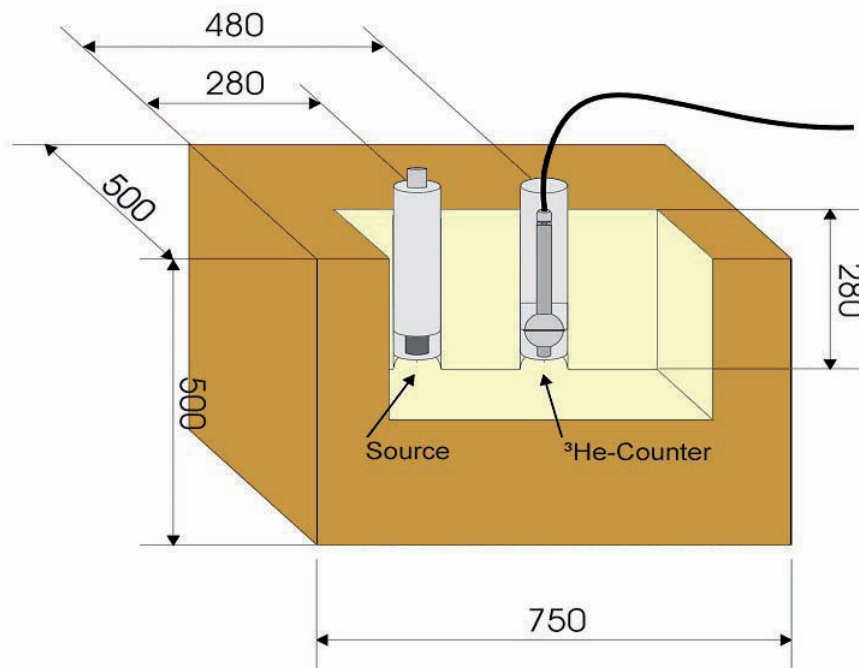


Bild 1: He-3-Zähler und Neutronenquelle im Paraffinblock, Abmessungen in mm

ten Cardone und Mitarbeiter über eine außergewöhnlich starke Abnahme der Aktivität in Thorium-228-Lösungen, wenn diese durch Ultraschall erzeugter Kavitation ausgesetzt werden [Cardone, F. et al., Physics Letters A 373 (2009) 1956-1958]. Nach Meinung der Autoren ist die Abnahme um einen Faktor 104 größer als die aufgrund des natürlichen radioaktiven Zerfalls erwartete. Die experimentellen Belege sind jedoch sehr umstritten und es gelang bisher keine Bestätigung der Ergebnisse durch andere Forschergruppen. In der PTB wurden deshalb einige Th-228-Quellen für etwa 130 Minuten einem Ultraschallbad mit einer Leistung von 320 Watt und einer Frequenz von 35 kHz ausgesetzt. Die Aktivitäten der Proben wurden vor und nach dem Ultraschallbad bestimmt. Die entsprechende relative Abweichung der Ergebnisse lag im Mittel bei nur 0,04 % und ist nicht signifikant. Auch dieses Experiment gibt also keinen Hinweis darauf, dass die Aktivität des Th-228 – und damit seine Halbwertszeit – durch Ultraschall beeinflusst werden könnte.

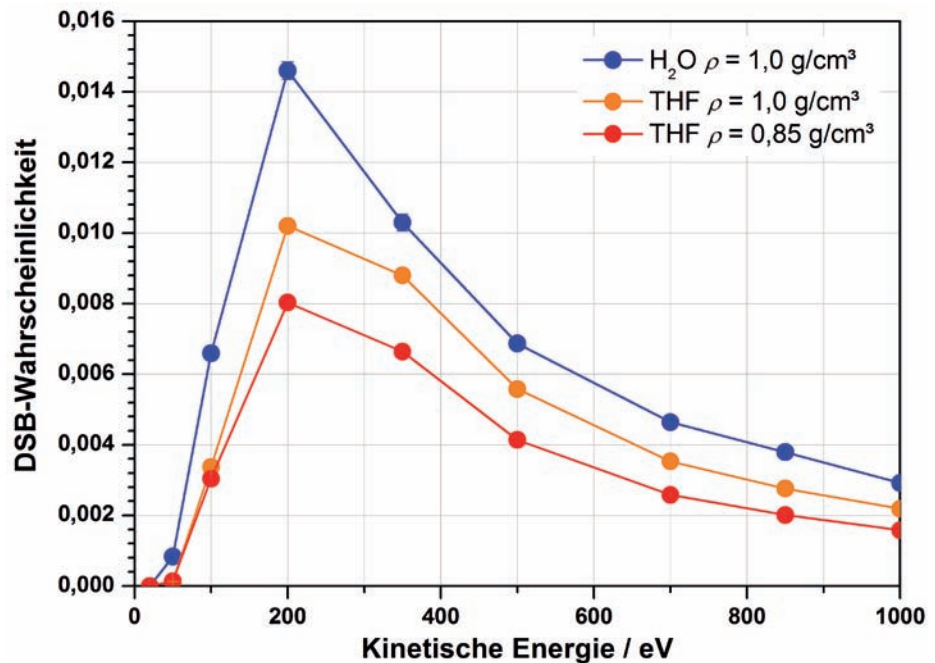
Strahlenschutz in gepulsten Photonen-Strahlungsfeldern

Die in der PTB aufgebaute Puls-Röntgenanlage ist die weltweit erste Anlage zur Erzeugung gepulster Röntgenstrahlung, bei der die physikalischen Parameter des Strahlungspulses definiert eingestellt werden können. Die Charakterisierung der Anlage konnte 2010 abgeschlossen werden und die Anlage ist einsatzbereit. In einem von der DKE geförderten

INS-Projekt (INS – Innovation mit Normen und Standards) wird zur Zeit mit Beteiligung von Vertretern der Industrie ein Normungskonzept für Prüfanforderungen erarbeitet. Die Hersteller sollen so in die Lage versetzt werden, zielgerichtet neue, für gepulste Strahlung geeignete und dringend benötigte elektronische Orts- und Personendosimeter zu entwickeln, welche später die aufzustellenden Prüfanforderungen erfüllen können. Begleitend zu der Entwicklung des Normungskonzeptes soll dieses experimentell überprüft werden. Dazu sollen Messungen an der in der PTB neu aufgebauten Puls-Röntgenanlage durchgeführt werden, und zwar an bereits vorhandenen Dosimetern und an speziell für die Messung in gepulsten Feldern hergestellten oder modifizierten Geräten.

Die bisher im Rahmen des Projekts erörterten Punkte wurden bei dem Treffen der International Electrotechnical Commission (IEC) in Seattle im Oktober 2010 vorgestellt. Dort wurde beschlossen, dass Deutschland hierzu einen Vorschlag zur Erarbeitung einer neuen internationalen IEC-Norm erarbeitet und einreicht. Damit ist seitens der PTB der erste Schritt zu weltweit einheitlichen (Bauart-)Prüfungen von Strahlenschutz-Dosimetern in gepulsten Strahlungsfeldern getan.

Bild 2: Aus Monte-Carlo-Simulationsrechnungen unter Nutzung der experimentell bestimmten Elektronenstoßquerschnitte für Tetrahydrofuran (THF) ermittelte Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung eines Doppelstrangbruchs (DSB) in einem DNA-Segment von 10 Basenpaaren, wenn die DNA im Zielvolumen durch Wasser bzw. THF mit den angegebenen Massendichten ersetzt wird



Erste realistische Simulation der Ionisationsclustererzeugung in DNA-Segmenten

Bislang berechnen alle Monte-Carlo-Programme, die zur Untersuchung der biologischen Wirkung ionisierender Strahlung auf DNA-Ebene eingesetzt werden, die Spurstruktur der Strahlung in flüssigem Wasser. Implizit werden also die Wirkungsquerschnitte von Wasser als Approximation für diejenigen der DNA angesehen. Um die Gültigkeit dieser Approximation bewerten zu können, ist es erforderlich, Simulationsrechnungen durchzuführen, die auf Wirkungsquerschnitten von DNA-Bausteinen beruhen.

Als erster Schritt hin auf dieses Ziel wurden im vergangenen Jahr die totalen, die differenziell elastischen und die doppelt-differenziell unelastischen Stoßquerschnitte von niederenergetischen Elektronen mit Tetrahydrofuran bestimmt, das dem DNA-Baustein Desoxyribose strukturell sehr ähnlich ist. Der im Umfang der abgedeckten Parameterbereiche weltweit einzigartige Datensatz wurde durch Vergleich mit theoretischen Modellen parametrisiert und in das Monte-Carlo-Programm der PTB eingebaut. Mit diesem modifizierten Programm wurden erste Simulationsrechnungen der von Elektronen erzeugten Ionisationsclustergrößenverteilungen in einem nanometrischen Zielvolumen, dessen Ausdehnung einem kurzen Segment der DNA-Doppelhelix entspricht und das von flüssigem Wasser umgeben ist, durchgeführt. Zum Vergleich wurde das Zielvolumen dabei alternativ als mit flüssigem Wasser bzw. mit

Tetrahydrofuran gefüllt angenommen. Dabei wurden zwei verschiedene Werte der Massendichte zugrunde gelegt: in einem Fall die Dichte von Wasser und im zweiten Fall die Dichte, die man erhält, wenn man in dem betrachteten Volumen die Masse der entsprechenden DNA-Bausteine hat, wobei alle vier Nukleinbasen als gleichverteilt angenommen wurden.

Aus den berechneten Ionisationsclusterverteilungen wurde schließlich für jede der betrachteten Elektronenenergien mit Hilfe eines von Garty vorgeschlagenen Modells [Garty G. et al., Phys. Med. Biol. 55, 761-781 (2010)] die Wahrscheinlichkeit für die Erzeugung eines Doppelstrangbruchs in dem betrachteten DNA-Segment ermittelt. Die vorläufigen Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Bild 2 dargestellt. Es zeigt sich, dass sich für alle betrachteten Fälle annähernd dieselbe relative Energieabhängigkeit ergibt, während die absoluten Werte erheblich voneinander abweichen. Sollte sich dieses Ergebnis auch für die weiteren DNA-Bausteine bestätigen, dann implizierte dies, dass mit konventionellen Spurstrukturprogrammen die biologische Strahlenwirkung überschätzt wird.

Charakterisierung der Strahlungsfelder kommerzieller Strahlentherapiegeräte

Für die Strahlentherapie in Krankenhäusern werden kompakte Elektronenbeschleuniger eingesetzt. Ähnlich wie in einer Röntgenröhre trifft der hochenergetische Elektronenstrahl auf

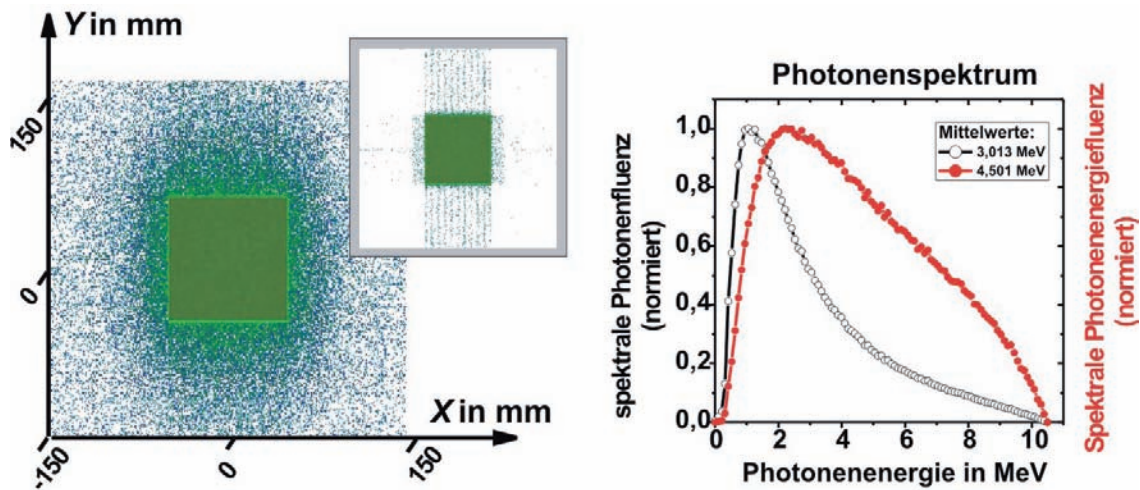


Bild 3: Links: Photonenergieflussdichte des Beschleunigers der PTB mit Lamellenkollimator in einem Meter Quellabstand (Strahlungsqualität 10 MVX, Feldgröße 10 cm x 10 cm). Die Farbskala stellt den Logarithmus der Energieflussdichte dar. Kleines Bild: Anteil ungestreuter Bremsstrahlung mit der Signatur des Lamellenkollimators. Rechts: Photonenspektrum des Nutzstrahlenbündels in einem Meter Quellabstand.

ein Metallblech hoher Massedichte. Dabei entsteht Bremsstrahlung hoher Energie. Das Energiespektrum der hochenergetischen Photonenstrahlung kann nicht direkt gemessen werden. Zur Strahlungscharakterisierung wird daher in Krankenhäusern und Kalibrierlaboratorien die Tiefenabhängigkeit der Energieabgabe in Wasser ermittelt.

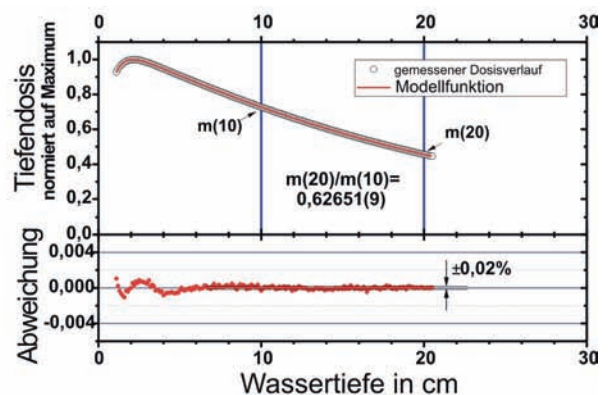
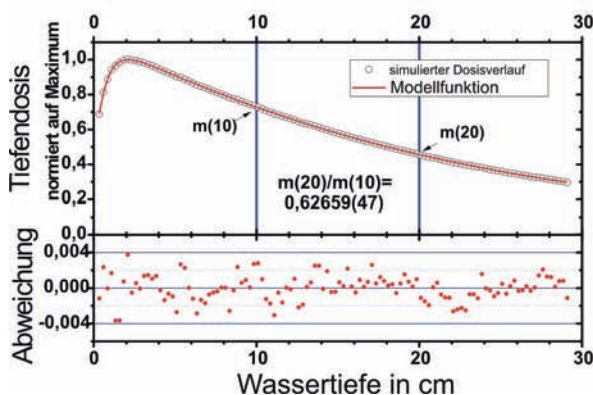
Für die beiden in der PTB vorhandenen klinischen Beschleuniger wurden unter Berücksichtigung vertraulicher Herstellerdaten Rechenmodelle erarbeitet. Mit diesen können unter Verwendung einer erprobten Software in zwei Schritten die Eigenschaften der aus dem Gerät austretenden Strahlung (Bild 3) sowie die sich im Wasser ausbreitende Strahlung und die dort absorbierte Energiedosis berechnet werden. An eine neu entwickelte Modellfunktion

können die so berechneten oder gemessenen Tiefendosiskurven mit einer Abweichung von nur 0,02 % angepasst werden (Bild 4).

Mit diesen Rechnungen ist es nun möglich, den Dosisquotienten für zwei verschiedene Wassertiefen präzise zu bestimmen und damit den in verschiedenen Normen zur Charakterisierung der Strahlungsqualität verwendeten Index Q zu berechnen. Dieser bestimmt also eine Art durchschnittlicher Photonenenergie, zugleich hängt er aber auch von der Feldgröße ab. Die erreichte Präzision bei der Bestimmung des Dosisquotienten reicht aus, um eine Änderung der Elektronenenergie des Beschleunigers von

Bild 4: Links: Simulation einer zentralen Tiefendosiskurve für die Strahlungsqualität von 10 MVX und eine Feldgröße von 10 cm x 10 cm. Die Abweichung von der Modellfunktion ist unten aufgetragen. Der Quotient der Dosiswerte in 10 cm und 20 cm Wassertiefe ist angegeben.

Rechts: Mit einer luftgefüllten Ionisationskammer (Roos-Kammer) gemessene zentrale Tiefendosiskurve. Die statistischen Abweichungen sind wesentlich kleiner als bei der Simulation, sodass sich eine systematische Abweichung von 0,1 % im Dosisaufbaubereich ergibt.



nur 80 keV bei einer Energie von 20 MeV festzustellen.

Charakterisierung einer Miniatur-Röntgenröhre mit dem Medipix2-Detektor

Der Einsatz einer Miniatur-Röntgenanlage zur intra- bzw. postoperativen Bestrahlung etabliert sich zunehmend als Alternative zu den in der heutigen Brachytherapie verwendeten radioaktiven Quellen, den sogenannten Seeds. Ein Vorteil ist, dass die lokale Bestrahlung elektrisch geregelt wird und zeitlich begrenzt erfolgt. Somit müssen keine radioaktiven Quellen dauerhaft im Körper verbleiben, wie es zum Beispiel bei der Brachytherapie mit Low-Dose-Rate-Seeds üblich ist. Die mit einer Miniatur-Röntgenanlage applizierte Dosis fällt mit dem Abstand steil ab, sodass das direkt an der Applikatoroberfläche gelegene Tumorgebe eine hohe Dosis erhält, wohingegen das weiter entfernte gesunde Gewebe geschont werden kann.

In einer Zusammenarbeit mit der Universität Erlangen-Nürnberg wurde das Röntgenspektrum einer Miniatur-Röntgenanlage untersucht. Die Anlage wird mit Röhrenspannungen bis zu 50 kV bei einem Strom von bis zu 300 μ A betrieben. Sie erreicht in 1 cm Abstand eine mit High-Dose-Rate-Seeds, die routinemäßig in der Brachytherapie eingesetzt werden, vergleichbare Luftkermaleistung. Als Detektor wurde der hybride photonenzählende Pixel-detektor Medipix2 mit 256 x 256 Pixeln und einer Pixelgröße von 55 μ m verwendet (Bild 5). Als Sensormaterial dient eine 300 μ m dicke Siliziumschicht. Der Medipix2 verfügt über eine einstellbare untere Energieschwelle, die es erlaubt, nur Energiebeiträge im Sensor, die oberhalb der Schwelle liegen, zu zählen. Erhöht man die Schwellenenergie sukzessive, kann so das Spektrum abgetastet werden. Um auf das einfallende Spektrum schließen zu können, wird das gemessene Spektrum mit der simulierten Detektorantwort entfaltet. Somit eignet

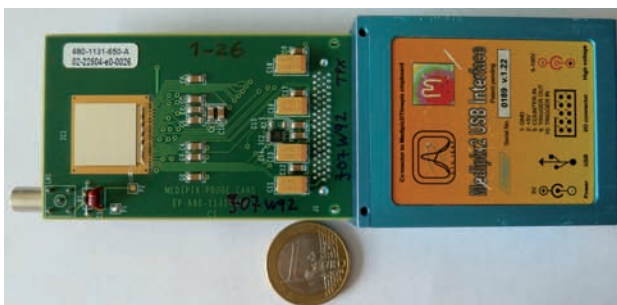
sich dieser Detektor aufgrund seiner Pixelierung sowohl zur Bildgebung als auch zur Messung des Spektrums.

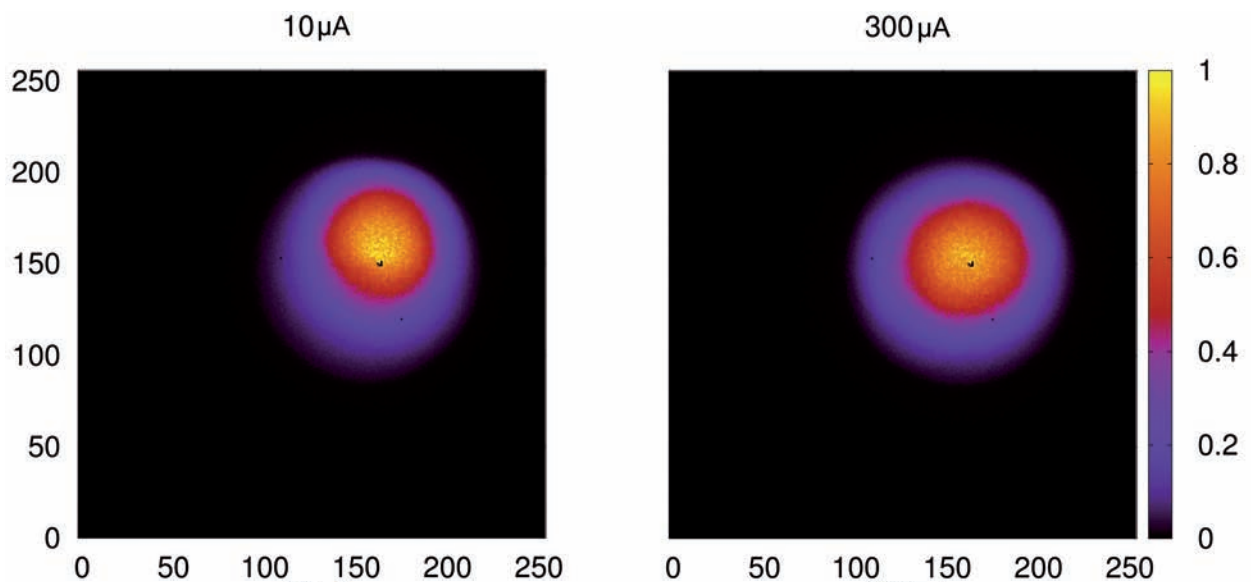
Die zweidimensionale Verteilung des Röhren-Brennflecks in Abhängigkeit des Röhrenstroms wurde mit dem Lochkamera-Prinzip gemessen (Bild 6). Es zeigte sich, dass sich die Position des Brennflecks bei geringen Röhrenströmen ändert, bei hohen Strömen aber unverändert bleibt. Bei der vorliegenden Röhre verschob sich der Fokuspunkt um bis zu 160 μ m. Das entspricht etwa 5 % des Gesamtdurchmessers der Röhre von 2,8 mm und ist somit nicht unerheblich. Die Verschiebung hat Auswirkungen auf die der (Basis-)Dosimetrie zugrunde liegende Spektrometrie. Diese benutzt einen Ge-Detektor und ist in der Zählrate limitiert, sodass in der Regel bei geringem Photonenfluss und folglich geringem Röhrenstrom gemessen werden muss. Die Ergebnisse zeigen, dass dann die Vergleichbarkeit mit der klinischen Praxis bei Vollast der Röhre nicht mehr gewährleistet ist.

Untersuchungen zur Energieauflösung von Spektrometern

In der Neutronenspektrometrie werden routinemäßig Flüssigszintillations-Spektrometer verwendet. Das Spektrum wird dabei nicht direkt gemessen, sondern aus dem gemessenen Pulshöhenspektrum bestimmt. Dieses Verfahren der Datenanalyse ist als Entfaltung bekannt. Mit Methoden der nicht-linearen Entfaltung ist es möglich, Strukturen in dem Neutronen-Spektrum aufzulösen, die feiner als die instrumentelle Auflösung des Spektrometers sind. Diese Fähigkeit wird als Superresolution bezeichnet und durch den sogenannten Superresolution-Faktor quantifiziert.

Bild 5: Medipix2-Detektor mit Auslese-Elektronik (links) und die untersuchte Miniatur-Röntgenquelle (rechts).





Die Kenntnis des Superresolution-Faktors ist in vielen Fällen wichtig. Zum Beispiel ist in Anwendungen der Neutronenspektrometrie zur Plasmadiagnostik in der Kernfusion die Temperatur eines brennenden Plasmas ein wichtiger physikalischer Parameter, der aus der Breite des Energiespektrums der Neutronenemission bestimmt werden kann. Die Fähigkeit, diese Breite zu bestimmen, hängt vom Superresolution-Faktor des Spektrometers ab. Mit einer neuen, in der PTB entwickelten Methode haben wir den Superresolution-Faktor für ein NE213-Neutronenspektrometer abgeleitet und gezeigt, dass der so bestimmte Faktor im Einklang mit Messungen am PTB-Beschleuniger steht. Dieses neue Verfahren ist auch für andere Anwendungen von Bedeutung.

Bild 6: Abbildung des Röhren-Brennflecks bei 10 μA (links) und bei 300 μA Röhrenstrom (rechts).



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Absolutbestimmung der Aktivität von ^{228}Th

In der PTB wurden zum ersten Mal Aktivitätsbestimmungen an ^{228}Th -Lösungen mittels Flüssigszintillationszählung durchgeführt und im Rahmen eines Vergleichs im internationalen Referenzsystems (SIR) eingesetzt. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

Aktivitätsbestimmung und Zerfallsdaten von $^{113\text{m}}\text{Cd}$

Die Aktivität von $^{113\text{m}}\text{Cd}$ wurde mit zwei Flüssigszintillationszählmethoden mit kleinen Unsicherheiten bestimmt. Durch Kombination des Verfahrens mit Messergebnissen aus der Gamaspektrometrie konnte die Photonen-Emissionswahrscheinlichkeit des 264-keV-Übergangs zum ersten Mal genau bestimmt werden. Auch die Halbwertszeit des Isotops wurde mit verbesserter Unsicherheit neu bestimmt. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de, H. Wershofen, FB 6.1, herbert.wershofen@ptb.de)

Thoron im Focus

Ob in Asien, Europa oder Lateinamerika: Immer mehr geologische und epidemiologische Studien richten ihr Augenmerk auf das bisher wenig beachtete kurzlebige Radon-Isotop Rn-220 (Halbwertszeit $T_{1/2} = 55$ s), auch „Thoron“ genannt. Die zum Einsatz kommenden, neu entwickelten Detektorsysteme können derzeit ausschließlich in der PTB rückführbar kalibriert werden: Seit 2010 ist das Primärnormal für die Thoron-Aktivitätskonzentration, der Thoron-Emanations-Messplatz (TEM), für Kunden verfügbar und nahezu kontinuierlich ausgebucht. (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de, A. Honig, FB 6.1, anja.honig@ptb.de)

Aufbau einer Low-Level-Radon-Referenzkammer

Um Messgeräte zur Bestimmung der Rn-222-Aktivitätskonzentration in Luft im Bereich unterhalb von 1000 Bq/m^3 rückführbar zu kalibrieren, wird zurzeit eine Low-Level-Radon-Referenzkammer aufgebaut: Dies beinhaltet ein rückgeführtes Volumen ($0,5 \text{ m}^3$) zur Erzeugung der Referenzatmosphäre, eine Einrichtung zur Überführung definierter Aktivitäten und die Entwicklung eines hochsensitiven Transfernormals. (D. Linzmaier, FB 6.1, diana.linzmaier@ptb.de, J. Leppelt, FB 6.1, joerg.leppelt@ptb.de)

Homogenität von Thoronfeldern

In einer Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Strahlenschutz wurden mathematische Simulationen (Methode: Finite Elemente basierend auf der Messung der turbulenten Transportvorgänge) einer Thoron-Verteilung mit den Messungen der zugehörigen Thoron-Aktivitätskonzentration in der Thoron-Folgeproduktkammer verglichen. (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de, A. Honig, FB 6.1, anja.honig@ptb.de, V. Schmidt, Bundesamt für Strahlenschutz, Berlin, E-Mail: VSchmidt@bfs.de)



Kalorimetrische Bestimmung von k_Q -Faktoren für Ionisationskammern in Photonenstrahlungsfeldern geringer Ausdehnung

Die in der Dosimetrie für die Strahlentherapie verwendeten Ionisationskammern werden üblicherweise bei ^{60}Co -Strahlung in der Messgröße Wasser-Energiedosis kalibriert. Bei Verwendung bei anderen Strahlungsqualitäten, z. B. bei höheren Photonenenergien, wird die Änderung des Ansprechvermögens der Ionisationskammer durch den energieabhängigen k_Q -Faktor berücksichtigt. Sowohl der Kalibrierfaktor als auch der k_Q -Faktor beziehen sich dabei auf eine Feldgröße von 10 cm x 10 cm. Moderne Bestrahlungsgeräte, z. B. medizinische Linearbeschleuniger für IMRT, Tomotherapie oder Cyberknife-Geräte, verwenden jedoch wesentlich kleinere Bestrahlungsfelder. Für die Dosimetrie unter solchen Bestrahlungsbedingungen muss sichergestellt sein, dass die ursprünglichen k_Q -Faktoren der verwendeten Ionisationskammern weiterhin Gültigkeit haben. Mit Hilfe eines Wasserkalorimeters wurden die energieabhängigen k_Q -Faktoren von Ionisationskammern des Typs NE2561 für 6 MVx und 10 MVx Photonenstrahlung bis zu Feldgrößen von 3 cm x 3 cm bestimmt. Innerhalb der erzielten Standardmessunsicherheit von ca. 0,4 % zeigte sich dabei keine Änderung der k_Q -Faktoren mit der Feldgröße. (A. Krauss, FB 6.2, achim.krauss@ptb.de)

Erzeugung definierter gepulster Photonenstrahlungsfelder jetzt möglich

Bei der Strahlenschutz-Dosimetrie in gepulsten Feldern ionisierender Strahlung gibt es messtechnische Probleme, wenn elektronische Strahlenschutzdosimeter verwendet werden sollen. Als Reaktion darauf hat die PTB die weltweit erste Anlage zur Erzeugung gepulster Röntgenstrahlung aufgebaut, bei der die physikalischen Parameter des Strahlungspulses definiert eingestellt werden können. Diese Puls-Röntgenanlage wurde in enger Zusammenarbeit mit der Firma Siemens aus einem modernen medizinischen Serienprodukt entwickelt. Sie wird es erstmalig ermöglichen, die Eignung von Dosimetern für Messungen in gepulsten Strahlungsfeldern zu prüfen. (O. Hupe, FB 6.3, oliver.hupe@ptb.de, J. Roth, FB 6.3, juergen.roth@ptb.de)

Kein thermisches Neutronenreferenzfeld der PTB am Forschungsreaktor FRG-1 der GKSS mehr

Nach über 50-jähriger Betriebszeit wurde 2008 beschlossen, den Forschungsreaktor FRG-1 der GKSS 2010 stillzulegen (GKSS-News vom Oktober 2008). Die Abschaltung erfolgte offiziell am 28. Juni 2010. Die Gründe für die Stilllegung liegen in der Neustrukturierung der Neutronenforschung in Deutschland mit der Fokussierung auf den FRM II in München. (R. Böttger, FB 6.4, reinhard.boettger@ptb.de)

Neutronenaktivierung von Molybdän-Isotopen

Die Wirkungsquerschnitte für die Neutronenaktivierung von verschiedenen Molybdän (Mo)-Isotopen wurde im Neutronenenergiebereich zwischen 7 MeV und 15 MeV gemessen. (R. Nolte, FB 6.4, ralf.nolte@ptb.de)

Stroboskopie mit thermischen Neutronen

Die Abbildung von schnellen dynamischen Prozessen von wasserstoffreichen Substanzen ist eine neue Herausforderung bei der Radiografie mit thermischen Neutronen. Ein in der PTB entwickelter Detektor, der sehr schnelle Belichtungskontrolle ermöglicht und gleichzeitig bis zu 8 Bilder aufnehmen kann, konnte sein Potenzial bei einem stroboskopischen Radiografie-Experiment am FRM2-Forschungsreaktor der TU München demonstrieren. (V. Dangendorf, FB 6.5, volker.dangendorf@ptb.de)

Digitale Datenaufnahme für die Spektrometrie mit einem hochauflösenden Diamantdetektor

Kommerziell erhältliche Detektoren aus einkristallinem Diamant bieten Potenzial für Anwendungen in Bereich Fusionsforschung. Ein neu entwickelter schneller Stromverstärker in Verbindung mit einem digitalen Datenaufnahmesystem ermöglicht Messungen bei extrem hohen Neutronenflüssen. Messungen mit monoenergetischen Neutronen und hochenergetischen geladenen Teilchen bestätigen die Eignung dieses Messsystems für hochauflösende Spektrometrie. (A. Zimbal, FB 6.5, andreas.zimbal@ptb.de)



Neutronenquellstärke einer ^{228}Th -Gamma-Prüfquelle für das BOREXINO-Experiment

Für das BOREXINO-Experiment in den Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) wird eine ^{228}Th -Gamma-Prüfquelle benötigt, die nur eine sehr geringe Neutronenemission aufweisen darf. Eine solche Quelle, angefertigt vom Max Planck Institut für Kernphysik (Heidelberg) und weiteren Partnern, wurde in der PTB untersucht. Die Messung der Neutronenquellstärke hat gezeigt, dass sie die Bedingung für die Verwendung im LNGS erfüllt. (B. Wiegel, FB 6.5, burkhard.wiegel@ptb.de)

Untersuchungen zur Energieauflösung von Spektrometern

Mit Entfaltungsverfahren ist es möglich, Strukturen in einem Spektrum zu erkennen, die feiner sind als die instrumentelle Auflösung des Spektrometers. Ein neues Verfahren erlaubt erstmals die quantitative Bestimmung dieser Eigenschaft, Superresolution genannt, für ein Szintillationsspektrometer, das für die Plasmadiagnostik eingesetzt wird. Dieses Verfahren ist auch für andere Anwendungen von Bedeutung. (M. Reginatto, FB 6.5, marcel.reginatto@ptb.de)

Retrospektive Bestimmung des statistischen Unsicherheitsbeitrags für Monte-Carlo-simulierte nanodosimetrische Verteilungen

Berechnet man deterministische dosimetrische Größen wie die Tiefendosisverteilung mittels Monte-Carlo-Verfahren, so ist es zur Bestimmung des statistischen Unsicherheitsbeitrags erforderlich, bei der Simulationsrechnung zusätzliche Zähler für die erforderlichen Hilfsgrößen einzuführen. Bei der Monte-Carlo-Simulation von stochastischen Größen, wie z.B. nanodosimetrischen Ionisationsclustergrößenverteilungen, kann man die statistischen Unsicherheitsbeiträge mit sehr viel geringerem Rechenzeitaufwand mittels eines alternativen Verfahrens aus den Simulationsergebnissen selbst ermitteln. (H. Rabus, FB 6.6, hans.rabus@ptb.de)

Totale Elektronenstreuquerschnitte von Pyrimidin

Die totalen Elektronenstreuquerschnitte von Pyrimidin, dem Grundbaustein von zwei der vier in der DNA vorkommenden Nukleinbasen, wurden experimentell im Energiebereich zwischen 20 eV und 1 keV bestimmt. (W. Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

Differentielle elastische Elektronenstreuquerschnitte von Trimethylphosphat

Die Wirkungsquerschnitte für elastische Elektronenstreuung an Trimethylphosphat wurden für Elektronenenergien zwischen 20 eV und 1 keV experimentell bestimmt und mit theoretischen Rechnungen verglichen. Damit sind nun für die beiden Bausteine des DNA-Rückgrats die elastischen Elektronenstreuquerschnitte bekannt. (W. Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

Nanodosimetrische Messungen mit Deuteronen

Das Bremsvermögen eines Stoffes ist abhängig von der Art und der Energie des abgebremsten Teilchens. Bei Ionen mit gleicher Kernladungszahl Z und unterschiedlicher Massenzahl A ist das Bremsvermögen gleich, wenn die Ionen gleiche Geschwindigkeiten haben. Da das erste Moment der Häufigkeitsverteilung der Größe von Ionisationsclustern, die mittlere Ionisationsclustergröße $M_1(Q)$, mit dem Bremsvermögen korreliert, sollte auch $M_1(Q)$ für Ionen unterschiedlicher Massenzahl A und gleicher Kernladungszahl Z bei gleicher Teilchengeschwindigkeit gleich sein. Der Vergleich der mittleren Ionisationsclustergröße $M_1(Q)$ für die gemessenen Häufigkeitsverteilung der Ionisationsclustergröße für primäre Protonen- und Deuteronenstrahlen verschiedener Teilchengeschwindigkeiten zeigt für beide Gase eine vergleichbare Abhängigkeit von der Teilchengeschwindigkeit, allerdings sind die Messdaten für Deuteronen im Vergleich zu den Werten für Protonen systematisch zu kleineren Werten hin verschoben. (G. Hilgers, FB 6.6, gerhard.hilgers@ptb.de)

Simulation nanodosimetrischer Ionisationsclustergrößenverteilungen mit Geant4-DNA

Als Ergebnis des Geant4-DNA-Projekts steht nun neben dem in der PTB entwickelten Spurstrukturprogramm ein zweites Monte-Carlo-Programm für nanodosimetrische Simulationsrechnungen zur Verfügung. Für eine Reihe von Strahlenqualitäten wurden die nanodosimetrischen Spurstrukturparameter mit den beiden Programmen berechnet und miteinander verglichen. (P. Lazarakis, FB 6.6, peter.lazarakis@ptb.de)

Erste realistischere Simulation der Ionisationsclustererzeugung in DNA-Segmenten

Die in der PTB experimentell bestimmten totalen, differentiellen elastischen und doppelt-differentiellen unelastischen Elektronenstoßquerschnitte von Tetrahydrofuran wurden in das Monte-Carlo-Programm der PTB zu Spurstuktursimulation eingebaut. Erste damit gewonnene Ergebnisse deuten darauf hin, dass bei der bislang üblichen Nutzung der Wirkungsquerschnitte von Wasser für die DNA die biologische Schädigung überschätzt wird. (M. U. Bug, FB 6.6, marion.bug@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Die Halbwertszeit von ⁷⁹Se

Die Halbwertszeit des langlebigen Isotops ⁷⁹Se konnte im Rahmen einer Zusammenarbeit mehrerer Institute mit deutlich verbesserter Unsicherheit bestimmt werden. Die PTB hat insbesondere durch Aktivitätsmessungen mit Hilfe der Flüssigszintillationszählung dazu beigetragen. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de, Gerhard Jörg, TU München, Lehrstuhl für Radiochemie, E-Mail: gerhard.joerg@radiochemie.de)

Erneuerung der Messmittel: Umzug für die Radon-Messtechnik

Die Radon-Messtechnik der PTB zieht um: Nach 20 Jahren erfolgreicher Arbeit beim Aufbau, Forschen und Entwickeln neuer Verfahren wird der bislang genutzte Laborbereich zu eng. Die Erweiterung der Radon-Messtechnik in den letzten Jahren von Radon-222 auf Radon-220 (Thoron) und seit Neuestem auf den Sektor der Low-Level-Messungen haben einen Zuwachs an Messmitteln nach sich gezogen. Im neuen Gebäude, dem renovierten Elster-Geitel Bau, sind im Kellergeschoss eine neue Radonnormal-Kammer RNK-II mit einem Volumen von ca. 21 m³ und eine teilerneuerte Thoron-Folgeprodukt-Kammer TFK-II mit einem Volumen von ca. 6 m³ errichtet worden. (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de, A. Honig, FB 6.1, anja.honig@ptb.de)

Qualitätssicherung für die Strahlentherapie mit Alanin/ESR-Dosimetrie in Belgien

In Belgien wurde ein Projekt zur Qualitätssicherung (QS) in der Strahlentherapie gestartet, das sogenannte BeldART Projekt (Belgian dosimetry audits in radiotherapy). Das verwendete Dosismesssystem, welches von der Belgischen Arbeitsgruppe am NUTEK Zentrum der XIOS Fachhochschule in Diepenbeek (BE) verwendet wird, basiert auf dem Nachweis strahlungsinduzierter freier Radikale in der Aminosäure Alanin mit Hilfe der Elektronen-Spin-Resonanz (ESR). Teile des Messsystems wurden in der PTB entwickelt, so z. B. der Probenhalter für das verwendete Bruker EMX Spektrometer und die Auswertesoftware. Programme und Verfahren wurden in Zusammenarbeit mit der PTB an die Anforderungen der Belgischen Gruppe angepasst. (M. Anton, FB 6.2, mathias.anton@ptb.de)

Charakterisierung der Strahlungsfelder kommerzieller Strahlentherapiegeräte

Für die beiden in der PTB vorhandenen klinischen Beschleuniger „Elekta Precise“ wurden die Strahlungsfelder der Photonenqualitäten von 6 MV und 10 MV erfolgreich simuliert und experimentell verifiziert. Für 25 MV, 15 MV, 8 MV und 4 MV ist dies in Vorbereitung. Somit sind die Strahlungsfelder für die Kalibrierung von Dosimetern genau bekannt. (J. Illeemann, FB 6.2, jens.illeemann@ptb.de)

Weltgrößte Beschleunigeranlage für die Dosimetrie in der Strahlentherapie fertig gestellt

Nach zweieinhalbjähriger Bauzeit und gut einjähriger Erprobungsphase hat jetzt die weltgrößte Elektronenbeschleuniger-Anlage für die Dosimetrie in der Strahlentherapie ihren bestimmungsgemäßen Betrieb aufgenommen. Auf rund 1000 m² Nutzfläche decken drei Beschleuniger alle experimentellen Anforderungen der Dosimetrie ab. Die Photonenstrahlungsfelder der klinischen Praxis können genauso realisiert werden wie wohldefinierte Elektronenstrahlen für die Grundlagenforschung. Die Anlage ist so ausgestattet, dass sowohl die Anzahl als auch die kinetische Energie der Elektronen, die auf das jeweilige Experiment treffen, mit größtmöglicher Genauigkeit bestimmt werden können, d. h. mit relativen Messunsicherheiten von jeweils kleiner als 10⁻³. (K. Derikum, FB 6.2, klaus.derikum@ptb.de)



Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens von Speicherfolien

Die Strahlentherapie ist – neben der Chirurgie und der Chemotherapie – eine häufig angewandte Behandlungsmethode bei Krebserkrankungen. Sie wird heutzutage bei mindestens der Hälfte aller Krebspatienten angewandt. Durch Anwendung moderner Bestrahlungsmethoden können Patienten so behandelt werden, dass nahezu ausschließlich das Tumorgewebe mit der gewünschten Dosis bestrahlt wird; umliegendes, gesundes Gewebe wird weitestgehend verschont. (M. Rouijaa, FB 6.2, mustapha.rouijaa@ptb.de)

Erste Kalibrierung eines Sekundärnormals für ^{192}Ir -Strahlung in der Einheit der Wasser-Energiedosisleistung

Der Normenausschuss Radiologie hat sich im Bereich der Strahlentherapie grundsätzlich für die Messgröße Wasser-Energiedosis für Kalibrierungen der in der Strahlentherapie verwendeten Dosimetriesysteme entschieden. In einem Teilbereich der Strahlentherapie, der Brachytherapie, beruht die Dosimetrie zurzeit jedoch noch auf der Charakterisierung der Strahlungsquellen in der Messgröße Luftkerma. Im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes wurde nun erstmals eine Schacht-Ionisationskammer, wie sie zur Messung der Dosisleistung von medizinischen Strahlungsquellen in der Klinik Verwendung findet, in der Einheit der Wasser-Energiedosisleistung kalibriert. Dies führt insgesamt zu geringeren Unsicherheiten bei der Planung und Bestimmung der dem Patienten applizierten Dosis. (H.-J. Selbach, FB 6.2, hans-joachim.selbach@ptb.de)

Erste Erfolge im INS-Projekt „Gepulste Strahlung im Strahlenschutz“

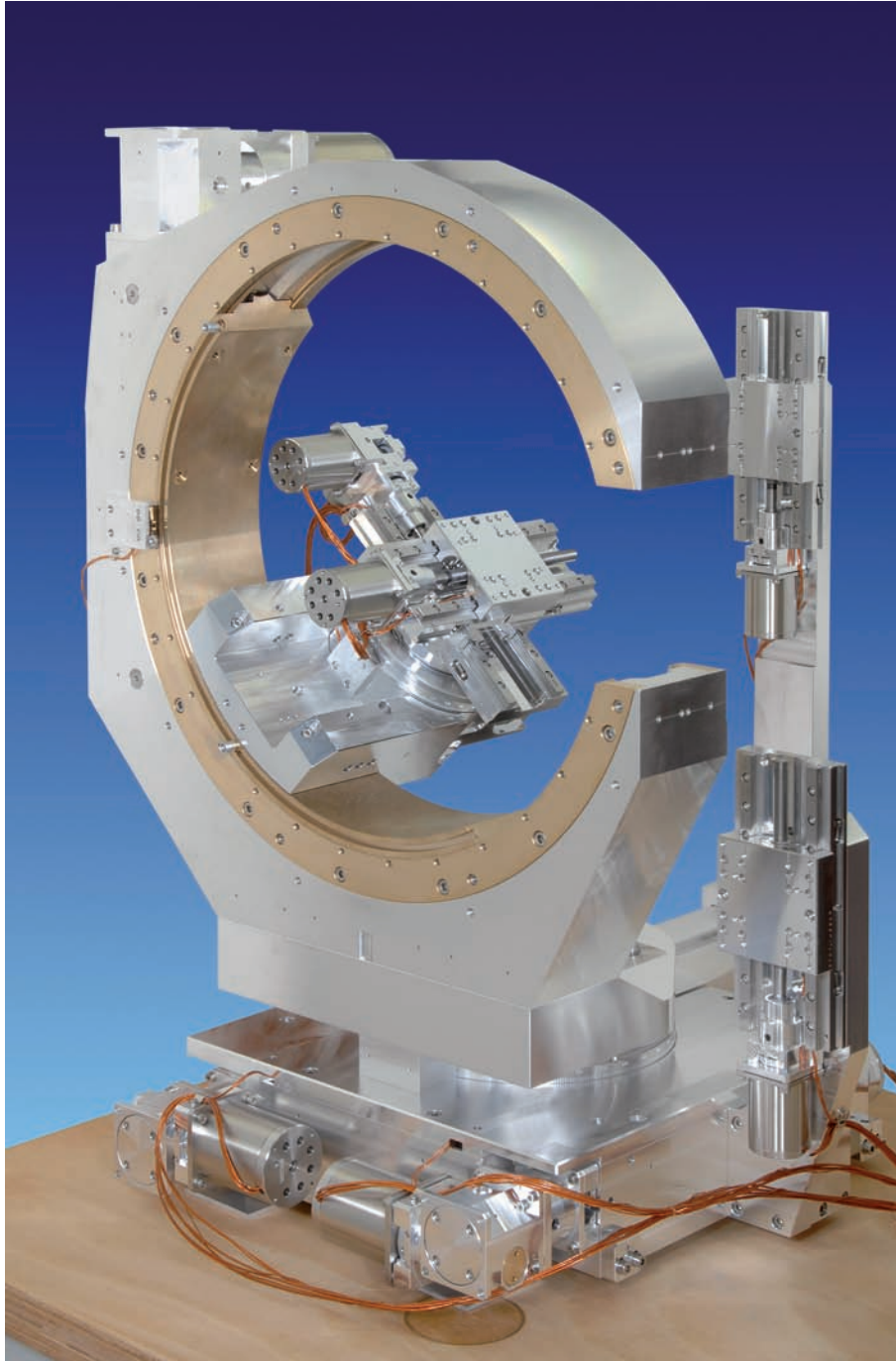
Im Rahmen des von der Deutschen Kommission Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik im DIN und VDE (DKE) geförderten Programms „Innovation mit Normen und Standards (INS)“ wurde ein Projekt „Gepulste Strahlung im Strahlenschutz“ genehmigt. Ziel dieses Projektes ist es, ein innovatives Konzept für die Normung und Standardisierung sowie die Prüfung von Strahlenschutzdosimetern für den Bereich gepulster Strahlung zu entwickeln und hieraus eine internationale Norm zu erarbeiten. (P. Ambrosi, FB 6.3, peter.ambrosi@ptb.de, O. Hupe, FB 6.3, oliver.hupe@ptb.de)

Vorstudie zum Aufbau eines direkt anzeigenden Astronautendosimeters

Im Jahre 2007 wurde von der ESA (European Space Agency) die Entwicklung eines direkt anzeigenden Dosimeters für Astronauten initiiert. Die PTB war an einer Vorstudie beteiligt, in der der konzeptionelle Aufbau eines Dosimetriesystems auf der Internationalen Raumstation (ISS) erarbeitet wurde. (M. Luszik-Bhadra, FB 6.5, marlies.luszik-bhadra@ptb.de)



Temperatur und Synchrotronstrahlung



Berichte der Abteilungen

Mit Ablauf des Jahres 2009 trat Dr. Wolfgang Buck, Leiter des Instituts Berlin der PTB und Leiter der Abteilung 7 *Temperatur und Synchrotronstrahlung*, in den Ruhestand. Dr. Gerhard Ulm wurde mit Wirkung vom 1. Januar 2010 mit der Leitung der Abteilung 7 beauftragt.

Basisaufgaben der Abteilung 7 sind insbesondere die Radiometrie, die vom THz- bis in den Röntgenbereich reicht, und die Thermometrie, die Temperaturen von 10 μK bis über 3000 K abdeckt. Weitere Aufgabengebiete mit besonderer messtechnischer Infrastruktur beziehen sich auf die Messung thermischer Energie und die Vakuummetrologie. Röntgenstrahlung, wie sie der Elektronenspeicherring BESSY II liefert, gewinnt verstärkt an Bedeutung auch im Bereich Nanometrologie.

Die Abteilung 7 beteiligt sich in großem Umfang an dem europäischen Metrologieforschungsprogramm EMRP. Nach den erfolgreichen Anträgen beim Aufruf zum Themenbereich *Energie* in 2009 wurden im Rahmen des 2010-Calls zu den Themen *Umwelt* und *Industrie* insgesamt weitere 11 neue Forschungsprojekte der Abteilung bewilligt, die 2011 anlaufen werden.

Metrologie mit Synchrotronstrahlung

Die PTB nutzt Synchrotronstrahlung seit mehr als 25 Jahren für die Metrologie, insbesondere für die Radiometrie, und seit mehreren Jahren verstärkt auch für die Nanometrologie. Der Elektronenspeicherring BESSY II deckt spektral das gesamte Röntgengebiet ab, vom Bereich des extremen UV (EUV) bis zur harten Röntgenstrahlung. An der *Metrology Light Source* (MLS) (Bild 1), die im April 2008 ihren Nutzerbetrieb aufnahm, wird nach dem Abschluss des Aufbaus von Strahlrohren und Messplätzen ab 2011 Strahlung vom THz- bis in den EUV-Bereich nutzbar sein. Bereits voll einsatzfähig ist ein auf dem MLS-Bunker auf-

gebauter Messplatz zur IR- und THz-Mikrospektrometrie, an dem gezeigt werden konnte, dass die kohärente Erzeugung von THz-Strahlung im MLS-Sonderbetrieb mit kurzen Elektronenbunchen die erwartete spektrale Breite und Leistungsverstärkung ergibt (Bild 2). Die kurzen intensiven THz-Pulse wurden bereits im Rahmen einer Kooperation zur Charakterisierung schneller supraleitender THz-Detektoren genutzt.

Das MLS-Team des Helmholtz-Zentrums Berlin, das in enger Zusammenarbeit mit der PTB die MLS betreibt und weiterentwickelt, hat inzwischen den MLS-Kontrollraum fertig eingerichtet (Bild 3). Bild 4 zeigt die Experimentierhalle, die an den MLS-Bunker angrenzt. Deutlich erkennbar sind vier Medientrassen für die vier Strahlrohre, die im Endausbau den Bereich vom UV bis zum EUV abdecken werden. Im Vordergrund zu sehen ist das bereits voll genutzte Strahlrohr für UV/VUV-Detektorkalibrierungen und -Reflektometrie. Hier wird das Kryoradiometer SYRES II (Bild 5) als primäres Empfängernormal eingesetzt, gegen das Detektoren unter Nutzung monochromatisierter Synchrotronstrahlung kalibriert werden. Ein dediziertes Strahlrohr für den EUV-Bereich, an dem insbesondere optische Komponenten für die Entwicklung der EUV-Lithografie charakterisiert werden sollen, wurde so weit aufgebaut, dass am 8. November 2010 erstmals monochromatisierte Strahlung in der Austrittsspaltebene des neuen Monochromators nachgewiesen werden konnte.

Die hohe Flexibilität des Betriebs der MLS wurde erstmals genutzt, um Photonenzähl-detektoren auch im Sichtbaren zu kalibrieren. Basis hierfür ist, dass die von der MLS emittierte spektrale Strahlungsleistung proportional zur Zahl der gespeicherten Elektronen ist, die sich um 11 Größenordnungen kontrolliert variieren lässt.

Seit 1998 arbeitet die PTB mit der europäischen Raumfahrtagentur ESA zusammen, um Detektoren und Optiken für die Röntgenastronomie weiterzuentwickeln. 2010 wurde im PTB-Laboratorium bei BESSY II eine neue Messeinrichtung zur Charakterisierung von gestapelten Röntgenoptiken für das *International X-ray Observatory* (IXO) aufgebaut. Ferner wurde ein Röntgendetektor für das Teleskop eROSITA in einem sehr breiten Photonenenergiebereich (von 3 eV bis 20 keV) charakterisiert und kali-

Titelbild:
9-Achsen-Goniometer für nanoanalytische Anwendungen der Röntgenspektrometrie mit Synchrotronstrahlung bei BESSY II



Bild 1: Blick auf einen Quadranten der MLS mit zwei Dipolmagneten (in gelb). Gut zu erkennen sind auch Abschnitte des THz- und des IR-Strahlrohrs, die an der Bunkerdecke befestigt sind.

Bild 2: Messplatz für IR- und THz-Mikrospektrometrie am THz-Strahlrohr auf dem MLS-Bunker

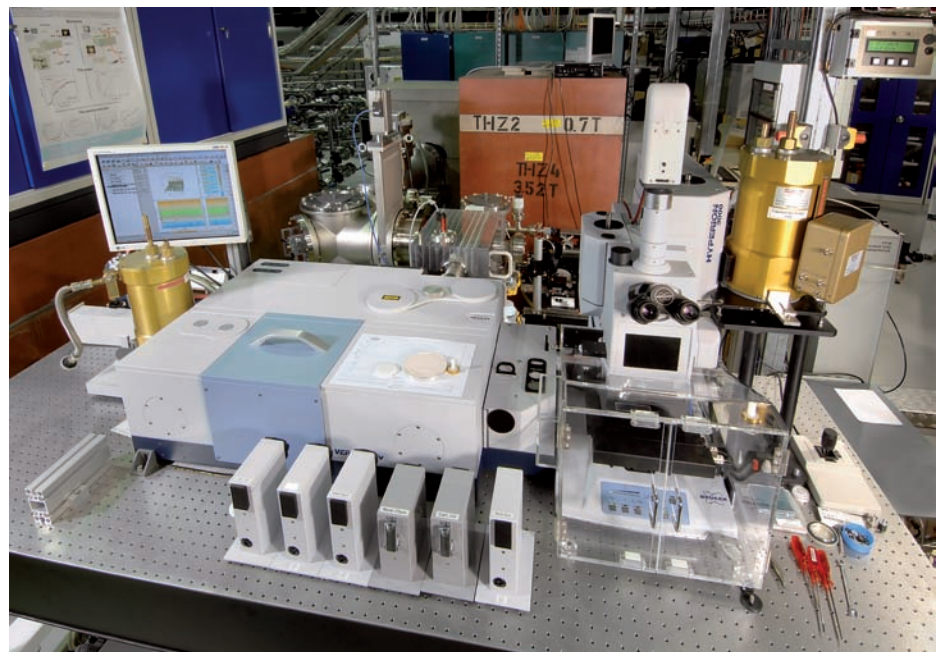


Bild 3: Kontrollraum der MLS



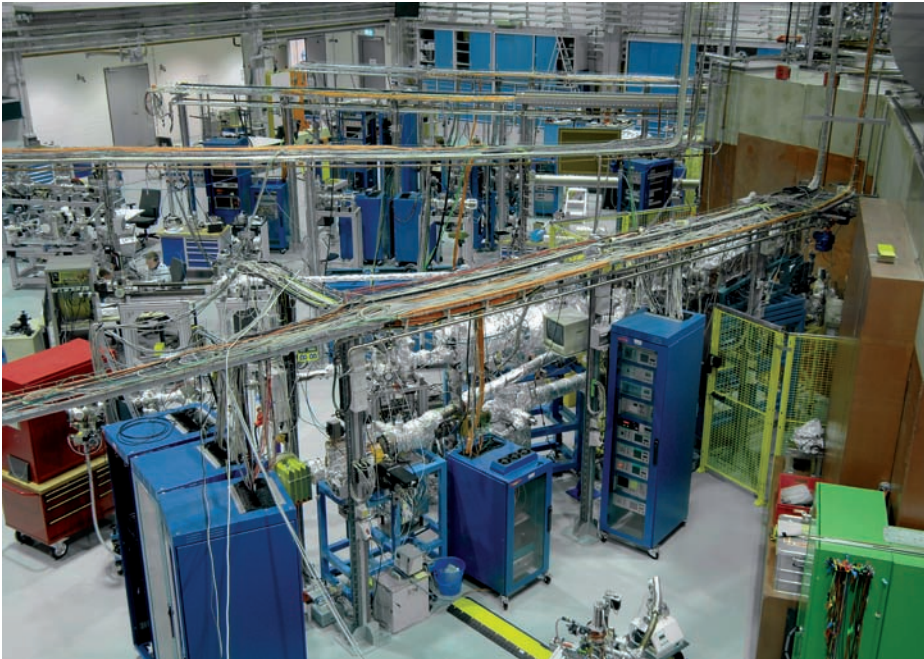


Bild 4: Blick in die Experimentierhalle an der MLS mit vier Strahlrohren, zwei davon noch in der Aufbauphase

Bild 5: Kryoradiometer SYRES II, das als primäres Empfängernormal für das UV und Vakuum-UV an der MLS eingesetzt wird



briert. Hierfür wurden Strahlrohre sowohl bei BESSY II als auch an der MLS genutzt.

Die Nutzung kurzweiliger Synchrotronstrahlung im EUV- und Röntgenbereich an dedizierten BESSY II-Messplätzen ermöglicht der PTB, verstärkt grundlegende Untersuchungen zur Nanometrologie durchzuführen. So konnte z. B. Röntgenkleinwinkelstreuung im Rahmen eines internationalen Vergleichs zur Größenbestimmung von Nanopartikeln erfolgreich eingesetzt werden. EUV-Scatterometrie und -Kleinwinkelstreuung wurden erfolgreich weiterentwickelt, ein dediziertes EUV-Scatterome-

ter befindet sich im Aufbau. Nanoanalytische Anwendungen stehen im Vordergrund bei einer Reihe von neuen Verbundvorhaben mit Industriebeteiligung, etwa zur Waferanalytik im Rahmen der *European 450mm Equipment & Materials Initiative: EEMI 450* oder zur Elektromobilität im Rahmen des neuen DFG-Schwerpunktprogramms 1473 WeNDeLIB – *Werkstoffe mit neuem Design für verbesserte Lithium-Ionen-Batterien*.

Thermometrie

Eine Aufgabe von höchster Priorität in der Thermometrie stellte auch 2010 die Bestimmung der





Bild 6: Blick auf den geöffneten Thermostaten des DCGT mit den Mess- und Gasversorgungssystemen

Boltzmann-Konstanten k zur Neudefinition der Basiseinheit Kelvin dar. Dafür wurde das neue Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer (DCGT) in Betrieb genommen (Bild 6). Beim DCGT wird der Zusammenhang zwischen der relativen Dielektrizitätskonstante ϵ_r und dem Druck eines Gases unter isothermen Bedingungen gemessen. Um daraus k bestimmen zu können, war es unter anderem notwendig, spezielle Messkondensatoren, neuartige Kolbenmanometer für den Druckbereich bis zu 7 MPa, eine Präzisions-Kapazitätsmessbrücke und einen großvolumigen, hochstabilen Thermostaten zu entwickeln und herzustellen. In einer ersten Versuchsreihe wurde das Zusammenspiel dieser an die Grenzen des Machbaren gehenden Komponenten getestet. Es konnte ohne aufwendige Parameteroptimierung nachgewiesen werden, dass die relativen Instabilitäten der Temperatur und des Drucks kleiner als 0,1 ppm bzw. 1 ppm über Zeiträume von mehreren Stunden sind. Die sich aus Kapazitätsverhältnismessungen ergebende elektrische Suszeptibilität $\chi = (\epsilon_r - 1)$ weist eine alle Einflussgrößen erfassende Standardabweichung von kleiner als 4 ppm auf. Geplant sind nun zusätzliche systematische Untersuchungen zur

Druckmessung und der effektiven Kompressibilität der verwendeten Kondensatoren, um die angestrebte relative Gesamtunsicherheit für k von 2 ppm zu erreichen.

Zur Erweiterung der Kalibriermöglichkeiten für Thermoelemente bei hohen Temperaturen wurde ein neuartiger Platin-Miniaturfixpunkt mit einem hochreinen Aluminiumoxid-Miniaturtiegel entwickelt (Bild 7, Bild 8). Die Schmelztemperatur von reinem Platin beträgt 1768,2 °C und liegt damit an der oberen Einsatztemperaturgrenze der häufig verwendeten Pt30%Rh/Pt6%Rh-Thermoelemente (Typ B). Damit besteht erstmals die Möglichkeit, diese Thermoelemente in ihrem gesamten Temperaturbereich (400 °C bis 1800 °C) an Fixpunkten zu kalibrieren. Der Einsatz von Miniaturfixpunkten der Metalle Palladium (1553,4 °C) und Platin in der PTB zur Kalibrierung von Thermoelementen hat gegenüber der in anderen Metrologieinstituten Europas häufig praktizierten Drahtschmelzmethode den Vorteil, dass eine Verunreinigung der Thermodrähte vermieden wird. Außerdem können Miniaturfixpunkte auch für die Kalibrierung von Mantelthermoelementen verwendet werden.

Platin-Dünnschicht-Widerstandsthermometer (Bild 9) haben während der vergangenen Jahre die drahtgewickelten Widerstandsthermometer bei industriellen Anwendungen nahezu vollständig ersetzt. Allerdings wird in der gegenwärtig verwendeten internationalen Norm IEC 60751 nicht berücksichtigt, dass sich die Kennlinien dieser Sensortypen bei Temperaturen oberhalb von ca. 250 °C erheblich unterscheiden. Die PTB engagiert sich umfassend

Bild 7: Platin-Miniaturfixpunktzelle

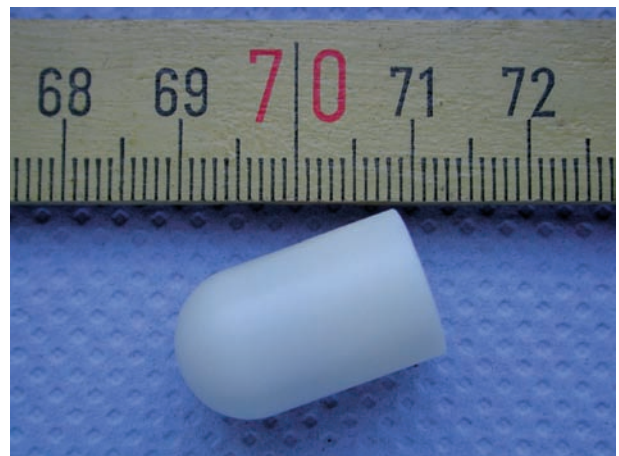
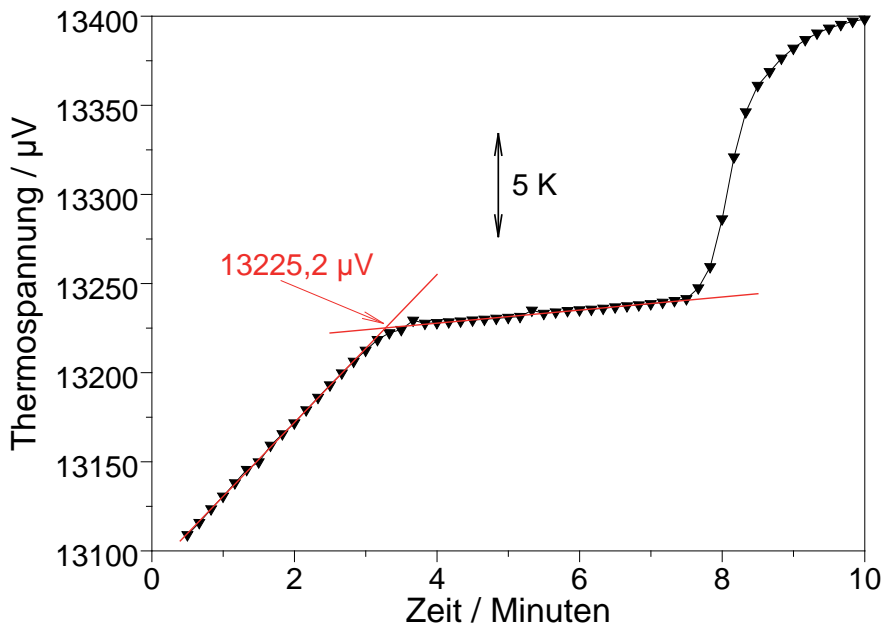


Bild 8: Schmelzkurve eines Pt-Miniaturfixpunktes



in der Normenarbeit und hat vereinbart, die Kennlinie von Platin-Dünnschichtthermometern verschiedener Hersteller mit dem Ziel zu vermessen, eine für diesen Sensortyp charakteristische Kennlinie in die entsprechenden Normen aufzunehmen. An den Untersuchungen waren auch verschiedene Sensor- und Thermometerhersteller beteiligt.

Bei der Kalibrierung von Strahlungsthermometern an Hohlraumstrahlern für die berührungslose Temperaturmessung nimmt oberhalb der Temperatur des Kupfererstarungsfixpunktes (1084,62 °C) die Messunsicherheit stetig zu, da die Internationale Temperaturskala im Hochtemperaturbereich über das Planck'sche Strahlungsgesetz definiert ist. Die Kenntnis der absoluten spektralen Empfindlichkeit des Strah-

lungsthermometers ermöglicht jedoch als Alternative die radiometrische Temperaturmessung. Die Temperaturmessung basiert in diesem Fall auf der Detektorradiometrie. In der Strahlungsthermometrie wurde deshalb ein Messplatz aufgebaut, der die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von Strahlungsthermometern mit Siliziumempfängern mit einer relativen Messunsicherheit von 0,2 % rückgeführt auf ein Kryoradiometer als das Primärnormal der Detektorradiometrie erlaubt.

Die Bestimmung des spektralen Emissionsgrads, der eine wesentliche Größe für alle praktischen Anwendungen der berührungslosen Temperaturmessung ist, gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die PTB kann z. Zt. Emissionsgradmessungen in einem Temperaturbereich

Bild 9: Industrielle Dünnschicht-Widerstandsthermometer

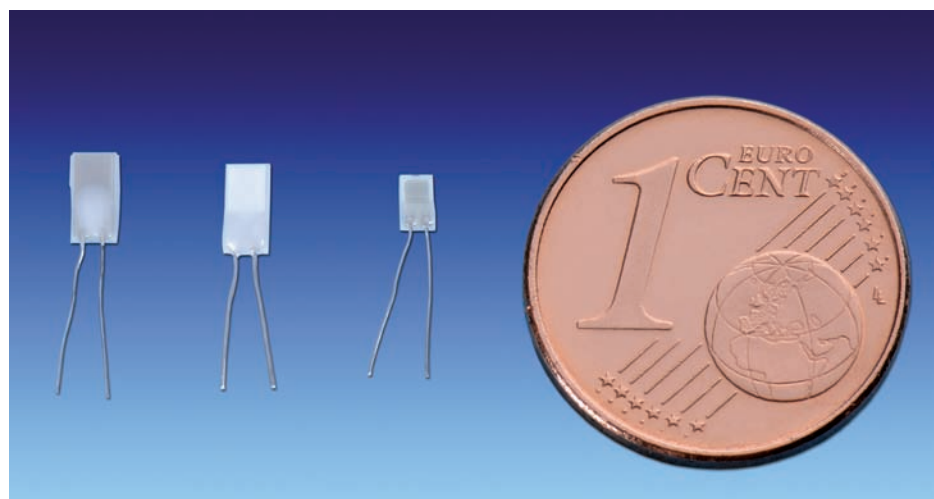
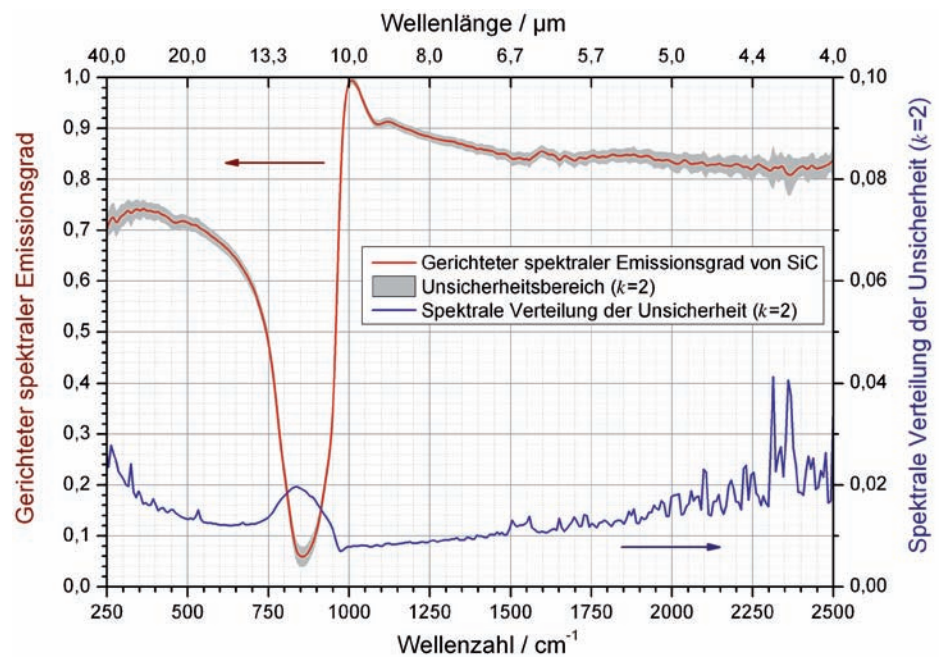


Bild 10: Spektraler Emissionsgrad von SiC im Wellenlängenbereich von 4 μm bis 40 μm und die in der PTB erzielten Messunsicherheiten



von 80 °C bis 500 °C durchführen und ist dabei, diesen Messbereich zu höheren und tieferen Temperaturen auszudehnen. Einen vom *Comité Consultatif de Thermométrie* (CCT) organisierten internationalen Vergleich hat die PTB erfolgreich abgeschlossen. SiC wurde aufgrund seiner guten Stabilität und seiner starken Variation des Emissionsgrades im untersuchten Wellenlängenbereich als ein Vergleichsmaterial ausgewählt (Bild 10).

Nicht nur für den Emissionsgrad, auch für andere thermophysikalische Materialeigenschaften gilt, dass sie für die Beschreibung energierelevanter Hochtemperaturprozesse mit noch kleinerer Messunsicherheit bestimmt werden müssen. Im Rahmen eines gemeinsamen Drittmittelprojekts mit der Netzsch Gerätebau GmbH und weiteren Partnern konnte für die thermische Analyse mittels der dynamischen Differenzkalorimetrie die Genauigkeit der Temperaturmessung im Bereich von 1000 °C bis zu 2290 °C deutlich verbessert werden, indem eine in-situ Kalibrierung der geräteinternen Thermoelemente durch eutektische Metall-Kohlenstoff-Fixpunkte entwickelt wurde.

Die TEMPMEKO ist eine der wichtigsten internationalen Konferenzen für die Thermometrie. Sie fand vom 31. Mai bis zum 4. Juni 2010 in Portoroz, Slowenien statt, zum ersten Mal gemeinsam mit dem *International Symposium on Humidity and Moisture* (ISHM). Insgesamt wurden 138 Fachvorträge gehalten und 206 Poster vorgestellt, mit über 30 Beiträgen unter Beteiligung der PTB. Wissenschaftlich für die PTB

besonders relevant waren die Sitzungen zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante für die Neudefinition des Kelvin, zur „Mise en pratique“ für die Weitergabe der Temperatureinheit nach deren Neudefinition, zur Entwicklung und Charakterisierung von hochreinen und eutektischen Fixpunkten für die Internationale Temperaturskala und zu neuen Erkenntnissen und Methoden in der Strahlungsthermometrie. Erstmals wurden die wissenschaftliche Programmgestaltung und die Herausgabe der Proceedings im *International Journal of Thermophysics* für den TEMPMEKO-Anteil von der lokalen Organisation abgetrennt und von der PTB geleitet.

Im Bereich ultratiefer Temperaturen ist die PTB seit 2009 mit den Fachbereichen 7.5 *Kryo- und Vakuumphysik* und 7.4 *Temperatur* an dem von der EU innerhalb des 7. Rahmenprogramms geförderten Vorhaben „European Microkelvin Collaboration“ beteiligt. Unter anderem wurde im Rahmen dieses Vorhabens eine experimentelle Studie zur Thermometrie mit Platin-NMR erarbeitet.

Für die Entwicklung und Herstellung supraleitender Sensorschaltungen im Fachbereich 7.5 konnten neue Ausrüstungen in erheblichem Umfang beschafft und in Betrieb genommen werden. Ein Rasterelektronenmikroskop mit Elektronenstrahlolithographiesystem in Verbindung mit einer Plasmaätzenanlage schaffen die Voraussetzungen für die Einführung neuer Herstellungsverfahren im Bereich der Mikrofabrikation von SQUID-Schaltungen mit klei-

nen Strukturabmessungen. Im Rahmen interner Entwicklungsarbeiten und in Kooperation mit dem NPL innerhalb des iMERA-plus-Vorhabens „NanoSpin“ werden derzeit neuartige mikro- und nanostrukturierte SQUID-Schaltungen u. a. für die Messung kleinster magnetischer Momente entwickelt (Bild 11).

Detektorradiometrie

Im EU-geförderten Projekt „Candela: Towards quantum-based photon standards“ wurden wichtige Meilensteine auf dem Weg zum berechenbaren Strahlungsdetektor erreicht. Messplätze zur Bestimmung der Homogenität und Linearität von Detektoren wurden aufgebaut und weiterentwickelt. Sie werden zur Charakterisierung der in dem berechenbaren Detektor eingesetzten neuartigen Silizium-Photodioden genutzt. Ein Messplatz zur hochgenauen Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit wurde an die speziellen Erfordernisse dieses Projektes angepasst und zur Charakterisierung eines Prototyps des berechenbaren Detektors erstmalig eingesetzt. Herzstück dieses Messplatzes ist ein Kryoradiometer als Primärnormal für die optische Strahlungsleistung. Mit dessen Hilfe soll die Berechenbarkeit der spektralen Empfindlichkeit des neuen Detektors mit einer relativen Unsicherheit von deutlich unter 10^{-4} überprüft werden.

Um Kundenaufträge zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von Detektoren noch effizienter bearbeiten zu können, wurde die hierfür eingesetzte Messapparatur in wesentlichen Teilen erneuert und erweitert. So können jetzt alle notwendigen Sekundärnor-

male für Kalibrierungen im Spektralbereich von 200 nm bis 2000 nm ständig in der Apparatur verbleiben und gegen diese verschiedene Kundendetektoren ohne Umbaumaßnahmen kalibriert werden.

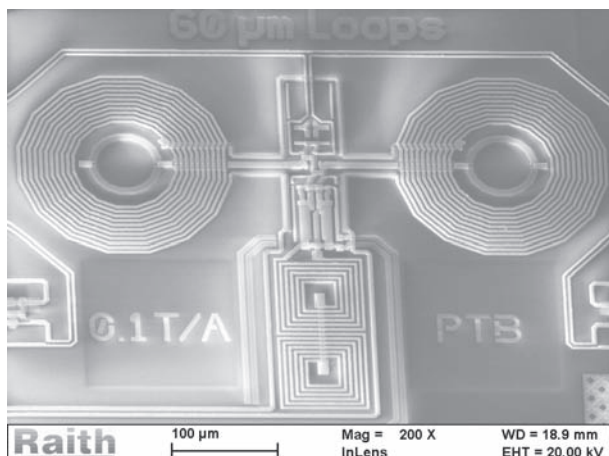
In der detektorgestützten Terahertz-Radiometrie wurden weltweit erste rückführbare Kalibrierungen von Kundendetektoren bei 2,52 THz durchgeführt. Schwerpunkte der aktuellen Arbeit sind die Erweiterung des für Kalibrierungen zur Verfügung stehenden Spektralbereiches auf den Bereich von 1 THz bis 5 THz und, im Rahmen eines Drittmittelprojekts, die Entwicklung eines auf gute Kalibrierfähigkeit optimierten thermischen THz-Detektors unter Einbindung eines industriellen Partners.

Thermische Energie

Im Fachbereich 7.6 *Wärme* wurde die Möglichkeit zur Charakterisierung von fluiddynamischen Effekten in Volumenstromsensoren durch die Kombination zweier laseroptischer Methoden entscheidend weiterentwickelt.

Zum ersten Mal wurde ein laseroptisches Ganzfeldverfahren (Particle Image Velocimetry, PIV), mit dessen Hilfe sich mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung simultan die drei Geschwindigkeitskomponenten einer Strömung bestimmen lassen, mit einer rückführbaren laseroptischen Methode (Laser Doppler Velocimetry, LDV) validiert. Dazu wurden komplexe Strömungszustände, wie z. B. das Geschwindigkeitsfeld eines definiert generierten Dralls in einer Rohrleitung, mit beiden Methoden bestimmt. Die daraus ermittelten Abweichungen des Strömungsgeschwindigkeitsfeldes betragen weniger als 0,5 %. Dies kann als Durchbruch für die PIV gewertet werden, deren Messabweichung in der aktuellen Literatur derzeit noch auf rund 5 % abgeschätzt wird. Die PIV hat gegenüber der LDV den wesentlichen Vorteil, dass die Messzeit um etwa 3 Größenordnungen reduziert ist (Bild 12).

Bild 11: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines integrierten SQUID-Mikrosuszeptometers



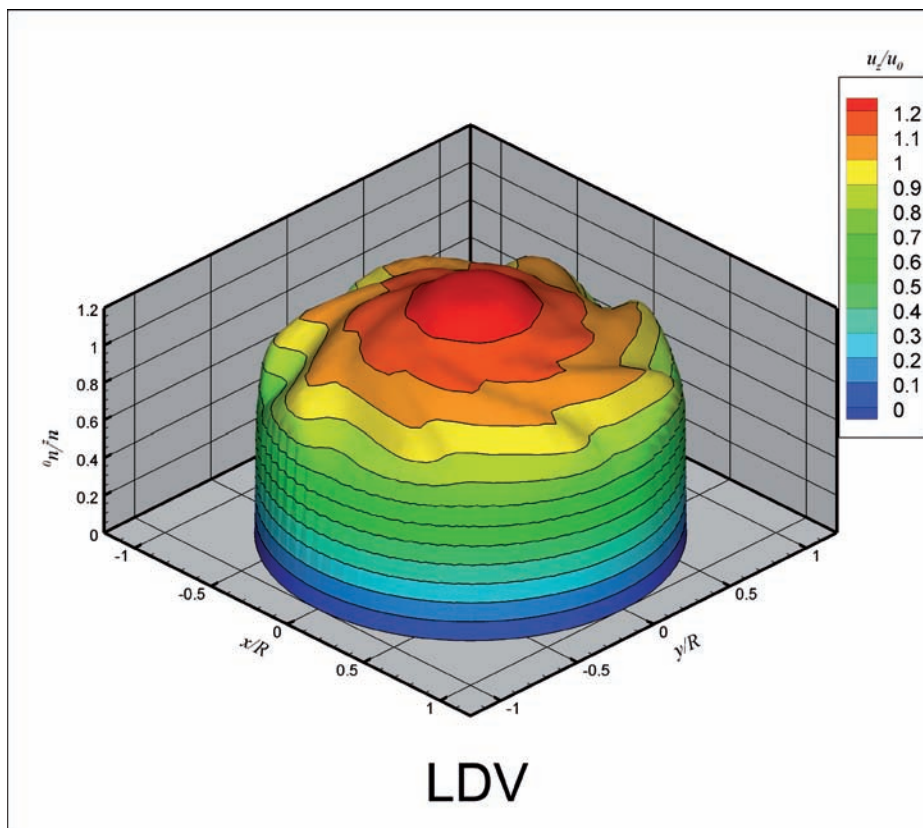
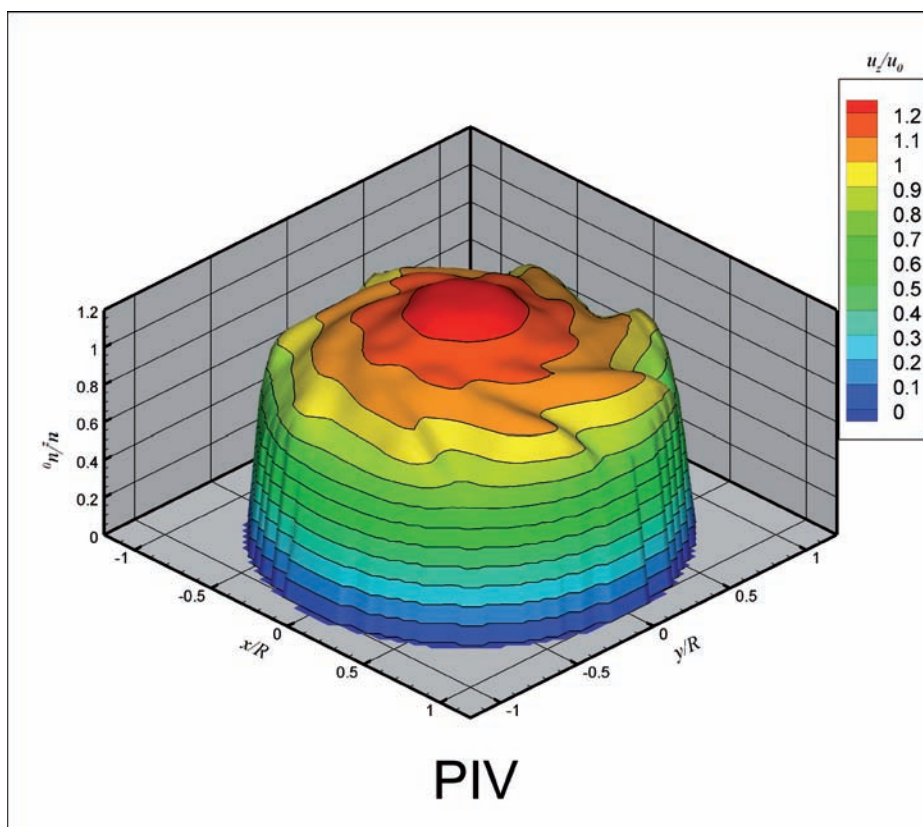


Bild 12: Axialkomponente des Geschwindigkeitsfeldes eines definiert generierten Dralls in einer Rohrleitung, gemessen mit Particle Image Velocimetry (PIV) in 100 s und mit Laser Doppler Velocimetry (LDV) in 38 h



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

2010 Young Spectrometrist PhD Award

Die European X-ray Spectrometry Association (EXSA) hat im Juni 2010 auf der European Conference on X-Ray Spectrometry (EXRS 2010) in Figueira da Foz (Portugal) Dr. Matthias Müller mit dem 2010 Young Spectrometrist PhD Award ausgezeichnet. Durchgeführt hat Matthias Müller die Experimente für seine Promotion im PTB-Labor bei BESSY II im Zusammenhang mit der methodischen Weiterentwicklung der quantitativen, wellenlängendispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse mit Synchrotronstrahlung in der Arbeitsgruppe 7.12 *Röntgenspektrometrie*. (M. Müller, FB 7.1, matthias.mueller@ptb.de, B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

Röntgenlaserexperimente der PTB bei FLASH

Am Hamburger Freie-Elektronen-Laser für weiche Röntgenstrahlung FLASH konnte an Xenon-Atomen erstmals der Prozess der Above Threshold Ionization (ATI) in einer inneren Elektronenschale beobachtet werden. Die entsprechenden elektronenspektroskopischen Ergebnisse wurden in Kooperation u. a. mit dem Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY, der Universität Dublin und der Universität Paris-Süd erzielt und in *Physical Review Letters* (PRL 105 (2010) 013001) veröffentlicht. Die Experimente stehen im Zusammenhang mit der Entwicklung von Methoden zur Photonendiagnostik an Röntgenlasern, die auf der Photoionisation von Gasen basieren. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

Charakterisierung von IXO-Optiken mit einem Röntgen-Nadelstrahl bei BESSY II

Zur Charakterisierung von gestapelten Röntgenoptiken für das International X-ray Observatory (IXO), einem gemeinsamen Projekt von ESA, NASA und JAXA, wurde die X-ray Pencil Beam Facility (XPBF) im PTB-Labor bei BESSY II weiter ausgebaut. Damit sind Messungen bei drei verschiedenen Photonenenergien und zwei unterschiedlichen Abständen hinter der Optik möglich. Für einen Abstand von 20 m, der der geplanten Fokallänge von IXO entspricht, wurde die Möglichkeit einer vertikalen Bewegung des dabei verwendeten CCD-Detektors, der sowohl den direkten als auch den reflektierten Strahl registriert, von mehr als 2 m implementiert. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Metrology Light Source (MLS)

Primäres Strahlernormal: Erstmals wurde die berechenbare, undispergierte Strahlungsleistung der MLS mit einem Kryoradiometer gemessen. Dieser direkte Vergleich des primären Strahlernormals MLS mit einem primären Detektornormal wurde bei verschiedenen Elektronenenergien und Elektronenströmen durchgeführt und ergab jeweils eine gute Übereinstimmung im Rahmen der kombinierten Messunsicherheiten. (R. Klein, FB 7.2, roman.klein@ptb.de)

Berechenbare Undulatorstrahlung: Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde die berechnete Strahlungsleistung der Undulatorstrahlung an der MLS mit verschiedenen, rückführbar auf ein Kryoradiometer kalibrierten Filterradiometern vermessen. Berechnete und gemessene Strahlungsleistung stimmten sehr gut im Rahmen der kombinierten Messunsicherheiten überein. (R. Klein, FB 7.2, roman.klein@ptb.de)



Erste Messungen zur rückführbaren Kalibrierung von Photonenzähl-detektoren: Die von der MLS emittierte spektrale Strahlungsleistung ist proportional zum Strom der gespeicherten Elektronen, der sich um bis zu elf Größenordnungen variieren lässt. Dies wurde genutzt, um einen Photonenzähl-detektor rückführbar auf das Primärnormal für die Messung der Leistung optischer Strahlung – das elektrische Substitutionsradiometer – zu kalibrieren. Hierfür wurde die von der MLS emittierte Strahlungsleistung im Bandpass eines Interferenzfilters mit einem Trap-Detektor bestimmt, der zuvor gegen das Primärnormal kalibriert worden war. Danach wurde die Strahlungsleistung der MLS kontrolliert um mehr als acht Größenordnungen durch Reduktion des Elektronenstroms abgesenkt, um den Zähl-detektor zu kalibrieren. (R. Klein, FB 7.2, roman.klein@ptb.de, I. Müller, FB 7.3, ingmar.mueller@ptb.de)

Einbeziehung von Rauheit in die Bestimmung von Linienprofilen mit Scatterometrie

Im Rahmen des CDuR32- und ABBILD-Projektes des BMBF wurde die Nutzung von EUV-Scatterometrie für die Bestimmung von Linienprofilen entwickelt. Durch Ableitung eines analytischen Modells für den Einfluss der Rauheit auf die Messergebnisse der Scatterometrie wurde eine Abschätzung der durch die Rauheit induzierten Messunsicherheit möglich. Es konnte gezeigt werden, dass für bestimmte Parameter, wie z. B. den Kantenwinkel, die Rauheit alle anderen Unsicherheitsbeiträge deutlich dominiert. Mit diesen Resultaten wird eine metrologische Konsistenz zwischen den mikroskopischen Messverfahren und der Scatterometrie erreicht. (A. Kato, FB 7.2, akiko.kato@ptb.de, F. Scholze, FB 7.2, frank.scholze@ptb.de)

Entwicklung von EUV-Kleinwinkelstreuung

Für den Kontrast in der Abbildung mit EUV-Objektiven ist eine extrem geringe Rauheit der Oberflächen im Bereich von unter 0,1 nm rms über einen sehr breiten Bereich der Ortsfrequenz erforderlich. Durch Kollimation der einfallenden Strahlung auf unter 100 μrad können mit EUV-Kleinwinkelstreuung unter senkrechtem Einfall Ortsfrequenzen im Bereich bis zu 0,1 μm^{-1} herunter beobachtet werden. In diesem Bereich arbeiten die alternativen Verfahren Rastermikroskopie und Mikrointerferometrie an ihrer jeweiligen lang- bzw. kurzwelligen Grenze. Die Messung mit einem alternativen Verfahren ist daher von großem Interesse und wurde im PTB-Labor bei BESSY II mit EUV-Kleinwinkelstreuung erstmals realisiert. (F. Scholze, FB 7.2, frank.scholze@ptb.de)

Aufbau des EUV-Strahlrohres an der MLS

Für die Weiterentwicklung der EUV-Radiometrie wird an der Metrology Light Source zurzeit ein neues Strahlrohr aufgebaut. Im Sommer 2010 wurde als letzte Komponente das Beugungsgitter geliefert und im EUV-Reflektometer bei BESSY II charakterisiert, um im November 2010 erstmals monochromatisierte EUV-Strahlung an der MLS zu erzeugen. Gegenüber dem EUV-Strahlrohr bei BESSY II wird die verfügbare Strahlungsleistung deutlich erhöht sein und es werden erstmals Einstellmöglichkeiten für die Polarisation der Strahlung geschaffen. (F. Scholze, FB 7.2, frank.scholze@ptb.de)

Solar Orbiter Mission

Der *Solar Orbiter* der ESA ist eine Raumsonde, die nach ihrem Start (voraussichtlich 2017) die Aktivität der Sonne erforschen wird. Für verlässliche Langzeitmessungen absoluter Strahlungsintensitäten im Spektralbereich zwischen 10 nm und 250 nm müssen optische Komponenten (wie Spiegel und Detektoren) entwickelt, charakterisiert und kalibriert werden. Hierzu wurde mit dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS) in Katlenburg ein Kooperationsvertrag abgeschlossen sowie mit der Untersuchung der Beständigkeit optischer Beschichtungen unter massiver Bestrahlung begonnen. (A. Gottwald, FB 7.2, alexander.gottwald@ptb.de)



Stabile Lyman-Alpha-Detektoren

Im vakuum-ultravioletten Spektralbereich, speziell für die Lyman-Alpha-Wellenlänge der elementaren Wasserstoffemissionslinie bei 121 nm, ist die Bestrahlungsstabilität der typischerweise als sekundäre Empfängernormale genutzten Halbleiterphotodetektoren ein kritischer Parameter. Hochgradige Alterung bei gleichzeitig geringer spektraler Empfindlichkeit begrenzt die Möglichkeiten einer hochwertigen Weitergabe der spektralen Empfindlichkeit. In einer Forschungs Kooperation mit der TU Delft (NL) wurde mit der Entwicklung und Charakterisierung verbesserter Photodioden begonnen, welche auf den technischen Entwicklungen für die industrielle Photolithographie (bei 193 nm und zukünftig 13 nm) basieren. (A. Gottwald, FB 7.2, alexander.gottwald@ptb.de)

Röntgendetektor für eROSITA bei BESSY II und an der MLS untersucht

Erstmals wurde ein Röntgendetektor sowohl im PTB-Labor bei BESSY II als auch an der PTB-eigenen Metrology Light Source (MLS) vollständig charakterisiert und kalibriert. Bei dem vom Halbleiterlabor der Max-Planck-Gesellschaft in München entwickelten Detektor für das Röntgenteleskop eROSITA handelt es sich um eine CCD-Neuentwicklung mit einem auf dem CCD-Chip direkt aufgebrachter Filter zur Unterdrückung störender VIS- und UV-Strahlung. Die Nachweiswahrscheinlichkeit wurde in einem breiten Photonenenergiebereich von 3 eV bis 20 keV und die spektralen Antwortfunktionen im Bereich von 100 eV bis 11 keV bestimmt. (M. Krumrey, FB7.1, michael.krumrey@ptb.de, F. Scholze, FB 7.2, frank.scholze@ptb.de, A. Gottwald, FB 7.2, alexander.gottwald@ptb.de)

Untersuchung schneller THz-Detektoren an der MLS

Am THz-Strahlrohr der *Metrology Light Source* (MLS) wurden in Kooperation mit dem Zentrum für Deutsche Luft- und Raumfahrt (DLR) und dem *Karlsruhe Institute of Technology* (KIT) schnelle THz-Detektoren (supraleitende HEB-Detektoren) hinsichtlich ihrer Ansprechzeit und Zeitauflösung untersucht und charakterisiert. (R. Müller, FB 7.2, ralph.mueller@ptb.de)

Detektorbasierte Absolutkalibrierung von Strahlungsthermometern

Als Alternative zu den Fixpunkten der Internationalen Temperaturskala ITS 90 erlaubt die absolute radiometrische Strahlungsmessung eine direkte Temperaturbestimmung rückgeführt auf ein primäres Detektornormal. An der PTB wurde dazu ein radiometrischer Vergleichsmessplatz entwickelt, der es ermöglicht, die spektrale Empfindlichkeit von Hochtemperatur-Strahlungsthermometern mit einer relativen Standardmessunsicherheit von unter 0,2 % zu kalibrieren. Die daraus resultierende geringe Standardmessunsicherheit der Temperaturbestimmung von 0,15 K konnte an einem Goldfixpunkt (1064,18 °C) bestätigt werden. (T. Keawprasert, FB 7.3, thada.keawprasert@ptb.de)

Internationaler Vergleich zur Messung des Emissionsgrades abgeschlossen

Der spektrale Emissionsgrad ist eine wesentliche Größe für alle praktischen Anwendungen der berührungslosen Temperaturmessung, die Berechnung von Strahlungsbilanzen und zunehmend auch für die quantitative Erdfernerkundung. Die PTB führt Emissionsgradmessungen in einem Temperaturbereich von 80 °C bis 500 °C durch und dehnt diesen Messbereich zur Zeit zu höheren und tieferen Temperaturen aus. In einem vom *Comité Consultatif de Thermométrie* (CCT) organisierten internationalen Vergleich mehrerer Staatsinstitute konnte die PTB ihre kleinen Standardmessunsicherheiten bei der Emissionsgradmessung von typisch 1 % bestätigen und wird nun Messeinrichtungen zum Emissionsgrad in Deutschland an den internationalen Vergleich metrologisch anbinden. (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)



Präzisionsbestimmung der molaren Polarisierbarkeit von Neon

Bislang war die Methode der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie auf die Verwendung von Helium als Messgas beschränkt, da nur für dieses Element eine Berechnung der Polarisierbarkeit mit einer hinreichend kleinen Unsicherheit möglich war. Nun ist es erstmals gelungen, die Polarisierbarkeit von Neon mit einer Unsicherheit von etwa 10 ppm zu bestimmen; mindestens zwei Größenordnungen genauer als bisher bekannt. Für die physikalische Chemie eröffnet sich damit die Möglichkeit, entsprechende theoretische Modelle zu überprüfen. Darüber hinaus kann zur Bestimmung der Boltzmann-Konstanten über die Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie jetzt auch Neon als Messgas eingesetzt werden. (Ch. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

Erste Ergebnisse bei der Neubestimmung der Boltzmann-Konstanten am Wassertripelpunkt

Für die Bestimmung der Boltzmann-Konstanten k wurde das neue Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer in Betrieb genommen. Um k zunächst mit einer relativen Standardmessunsicherheit von kleiner als 10 ppm bestimmen zu können, war es u. a. notwendig, spezielle Messkondensatoren, neuartige Kolbenmanometer für den Druckbereich bis zu 7 MPa, eine Präzisions-Kapazitätsmessbrücke und einen großvolumigen, hochstabilen Thermostaten zu entwickeln und herzustellen. In einer ersten Versuchsreihe wurde das Zusammenspiel dieser an Herstellungsgrenzen gehenden Komponenten getestet und für die relativen Instabilitäten nachgewiesen, dass schon ohne aufwendige Parameteroptimierung die Zielstellung der ersten Messkampagne erreicht werden kann. (T. Zandt, FB 7.4, thorsten.zandt@ptb.de)

Neues Modell für thermische Ausgleichsprozesse

Die Tripelpunkte kryogener Gase werden als Temperaturfixpunkte der Temperaturskala verwendet. Bei der kalorimetrischen Messung der Schmelzkurven werden nach den Heizstößen häufig sehr lange thermische Ausgleichzeiten beobachtet, die bei den geringen Wärmekapazitäten bisher unverständlich waren. Mit einem neuen Modell wurde die Hypothese bestätigt, dass zur Erlangung des thermischen Gleichgewichtes bei inhomogenen Proben ein Wärmeaustausch zwischen Phasengrenzen unterschiedlicher Temperatur und hierzu wiederum Rückerstarrungs- und Schmelzprozesse notwendig sind. Die langen Ausgleichzeiten sind hierbei mit den beträchtlichen Erstarrungs- bzw. Schmelzwärmen verbunden. Das neue Modell ist für die Beschreibung und damit Verringerung von dynamischen thermischen Messfehlern wichtig. (B. Fellmuth, L. Wolber, FB 7.4, bernd.fellmuth@ptb.de)

Magnetfeldfluktuationsthermometrie bei noch tieferen Temperaturen

In den letzten Jahren wurde in der PTB ein neuartiges Rauschthermometer, das Magnetfeldfluktuationsthermometer (MFFT), entwickelt, das inzwischen bereits erfolgreich vermarktet wird. Ein Kryostat mit einer Kernentmagnetisierungsstufe gestattet den Einsatz von bisher 1 K bis 10 mK. Durch Vergleich mit der PTB-Realisierung der Internationalen Temperaturskala PLTS-2000 wurde nun gezeigt, dass das MFFT sogar bis in den Temperaturbereich von 0,9 mK, also über mehr als drei Dekaden in der Temperatur, um nicht mehr als 1 % von der Referenzskala abweicht. Das MFFT kann daher eine Vielzahl der im Temperaturbereich unterhalb von 1 K eingesetzten praktischen Thermometer ersetzen. (J. Engert, FB 7.4, jost.engert@ptb.de)



Magnetische Monopol-Anregungen im Spin-Eis $Dy_2Ti_2O_7$

Im Rahmen einer Forschungskoooperation mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) zur Identifikation von magnetischen Monopolen als Quasiteilchen in Spin-Eis wurden Wärmetransportexperimente zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften von einkristallinem $Dy_2Ti_2O_7$ modelliert. Auf der Grundlage einer kinetischen Theorie der Phononen unter Berücksichtigung lokalisierter magnetischer Anregungszustände wurden Feldgleichungen abgeleitet, deren Lösung die in Relaxations- und Wärmepulsexperimenten gemessenen Temperaturfelder $T(x,t)$ thermodynamisch konsistent beschreiben. (P. Strehlow, FB 7.5, peter.strehlow@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Auf dem Weg zu noch größeren Wafern

Der Durchmesser von Silizium-Wafern bei der Herstellung von mikro- und nanoelektronischen Bauelementen hat sich in den letzten Jahrzehnten sukzessive von wenigen Millimetern auf derzeit 300 mm erhöht. Die PTB ist einer von zehn deutschen Partnern in dem neuen europäischen Verbundprojekt EEMI 450, das für eine weitere Produktivitätssteigerung nun den nächsten Schritt erforscht: die Fertigung auf Wafern mit einem Durchmesser von 450 mm. In der aktuellen Phase dieses Projektes besteht der PTB-Beitrag in einer Designstudie für Instrumentierung zur Röntgenanalytik von 450-mm-Wafern. (B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

Metrologie für die EUV-Lithografie

Die umfangreiche Unterstützung der europäischen Halbleiterindustrie bei der Entwicklung der Halbleiter-Lithografie mit Strahlung einer Wellenlänge von 13,5 nm im extremen UV (EUV) wurde fortgesetzt. So wurde ein Messverfahren entwickelt, das es erlaubt, die Kollektorspiegel für *Laser-Pulsed-Plasma*-EUV-Strahlungsquellen, die derzeit größten EUV-optischen Komponenten mit einem Durchmesser von 670 mm, vollflächig abzurastern. Mit einem neuen Messmodus können die Alterungsprozesse auf diesen optischen Komponenten, die sich in nur 30 cm Abstand von der Plasmaquelle befinden, besser untersucht werden. (F. Scholze, FB 7.2, frank.scholze@ptb.de)

Hochtemperatur-Fixpunkte für dynamische Differenzkalorimeter

Die Messung der thermophysikalischen Eigenschaften vieler Materialien für energierelevante Hochtemperatur-Prozesse ist aufgrund instabiler Thermolemente mit den bisherigen Messmethoden nicht ausreichend genau. In einem vom BMWi geförderten Projekt mit der Netzsch Gerätebau GmbH und weiteren industriellen Partnern wurde die in-situ-Kalibrierung von Thermolementen auf der Basis eutektischer Metall-Kohlenstoff-Fixpunkte entwickelt. Dies ermöglicht es, die Genauigkeit bei der Temperaturmessung in dynamischen Differenzkalorimetern bis 2290 °C an den Referenzpunkten auf Werte von unter 2 °C zu verbessern. (K. Anhalt, FB 7.3, klaus.anhalt@ptb.de)

Neuartiger Terahertz-Detektor patentiert

Ein neuartiger, einfach zu kalibrierender Detektor für Terahertz-Strahlung mit einer optimierten internen Sensoranordnung wurde patentiert. Vorteilhaft bei dieser Anordnung sind die Akzeptanz für große Strahlquerschnitte bei minimaler Rückreflexion und Polarisationsunabhängigkeit. Das Patent ist Grundlage für eine neu begonnene Zusammenarbeit mit einem Detektorhersteller in einem von Berlin und Brandenburg geförderten Kooperationsprojekt. (A. Steiger, R. Müller, FB 7.3, ralf.mueller@ptb.de)

Platin-Miniatur-Fixpunkt erfolgreich getestet

Zur Erweiterung der Kalibriermöglichkeiten für Thermolemente bei hohen Temperaturen wurde ein Platin-Miniaturfixpunkt in einem Tiegel aus hochreinem Aluminiumoxid konstruiert. Die Schmelztemperatur von reinem Platin beträgt 1768,2 °C und liegt damit an der oberen Einsatztemperaturgrenze der häufig verwendeten Pt30%Rh/Pt6%Rh-Thermolemente (Typ B). Erstmals besteht damit die Möglichkeit, diese Thermolemente in ihrem gesamten Temperaturbereich (400 °C bis 1800 °C) an Fixpunkten zu kalibrieren. Der Einsatz von Miniaturfixpunkten der Metalle Palladium (1553,4 °C) und Platin in der PTB hat gegenüber der häufig praktizierten Drahtschmelzmethode in anderen Metrologieinstituten Europas zahlreiche Vorteile. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@PTB.de)



Kennlinie von industriellen Dünnschichtthermometern

Platin-Dünnschichtwiderstandsthermometer haben die drahtgewickelten Widerstandsthermometer bei industriellen Anwendungen nahezu vollständig ersetzt. Allerdings wird in der gegenwärtig verwendeten internationalen Norm IEC 60751 nicht berücksichtigt, dass sich die Kennlinien dieser Sensortypen bei Temperaturen oberhalb von ca. 250 °C erheblich unterscheiden. In Vorbereitung internationaler Aktivitäten der IEC SC 65B WG5 wurden auf Initiative der PTB im Rahmen des DKE-Normungsgremiums K961 „Elektrische Messwertaufnehmer und Messgrößenumformer“ Platin-Dünnschichtthermometer verschiedener Sensor- und Thermometerhersteller mit dem Ziel vermessen, eine für diesen Sensortyp charakteristische Kennlinie in die entsprechenden Normen aufzunehmen. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

ProFIT-Projekt „RefMFFT“ begonnen

Am 1. Oktober 2010 hat das von der Investitionsbank Berlin im Rahmen des Programms zur Förderung von Forschung, Innovationen und Technologien (ProFIT) geförderte Verbundprojekt „Rückgeführte und GUM-konforme Referenzmessungen von Magnetfeldfluktuationsthermometern (MFFT)“ begonnen, das gemeinsam mit dem Industriepartner Magnicon durchgeführt wird. MFFTs sind in der PTB entwickelte Thermometer für den Tieftemperaturbereich (~1 K bis 1 mK), die inzwischen von der Magnicon GmbH kommerzialisiert wurden. (J. Beyer, FB 7.5, joern.beyer@ptb.de)

Langzeitstabilität von Kapazitätsvakuummetern

Die Langzeitinstabilität von Vakuummessgeräten dominiert oft die Unsicherheit bei deren Einsatz, andererseits gibt es dazu sehr wenig Datenmaterial. In Zusammenarbeit mit der Firma Inficon, einem führenden Hersteller von Vakuummessgeräten, hat die PTB ihre Langzeitkalibrierdaten von Kapazitätsvakuummetern mit keramischen Membranen über 9 Jahre für Vollausschläge von 13 Pa bis 133 kPa ausgewertet. Die ermittelten Langzeitinstabilitäten liegen zwischen 0,01 % und 0,04 % und damit unter denen vergleichbarer Kapazitätsvakuummeter mit Metallmembran. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)

Neues Primärnormal für die Kalibrierung von Schnüffeltestlecks

Schnüffeltestlecks sind künstlich hergestellte Lecks zur Kalibrierung von Leckdetektoren bei Schnüffelanwendungen, bei denen ein konstanter Gasfluss gegen Atmosphäre ausströmt. In der AG „Vakuummetrologie“ wurde in den letzten Jahren ein Primärnormal zur Kalibrierung solcher Lecks aufgebaut und validiert. Der Messbereich des neuen Primärnormals deckt u. a. den wirtschaftlich bedeutenden Bereich von 1 g bis 10 g Verlust pro Jahr des Kühlmittels R134a ab. Alle nicht-kondensierenden Gase können vermessen werden. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)

Durchbruch bei der laseroptischen Vor-Ort-Volumenstrommessung

Im Rahmen eines ZIM-Projektes wurde gemeinsam mit der Firma *Intelligent Laser Applications* GmbH ein laseroptischer Volumenstromsensor entwickelt, mit dem sich durch direkte Integration des laseroptisch vermessenen Strömungsfeldes in einem Rohr der Volumenstrom mit Unsicherheiten von $U(k=2) < 0,8\%$ bestimmen lässt. Die Besonderheit dabei ist, dass ein optischer Zugang zur Strömung ohne Betriebsunterbrechung durch ein sog. „Hot-Tapping-Verfahren“ geschaffen wird. Das Verfahren eignet sich zur Vor-Ort-Kalibrierung von Wärmemengenzählern großer Nennweite ab DN 200, wie sie in Fernheiznetzen oder Kraftwerken verwendet werden. (T. Lederer, FB 7.6, thomas.lederer@ptb.de)

Charakterisierung von Volumenstrom-Sensoren für Wärmemengenzähler

Komplexe Strömungszustände von Fluiden in Strömungssensoren können in der PTB neuerdings auch über laseroptische Ganzfeldverfahren (Particle-Image-Velocimetry, PIV) mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung gemessen werden. Das PIV-Verfahren wird mithilfe rückführbarer Lasermethoden (Laser-Doppler-Velocimetry, LDV) validiert und bietet die messtechnische Basis für Computational-Fluid-Dynamic-(CFD-) Simulationen, mit deren Hilfe die Strömung in angrenzenden Rohrbereichen berechnet werden kann. Das Verfahren bietet so Einblicke in die Wirkmechanismen der im Sensor verwendeten Messtechnik und liefert wichtige Daten für Verständnis und Weiterentwicklung der Sensoren. (T. Lederer, FB 7.6, thomas.lederer@ptb.de)



Internationale Angelegenheiten

Internationaler Vergleich zur Größenbestimmung von Nanopartikeln

Das europäische Institut für Referenzmaterialien und -messungen (IRMM) hat einen internationalen Vergleich zur Größenbestimmung von Silica-Nanopartikeln in wässriger Suspension organisiert, an dem sich 38 Laboratorien in 14 Ländern beteiligt haben. Die PTB hat für ihren Beitrag die erst kürzlich im PTB-Labor bei BESSY II aufgegriffene Methode der Röntgenkleinwinkelstreuung (engl. *Small-Angle X-ray Scattering*, SAXS) mit Synchrotronstrahlung gewählt, die sich dabei hinsichtlich Schwankungsbreiten und Unsicherheiten als besonders leistungsstark erwiesen hat. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Workshop zur Anwendung des Boltzmann-Projektes

Im Rahmen des iMERA-plus-Boltzmann-Projektes wurde im Oktober 2010 am britischen Staatsinstitut NPL ein Workshop zur Weitergabe der Temperatureinheit veranstaltet. Die Fortschritte der unterschiedlichen thermodynamischen Messmethoden in verschiedenen Temperaturbereichen inklusive der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie der PTB wurden zusammengefasst und die Auswirkungen auf die Darstellung der Temperatureinheit Kelvin diskutiert. Das im Februar 2011 endende iMERA-plus-Projekt hat die Methoden zur thermodynamischen Temperaturmessung entscheidend weiterentwickelt. Diese können nun zur Verbesserung der Internationalen Temperaturskala und zur Weitergabe des Kelvins in zahlreichen Temperaturbereichen angewendet werden. (Ch. Gaiser, J. Fischer, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

Dritter internationaler Workshop zu verbesserten Temperaturfixpunkten

Im Jahr 2004 haben die Vertreter von 16 europäischen Staatsinstituten eine Zusammenarbeit bei der Entwicklung der kommenden Generation von Fixpunkten der Internationalen Temperaturskala von 1990 beschlossen (EURAMET-Projekt 732). Zum Austausch der Resultate und Erfahrungen fand der dritte Workshop im Spätherbst 2009 am spanischen Metrologieinstitut CEM statt. Die dort vorgestellten Ergebnisse haben gezeigt, dass aufgrund der guten Zusammenarbeit substantielle Fortschritte bezüglich konstruktiver Verbesserungen von Fixpunktzellen, der Verringerung des Einflusses von Verunreinigungen, der Minimierung parasitärer Wärmeflüsse und der thermischen Modellierung erreicht worden sind. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

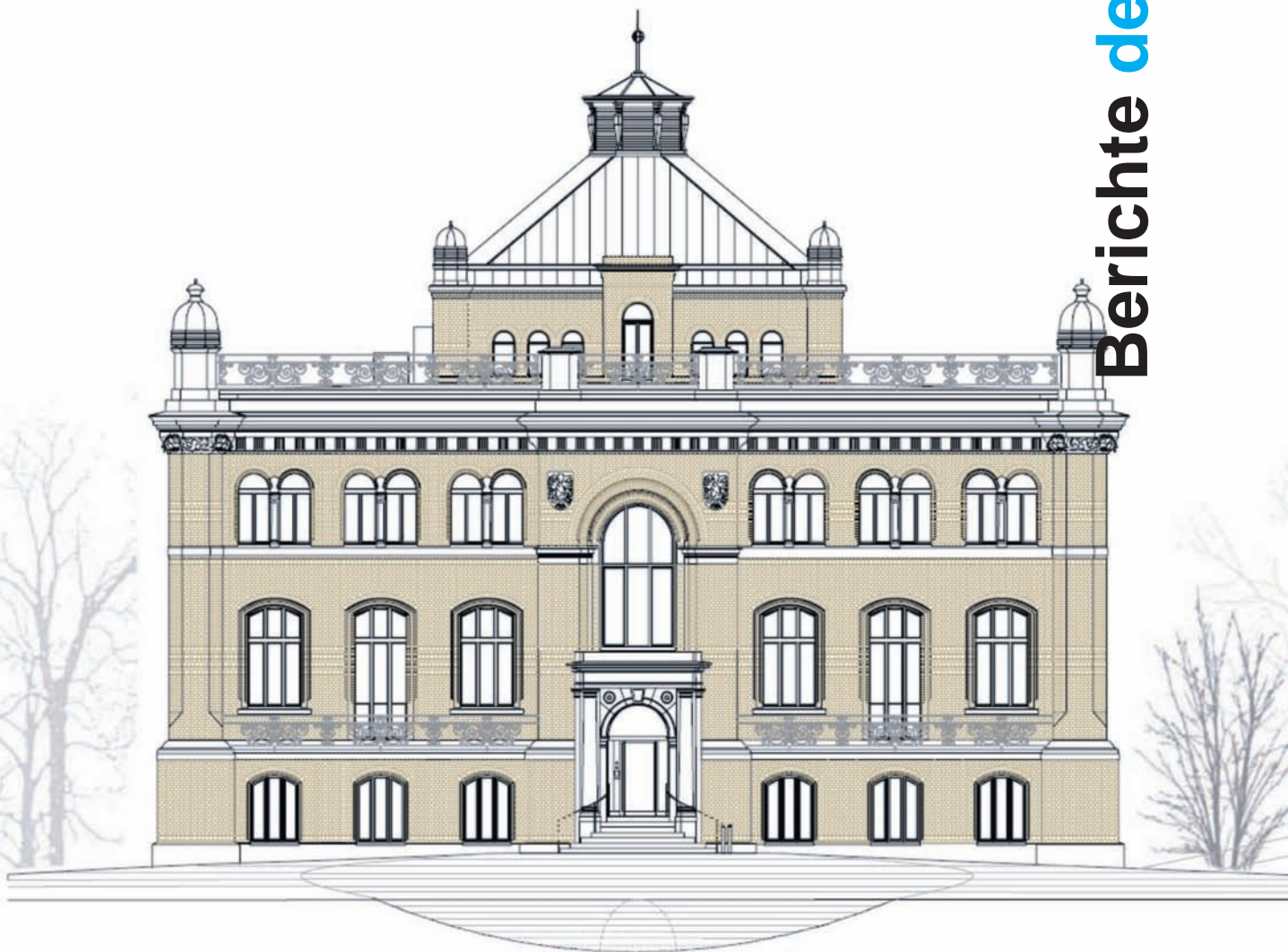
COOMET-Auditoren-Schulung am Beispiel der Messgröße Temperatur

Im Rahmen der Sitzung des technischen Komitees von COOMET in Chişinău (Republik Moldau) im Dezember 2009 fand eine Schulung gemäß ISO 17025 für zukünftige COOMET-Auditoren mit dem fachbezogenen Schwerpunkt Temperatur statt. Das Ziel der Schulung war es, theoretische und praktische Elemente der Norm durch Erstellung einer Checkliste und eines Vor-Ort-Audits miteinander zu verknüpfen. Die Inhalte der Schulung umfassten die Schwerpunkte Validierung der Kalibrierverfahren, Rückführung der Normale, Durchführung und Teilnahme an Vergleichsmessungen, Erstellung von Messunsicherheitsbudgets und die Angabe der Messverfahren und Messergebnisse im Musterkalibrierschein. (M. Kemper, FB 7.4, magda.kemper@ptb.de)



Medizinphysik und metrologische Informationstechnik

Berichte der Abteilungen



Campus
Charlottenburg
The art of ideas.

Abteilung
8

Vorwort

Die diesjährige *tour d'horizon* durch die Abteilung könnte unter dem Motto stehen: Metrologie *en miniature*. Exemplarisch haben wir Themen aus unserem Repertoire ausgewählt, die von kleinen Skalen handeln. Dies führt uns u. a. zu Kontrastmitteln für die medizinische Bildgebung, die z. B. über Antigen-Reaktionen spezifisch an Proteinkomplexe auf der Oberfläche von Zellen binden, die auf diese Weise markiert werden. Aber auch Kontrastmittel, die nicht an molekular-spezifische Strukturen binden, können sich durch gewebespezifische Perfusion oder Permeabilitätseigenschaften spezifisch an pathologisch verändertem Gewebe anreichern, um dieses für diagnostische Zwecke zu markieren und/ oder als Vehikel für den zielgerichteten Transport von Wirkstoffen in diese Regionen zu dienen.

Ausgehend von der übergeordneten Aufgabe der Metrologie, die Vergleichbarkeit von Messungen in der Heilkunde zu sichern, führt dies im oben skizzierten Zusammenhang zur Aufgabe, den Weg von der qualitativen zur quantitativen Bildgebung wissenschaftlich zu begleiten, was wiederum konkret bedeutet, die Mechanismen der genannten Prozesse aufzuklären und die relevanten Parameter wie z. B. Selektivitäten und Permeabilitäten *in vivo* zu bestimmen, um letztlich präzise Aussagen zu Konzentrationsverteilungen *in vivo* gewinnen zu können. Dies wären entscheidende Bausteine zur „molekularen Bildgebung“ und zur „personalisierten Medizin“, die die nächste Dekade prägen werden.

Die Metrologie im Regime kleiner Skalen führt auch zu erhöhtem Bedarf nach mathematischer

Modellierung und Datenanalyse. Dabei sind es insbesondere „virtuelle Experimente“ (Simulationen zur Unterstützung des Designs und Aufbaus neuer Messverfahrens), inverse Methoden zur Auswertung von indirekten Messungen und die Entwicklung statistischer Verfahren zur Bestimmung von Messunsicherheiten, die die Arbeit zunehmend kennzeichnen.

Alle drei medizinphysikalischen Fachbereiche befassen sich mit Messverfahren zur Charakterisierung sowie zum empfindlichen quantitativen Nachweis von Kontrastmitteln, seien es magnetische Nanopartikel, Fluorophore oder andere Marker. An dieser Stelle sei exemplarisch eine besonders interessante Variante vorgestellt:

¹²⁹Xe im Molekularkäfig als bindungsspezifische Sonde

Wichtige Voraussetzungen für die Eignung einer molekularen Sonde sind neben ausreichender Spezifität, Bioverträglichkeit und Stabilität eine ausreichende Nachweisempfindlichkeit.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen setzt ein neues Forschungsvorhaben des Fachbereichs *Medizinische Messtechnik* auf die außergewöhnlichen Eigenschaften eines Isotops des Edelgases Xenon (¹²⁹Xe): Das Atom mit magnetischem Kern kann in industriellem Maßstab gewonnen werden, es besitzt eine gute Verträglichkeit für Mensch und Tier und kann über die Atmung aufgenommen oder intravenös appliziert werden. Da Xenon in biologischem Gewebe nicht vorkommt, können prinzipiell hintergrundfreie Signale gemessen werden, was die Fehleranfälligkeit medizinischer Interpretationen – insbesondere bei quantitativen Analysen – verringert. Vor allem aber kann die Empfindlichkeit der Magnetresonanztomografie (MRT) durch eine vorgelagerte Präparation der Xenonotope (optisches Pumpen) um Größenordnungen gesteigert werden – die wichtigste Voraussetzung, um Biomoleküle in geringen Konzentrationen im Organismus nachweisen zu können.

Die vorteilhaften Eigenschaften des allerdings chemisch inerten ¹²⁹Xe können für die molekulare Bildgebung genutzt werden, indem Xenon-zugängliche Molekularkäfige durch Verknüpfung mit hoch affinen Bindungspartnern

Titelbild:

Das Observatorium, das älteste Gebäude der PTB, war Sitz von Hermann von Helmholtz, dem ersten Präsidenten, und beheimatete die berühmte Physikalische Abteilung der PTR. Nach der denkmalgerechten Restaurierung werden die Fachbereiche „Medizinische Messtechnik“ und „Biomedizinische Optik“ das Gebäude mit Leben füllen.

Das Observatorium wird eines der sichtbaren Aushängeschilder des neu gebildeten Stadtteils.



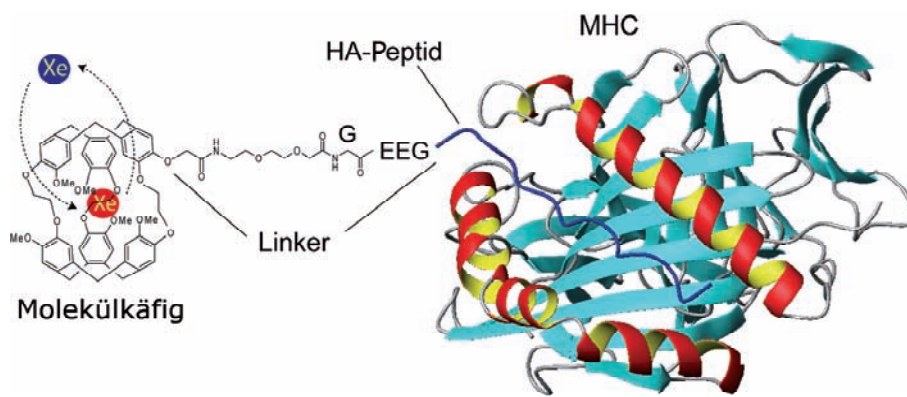


Bild 1a: Schema für die MRT-Sonde aus Xenon-beladenem Käfig und angekoppeltem Antigen (HA-Peptid) mit Bindung an das Zielmolekül MHC

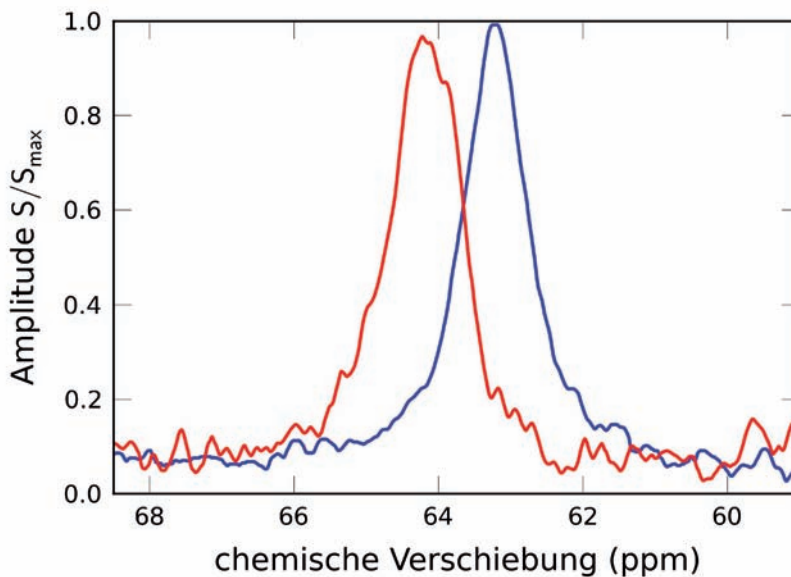


Bild 1b: Signale für freie (blau) oder gebundene (rot) MRT-Sonde sind unterscheidbar.

ausgewählter Zielmoleküle funktionalisiert werden. Das im Moleküllkäfig eingeschlossene ^{129}Xe erzeugt bei Bindung dieses molekularen Konstrukts an das Zielmolekül ein spezifisches Signal, das also charakteristisch für dessen Präsenz ist (Ortsspezifität). In dieser Art wurde ein Antigen des Grippevirus (HA-Peptid) an den Moleküllkäfig gekoppelt und die Bindung an das natürliche Zielprotein Haupthistokompatibilitätskomplex Klasse II (MHC, Allel DR1) in wässriger Lösung *in vitro* in Mengen von Nanomol nachgewiesen. Die Antigen:MHC-Komplexbildung an der Oberfläche von Immunzellen ist ein entscheidender Prozess für die adaptive Immunantwort eines Organismus. (Bilder 1a und 1b)

Das Projekt ist eine Kooperation mit dem Leibniz-Institut für Molekulare Pharmakologie und soll zu einem MRT-Verfahren zur Erforschung immunologisch relevanter molekularer Prozesse bei den Erkrankungen Multiple Sklerose und Rheumatoide Arthritis an Zellverbänden

und in Tiermodellen weitergeführt werden. Dieses Forschungsvorhaben wird aus Mitteln des Innovationswettbewerbs Medizintechnik des BMBF gefördert.

Metrologie *en miniature*, also im kleinskaligen Bereich, betrifft aber nicht nur Metrologie auf molekularer Ebene, sondern auch die Messtechnik an der Grenze der Messbarkeit, z. B. bei kleinen magnetischen Feldern:

Magnetresonanz-Messungen im niedrigen Feld

Die oben dargestellten Untersuchungen finden typischerweise in Magnetfeldern von einigen Tesla statt, d. h. in Feldern, die das Magnetfeld der Erde um vier oder fünf Größenordnungen übertreffen. Kernspinresonanzmessungen können aber auch in sehr viel niedrigeren Feldern durchgeführt werden. Wenn die angelegten Felder in die Größenordnung des Erdmagnetfelds kommen oder noch schwächer sind, ist es zweckmäßig, die Messungen in einer ma-

netischen Schirmung wie dem Berliner Magnetischen Abschirmraum 2 (BMSR-2) oder zumindest unter Nutzung einer Erdfeldkompensation durchzuführen. Zur Signalaufnahme im Bereich sehr niedriger Felder werden supraleitende Magnetfelddetektoren (SQUIDs) verwendet, die auch für Resonanzfrequenzen unterhalb von einem Kilohertz die erforderliche Empfindlichkeit aufweisen. Im Fachbereich *Biosignale* wurde hierzu ein SQUID-Messplatz aufgebaut, der kombinierte Messungen der T_1 - und der T_2 -Relaxationszeit in niedrigen Feldern unterhalb von $1 \mu\text{T}$ ermöglicht. (Bild 2)

Mit diesem Aufbau wurde zunächst die Auswirkung des Messsystems, insbesondere der Inhomogenitäten des angelegten Magnetfelds, auf die gemessene NMR-Linie untersucht. Durch die kombinierten Messungen an den Messplätzen der Arbeitsgruppen *Bioelektrische Messtechnik* und *Magnetische Messtechnik* wurde dabei ein Feldbereich von 100 nT bis $150 \mu\text{T}$ überstrichen. Es wurde nachgewiesen, dass oberhalb einer NMR-Frequenz von etwa 1500 Hz die durch instrumentell bedingte Feldinhomogenitäten verursachte Verbreiterung linear mit der Feldstärke anwächst. Dieser einfache Zusammenhang kann beispielsweise genutzt werden, um die Unzulänglichkeiten des Messaufbaus durch Extrapolation zum Nullfeld auszuschalten und so die natürliche Breite der Kernresonanzlinie einer Flüssigkeit abzuschätzen. Für den Bereich von NMR-Fre-

quenzen unterhalb 1500 Hz ist dagegen diese lineare Näherung nicht mehr ausreichend, da dort auch höhere Terme zum Tragen kommen.

Nachdem diese messtechnischen Effekte verstanden sind, wird nun der physikalische Hintergrund des NMR-Signals von Flüssigkeiten im niedrigen Feld untersucht. Für Wasser im neutralen pH-Bereich ist bereits seit langem bekannt, dass sich die T_1 -Relaxationszeit im niedrigen Feldbereich ändert. Dieses Phänomen spiegelt die Diffusion von H_3O^+ und OH^- -Ionen wider, die bei extremen pH-Werten weitgehend unterbunden ist. Mit dem neuen Messaufbau kann nun durch die kombinierte Messung des Verlaufs von T_1 und T_2 das Relaxationsverhalten von Wasser über einen weiten Frequenzbereich umfassend untersucht werden. Diese Daten geben nicht nur Aufschluss über die molekulare Dynamik in Wasser, sie sollen auch die Hintergrundinformation für die MR-Bildgebung im niedrigen Feld liefern, die ja zum großen Teil auf dem NMR-Signal von Wasser beruht.

Ein weiterer Bereich kleinskaliger Messungen bildet einen Schwerpunkt des Fachbereichs *Biomedizinische Optik*, der Messverfahren auf zellulärer Ebene entwickelt:

Quantitative Bewertung der Vitalität von Zellen mithilfe durchflusszytometrischer und mikroskopischer Messverfahren

Die Vision der regenerativen Medizin ist die Heilung verschiedener Erkrankungen durch die Wiederherstellung funktionsgestörter Zellen, Gewebe und Organe. Behandlungsformen der regenerativen Medizin umfassen sowohl den Einsatz von künstlich hergestellten Gewebeprodukten („Tissue Engineering“) als auch die Anregung körpereigener Regenerations- und Reparaturprozesse z. B. durch eine Stammzellentherapie. Die sichere Anwendung derartiger Verfahren erfordert unter anderem verbesserte Methoden der Qualitätssicherung, insbesondere die Entwicklung und Validierung von Messverfahren zur Beurteilung der Qualität von Zell- und Gewebeprodukten.

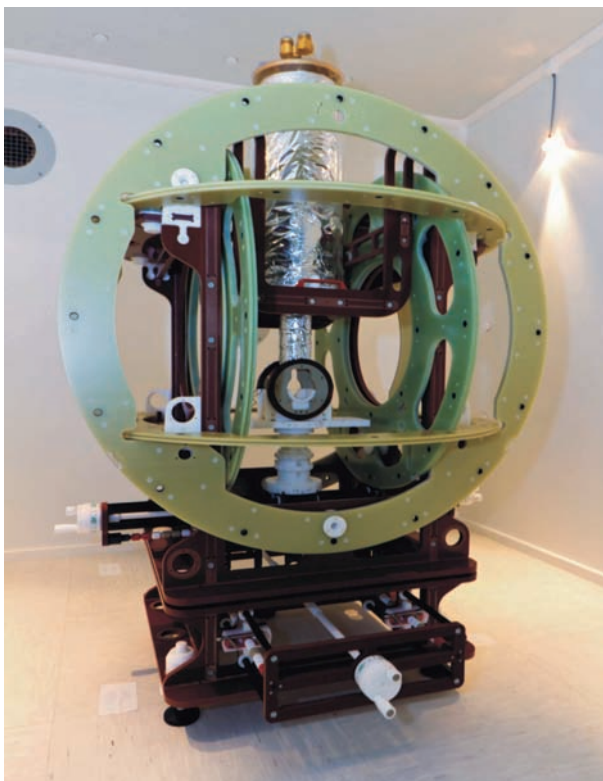


Bild 2: System von Helmholtzspulen zur NMR-Spektroskopie und zur Magnetresonanz-Bildgebung im niedrigen Magnetfeld. Der SQUID-Sensor befindet sich am Boden des mit Aluminiumfolie ummantelten Dewargefäßes.

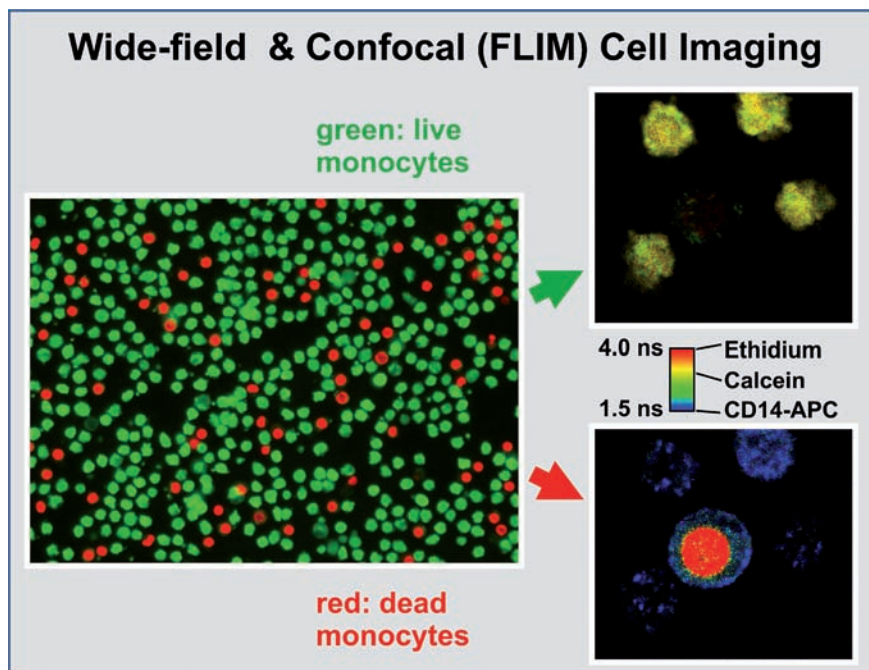


Bild 3: Fluoreszenzmikroskopische Aufnahmen zur Messung der Vitalität von humanen Zellen. Neben der mit einem Weitfeldmikroskop registrierten Übersicht sind in Falschfarben konfokale Bilder lebender (oben rechts) Monozyten und eines toten Monozyten gezeigt, die die Fluoreszenzlebensdauer repräsentieren. Monozyten wurden als Modellsystem zur Verfahrensentwicklung für die Untersuchung der Vitalität von Stammzellen verwendet. Die mikroskopische Zählung der Zellen erfolgt durch eine halbautomatische Bildanalyse.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Therapie ist die Lebensfähigkeit der eingesetzten Zellen. Als wichtige Messgröße dient die Vitalität einer Zellpopulation, definiert als der Anteil lebender Zellen an der Gesamtzahl von Zellen in einer Probe. Zur Bestimmung der relativen Konzentration lebender Zellen in Suspensionen werden u. a. durchflusszytometrische Messverfahren eingesetzt. In der regenerativen Medizin werden jedoch auch häufig Zellverbände eingesetzt, bei denen sich die Zellen auf Oberflächen oder dreidimensionalen Gerüsten entwickeln, deren Vitalität sich besser durch fluoreszenzmikroskopische Untersuchungen feststellen lässt. Durch Vergleichsmessungen mit durchflusszytometrischen Methoden soll die mit mikroskopischen Verfahren erreichbare Genauigkeit bei der Bestimmung der Zellvitalität anhand eines Modellsystems von Einzelzellen, welches für beide Verfahren zugänglich ist, untersucht werden.

Als Modellsystem werden zunächst Monozyten verwendet, deren Eigenschaften gut bekannt sind und die sowohl in Suspension als auch immobilisiert auf geeigneten Objektträgern mikroskopisch untersucht werden können. Die Zellsuspensionen werden durch verschiedene Sortierverfahren zur Anreicherung von Zellen (Dichtegradient, magnetisch, durchflusszytometrisch) aus Blutproben hergestellt.

Sowohl im Durchflusszytometer als auch im Fluoreszenzmikroskop wird die metabolische Aktivität lebender Zellen durch Fluoreszenz des Farbstoffs Calcein-AM nach geeigneter optischer Anregung nachgewiesen. Als Indikator für tote Zellen wird der Fluoreszenz-Farbstoff Ethidium eingesetzt (Bild 3).

Das durchflusszytometrische Verfahren zur Messung der Zellvitalität wird neben diesen Vergleichsmessungen originär auch zur Bewertung von Anreicherungsverfahren für im Blut zirkulierende Endothel- oder Stammzellen eingesetzt.

Die Arbeiten werden im Rahmen des Joint Research Project T2 J04 (REGENMED) in Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppen des National Physics Laboratory (NPL, UK), des Laboratory for Government Chemists (LGC, Großbritannien), des Istituto di Ricerca Metrologia (INRIM, Italien), der Universität Turin (Italien) und der Helsinki University of Technology (TKK, Finland) durchgeführt und durch die European Association of National Metrology Institutes (EURAMET e.V.) unterstützt.

In vielen Bereichen der Metrologie ist die Expertise der mathematischen Datenanalyse von entscheidender Bedeutung. Dies sei hier an einem Beispiel aus der Zusammenarbeit der beiden Fachbereiche *Biomedizinische Optik* und *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* unterstrichen:

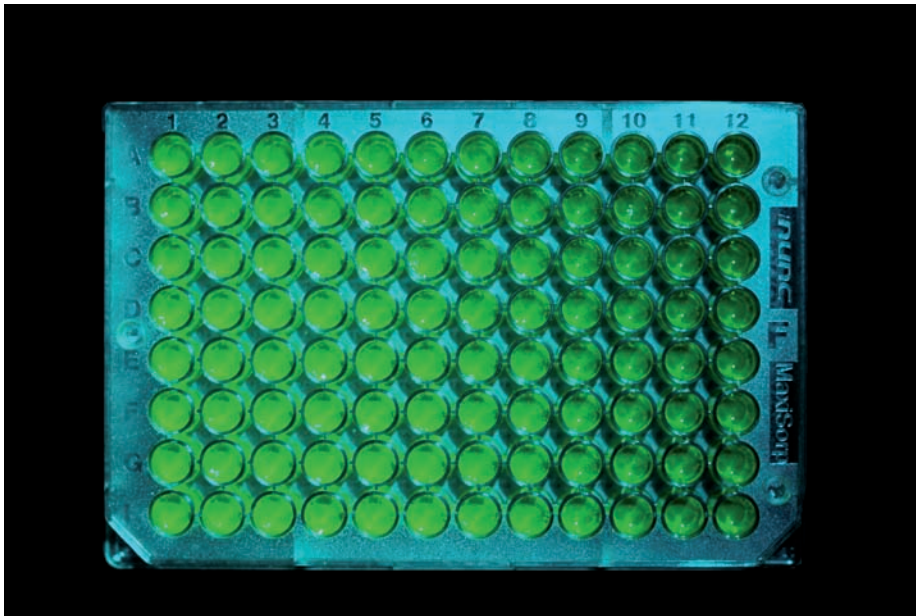


Bild 4: Beispiel für eine ELISA-Mikrotiterplatte

Unsicherheiten von Konzentrationsschätzungen in der Biochemie

Immunassays sind biochemische Tests, in denen die hohe Spezifität von Antikörper-Antigen-Bindungen ausgenutzt wird. Somit können kleinste Stoffmengen detektiert und deren Konzentration geschätzt werden. Verschiedenste Immunassays werden vielseitig angewendet, z. B. um Infektionen, Hormone oder Drogen nachzuweisen.

Mitentscheidend bei der Beurteilung dieser Tests ist die zuverlässige Angabe der Messunsicherheiten zusammen mit den Konzentrationsschätzungen. Dazu wurde in der Arbeitsgruppe *Datenanalyse und Messunsicherheit* ein statistisches Auswerteverfahren entwickelt und auf Fluoreszenz-Sandwich-ELISAs (Bild 4) angewandt. (Die Abkürzung ELISA steht für **E**nzyme **L**inked **I**mmunosorbent **A**ssay.) Diese Art Immunassay ermöglicht den Nachweis von Antigenen, indem sie zwischen zwei Antikörpern gebunden werden und ein Antikörper dabei mit einem Enzym gekennzeichnet wird, um Fluoreszenz zu generieren (wie in Bild 1). Da der metrologische Standard (d. h. der „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“) nicht direkt zur Bestimmung von Unsicherheiten für ELISAs anwendbar ist, wurde ein Verfahren entwickelt, das auf Bayes'scher Statistik beruht und die Handhabung der benötigten Unsicherheiten bei der Schätzung von Analytkonzentrationen ermöglicht.

Anhand von Daten einer internationalen Vergleichsstudie, an der auch die Arbeitsgruppe *Gewebeoptik und molekulare Bildgebung* betei-

ligt war, wurde gezeigt, dass das entwickelte Bayes'sche Verfahren allgemein anwendbar ist und deutlich zuverlässigere Unsicherheitsangaben liefert als bisher benutzte Verfahren. Ergebnisse verschiedener ELISAs und verschiedener Labore dieser Studie sind im Gegensatz zum bisher benutzten Verfahren jetzt untereinander konsistent. Das weist auf die Korrektheit der mit dem neuen Verfahren bestimmten Konzentrationen und zugehörigen Messunsicherheiten sowie der entwickelten Methode hin.

Bei unserem Beitrag aus dem Fachbereich *Metrologische Informationstechnik* steckt die *Metrologie en miniature* in einem Chip:

Sichere Messdaten

Der Schutz von Messdaten vor zufälligen oder bewussten Verfälschungen ist seit der Verbreitung verteilter bzw. vernetzter Messsysteme zu einer neuen Herausforderung insbesondere des gesetzlichen Messwesens geworden. Zusammen mit der Industrie wurden Konzepte und Prototyplösungen entwickelt, mit denen der Schutz der Messdaten auch dann gewährleistet ist, wenn die Daten außerhalb von Messgeräten gespeichert oder über offene Netze (z. B. Internet) übertragen werden. Mindestschutzanforderungen sind die jederzeitige Zuordnung von (verarbeiteten) Messdaten zu ihrer Quelle (Authentizität) und ihre Unverfälschtheit (Integrität). Abweichungen müssen erkennbar sein. Die Konzepte wurden inzwischen weiterentwickelt und bei verschiedenen Messsystemen angewendet.



In einem neueren Projekt befasst sich der Fachbereich nun mit der Sicherung von Messdaten, die aus einem Taxameter auf Archivierungssysteme übertragen werden. Kryptografische, asymmetrische Verfahren und der Einsatz einer sicheren Signaturerstellungseinheit sind die technischen Hauptmerkmale des Lösungsansatzes. Für den Messdatenaustausch zwischen verschiedenen Partnern werden offene Schnittstellen definiert, um die Datenübertragung von der dem Taxameter nachgeschalteten Sicherheitseinheit über eine GPRS-Verbindung mit einem speziell entwickelten RESTful-Web-Service (Representational State Transfer) über HTTP- bzw. HTTPS-Verbindungen zu ermöglichen. Die im Fahrzeug signierten Taxameterdaten werden unabhängig von der jeweiligen internen Datenspeicherung des Abrufsystems auf einheitliche Weise in einem XML-Exportformat zur Prüfung bereitgestellt. Bild 5 zeigt die komplette Systemstruktur des Lösungsansatzes. Die Lösung kann auf beliebige existierende Taxameter-Systeme übertragen werden. Gegenwärtig wird auf freiwilliger Basis eine größere Anzahl von Prototypen in zunächst zwei Bundesländern unter realen Bedingungen getestet. Nach erfolgreichem Abschluss sind erweiterte Feldtests geplant.

Ein weiteres aktuelles Vorhaben des Fachbereiches *Metrologische Informationstechnik* befasst sich mit komplexen Sicherheitsanforderungen im Bereich Elektromobilität. Anders als bei bisherigen Lösungsansätzen mit stationären Stromladesäulen soll ein Sicherheitskonzept für Messdaten für den Fall entwickelt werden, dass die Zähler nicht mehr in der Ladesäule, sondern im Fahrzeug installiert sind. D. h., das zentrale Element ist das mobile Messen im Fahrzeug, bei dem ein Messgerät entsprechend den gesetzlichen Anforderungen und eine Kommunikationseinheit eingesetzt werden. Eine zusätzliche Herausforderung ist, dass Elektrofahrzeuge zukünftig eine wichtige Rolle in aktiven Verteilnetzen (Smart Grids) übernehmen können, indem durch dynamisch steuerbare Ladevorgänge die Stabilität von (Teil-) Netzen unterstützt wird. Um dieses Ziel zu erreichen, werden im Konzept – ausgehend von den neu definierten Sicherheitszielen – bidirektionale Authentifizierungsmechanismen vorgesehen. Trotz der hohen Komplexität, der Vielzahl beteiligter Komponenten und Systeme sollen die Kosten für das neuartige Ladekonzept deutlich geringer sein als bei bisherigen Ansätzen.

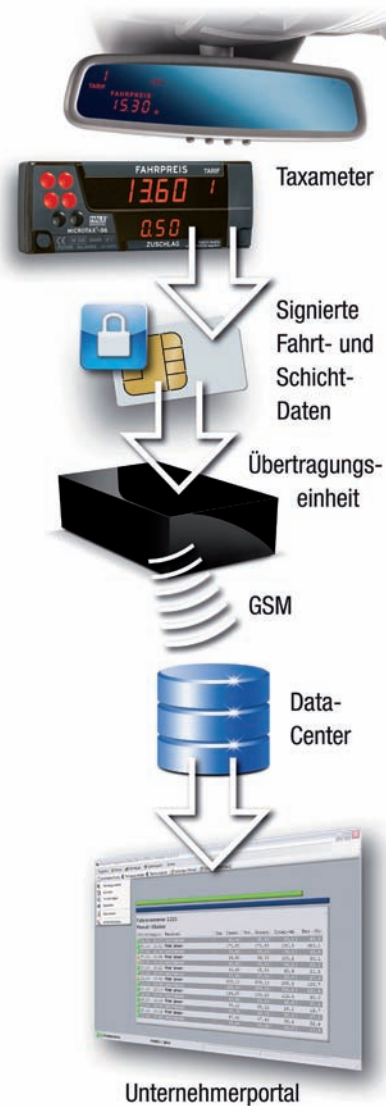


Bild 5: Prinzip der Sicherung von Taxameterdaten

Damit kann der schnelle und wirtschaftliche Ausbau von Anschlussstellen zum Laden von Elektrofahrzeugen unterstützt werden.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Neue Grenzen für die Verletzung der Lorentz-Invarianz

In Theorien jenseits des Standardmodells wird eine Wechselwirkung zwischen den im Kern gebundenen Neutronen und dem kosmischen Hintergrundfeld postuliert, die die Lorentz-Invarianz- und das CPT-Theorem verletzt. Mit dem Ziel, die Nachweisgrenze für diese Wechselwirkung zu verringern, wurde die simultane Spinpräzession von hyperpolarisiertem ^3He - und ^{129}Xe -Gas in einer Glaszelle über einen Zeitraum von 10 Tagen mit einem SQUID-Vektormagnetometer in einem Haltefeld von 400 nT im Berliner Abschirmraum BMSR-2 gemessen. Die Messungen erfolgten in Kooperation mit der Forschergruppe um Prof. W. Heil (Physik, Uni Mainz) und Dr. U. Schmidt (Physik, Uni Heidelberg). (S. Knappe-Grüneberg, FB 8.2, silvia.knappe-grueneberg@ptb.de; W. Kilian, FB 8.1, wolfgang.kilian@ptb.de)

Niedrigfeld-Magnetresonanz-Messplatz für T_1 und T_2

Für Grundlagenexperimente wurde ein SQUID-Messplatz entwickelt, der erstmals kombinierte Messungen der T_1 - und der T_2 -Relaxationszeit in Feldbereichen von 100 nT bis 50 μT ermöglicht. An dieser Messeinrichtung konnte eine vor 30 Jahren aufgestellte Vermutung bestätigt werden, dass die damals für Wasser in einem Magnetfeldbereich zwischen 2 μT und 20 μT gefundene Verkürzung von T_1 auch für T_2 zu beobachten ist (Dispersionsverhalten). Darüber hinaus stellte sich heraus, dass sich die beiden Relaxationszeiten unterhalb von 2 μT zum Nullfeld hin angleichen. (S. Hartwig, FB 8.2, stefan.hartwig@ptb.de)

Neues molekulares Diagnose- und Therapieverfahren für die Medizin

In Kooperation mit dem Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin (MDC) und dem neuen Zentrum für experimentelle und klinische Forschung (ECRC) in Berlin wurde durch die Verwendung verpackter kleiner interferierender RNA-Bruchstücke (siRNA) und den Einsatz hochempfindlicher optischer Nachweissysteme eine siRNA-induzierte Anreicherung von Protoporphyrin IX, einem Bestandteil des Hämoglobins, in verschiedenen experimentellen Tumormodellen nachgewiesen. Dieses Verfahren soll entsprechend weiterentwickelt werden, sodass es zur molekularen Bildgebung von Tumoren oder sogar zur gezielten Zerstörung von Tumorzellen genutzt werden kann. Die Arbeiten werden durch die Wilhelm-Sander-Stiftung gefördert. (B. Ebert, FB 8.3, bernd.ebert@ptb.de; J. Voigt, FB 8.3, joerg.voigt@ptb.de)

CCQM-Pilotstudie zur Messung der Konzentration CD4-positiver Zellen begonnen

Für die Konzentrationsbestimmung von Zellen, die durch immunologische Markierungen identifiziert werden, existieren derzeit keine Referenz-Messverfahren, die die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherstellen. Jedoch hängt beispielsweise die Diagnose und Behandlung einer HIV-Infektion entscheidend von der Konzentration von Lymphozyten ab, die das Antigen CD4 tragen. Daher wird vom NIBSC (UK), dem NIST (USA) und der PTB eine entsprechende CCQM-Pilotstudie durchgeführt, bei der die Teilnehmer die relative Konzentration der CD4-positiven Lymphozyten bestimmen sollen. (A. Kummrow, FB 8.3, andreas.kummrow@ptb.de; M. Kammel, FB 8.3, martin.kammel@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

Analyse dynamischer Messungen

Die Entwicklung von Verfahren zur Analyse dynamischer Messungen wurde in Kooperation mit dem NPL und dem SP erfolgreich fortgesetzt, und es wurde ein internationaler Workshop zu diesem Thema veranstaltet. (S. Eichstädt, FB 8.4, sascha.eichstaedt@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)



Strömungssimulationen für einen inerten Freistrahler

Zu Freistrahlen eines inerten Gases (Helium in Luft) mit variabler Dichte, die bei Explosionen auftreten, wurden Computersimulationen zur Bestimmung von Fluss- und Materialeigenschaften durchgeführt und mit Experimenten aus dem Fachbereich 3.5 „Zünddurchschlagsprozesse“ verglichen. (Gert Lindner, FB 8.4, gert.lindner@ptb.de, Regine Model, FB 8.4, regine.model@ptb.de)

Statistische Behandlung des inversen Problems der Scatterometrie

Mit Hilfe von Simulationsrechnungen und Analyse von Messdaten wurde gezeigt, dass eine statistische Behandlung des inversen Problems in der Scatterometrie deutlich bessere Ergebnisse als eine konventionelle Least-Square-Methode erreicht. (Mark-Alexander Henn, FB 8.4, mark-alexander.henn@ptb.de; Hermann Groß, FB 8.4, hermann.gross@ptb.de; Clemens Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de; Markus Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

Testumgebung für Messunsicherheitssoftware

Die Verbreiterung des Angebots von Softwareprodukten zur Berechnung der Messunsicherheit hat dazu herausgefordert, Validierungen solcher Software mit gleicher Methodik durchzuführen und damit die Ergebnisse grundsätzlich vergleichbar zu machen. Zu diesem Zweck ist eine produktunabhängige Testumgebung mit universeller Testdatenbasis entwickelt worden. Die wichtigsten Merkmale der entstandenen Testumgebung sind ihre Nutzbarkeit für prinzipiell jede Art von Messunsicherheitssoftware und die Rückführbarkeit jedes einzelnen Testfalls auf die relevante Norm. (N. Greif, FB 8.5, norbert.greif@ptb.de; H. Schrepf, FB 8.5, heike.schrepf@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Messtechnische Kontrollen für Impressionstonometer – eine Qualitätsgarantie in der Augenheilkunde

Ringvergleichsmessungen an diesen Messgeräten zwischen den Eichämtern, privaten Anbieterfirmen und der PTB zeigen, dass mechanische Impressionstonometer in definierten Zeitintervallen neu zu kalibrieren sind, damit das hohe messtechnische Qualitätsniveau bei diesen wichtigen ophthalmologischen Instrumenten zur präzisen Messung des intraokularen Drucks gewahrt bleibt und zukünftig garantiert werden kann. (T. Schwentek, FB 8.1, thomas.schwentek@ptb.de)

Start des BMBF-Projektes „Magnetic Particle Imaging Technologie (MAPIT)“

Dieses Verbundprojekt von akademischen und Industriepartnern zielt auf die experimentelle Validierung des neuen medizinischen Bildgebungsverfahrens „Magnetic Particle Imaging“ (MPI). Mit MPI kann schnell und genau die Verteilung nanoskaliger magnetischer Tracer im Körper dargestellt werden. Die PTB wird in dem Forschungsverbund die physikalische Charakterisierung der Tracer übernehmen. (L. Trahms, FB 8.2, lutz.trahms@ptb.de)

Start des MNPQ-Projektes „Aufbau eines pädiatrischen EKG-Referenzsystems zur Funktionserweiterung Automatisierter Externer Defibrillatoren“

In diesem vom Bundesministerium für Wirtschaft geförderten Projekt wird die PTB in Kooperation mit der Metrax GmbH einen Datensatz von pädiatrischen EKGs zusammenstellen, mit dem die immer häufiger installierten automatisierten externen Defibrillatoren auf ihre Eignung zur korrekten Arrhythmieerkennung auch bei Kindern getestet werden können. (U. Steinhoff, FB 8.2, uwe.steinhoff@ptb.de)



Quantitative Verfahren für die Polymerase-Kettenreaktionen

Die Polymerase-Kettenreaktion (engl. polymerase chain reaction, PCR) ist eine verbreitete Methode zur Analyse genetischen Materials. Im Vergleich zum bloßen Nachweis von DNA (qualitative PCR) erlaubt die quantitative oder real-time PCR, die Menge der gebildeten DNA bereits während des Amplifikationsprozesses zu erfassen. Ziel eines von der PTB in Kooperation mit der Dr. Lerche KG begonnenen MNPQ-Transfer-Projektes ist der Nachweis, dass Spezifität und Empfindlichkeit von Polymerase-Kettenreaktionen durch ein innovatives Verfahren zur Isolation und Aufreinigung von DNA aus humanem Blut wesentlich gesteigert werden können. (S. Schädel-Ebner, FB 8.3, sandra.schaedel-ebner@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

Präzisionsvolumenmessung für die Durchflussszytometrie

Bei Durchflussszytometern mit integrierter Volumenbestimmung betragen die Messunsicherheiten typisch 2 %. Für die in der PTB entwickelten Referenz-Messinstrumente werden gravimetrisch kalibrierte Polypropylenspritzen eingesetzt, mit denen Volumina von 10 μL mit einer Unsicherheit von weniger als 0,2 % gemessen werden können. Die Kalibration und die Selektion der Einwegspritzen erfolgt dabei mit einem in der PTB entwickelten gravimetrischen Verfahren, bei dem Verdunstung und Auftrieb berücksichtigt sind (S. Reitz et al., Meas. Sci. Technol. 21, 074006, 9pp, 2010). (S. Reitz, FB 8.3, stephan.reitz@ptb.de; M. Kammel, FB 8.3, martin.kammel@ptb.de; A. Kummrow, FB 8.3, andreas.kummrow@ptb.de)

Neues MNPQ-Projekt „Kamerabasiertes Nahfeld-Goniophotometer und Temperaturmessung im visuellen Spektralbereich“

Gemeinsam mit den PTB-Arbeitsgruppen „Photometrie“ und „Hochtemperaturskala“ sowie der TechnoTeam GMBH wird im Rahmen eines 2010 gestarteten MNPQ-Projekts die kamerabasierte Nahfeld-Goniophotometrie weiterentwickelt. (Gerd Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de; Franko Schmähling, FB 8.4, franko.schmaehling@ptb.de)

Vereinfachtes Modell für die Scatterometrie zum Einsatz in der Industrie

In Kooperation mit dem Advanced Mask Technology Center (AMTC) in Dresden wurde im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts CDuR32 mit Hilfe von Simulationsstudien die praktische Eignung eines vereinfachten Geometriemodells bei der scatterometrischen Bestimmung geometrischer Parameter zur Qualitätskontrolle von Lithografiemasken nachgewiesen. (Hermann Groß, FB 8.4, hermann.gross@ptb.de; Markus Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

Traceable Multiple Sensor-Messtechnik in die Industrie transferiert

Im Rahmen eines „MNPQ-Transfer“-Projektes des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie wurde das in der PTB entwickelte „Traceable Multiple Sensor“-Messverfahren für die hochgenaue Formmessung optischer Oberflächen zum Projektpartner TRIOPTICS GmbH transferiert und für eine kommerzielle Nutzung verfügbar gemacht. (Manuel Stavridis, FB 8.4, manuel.stavridis@ptb.de, Franko Schmähling, FB 8.4, franko.schmaehling@ptb.de, Clemens Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Hochaufgelöste MR-Bildgebung des Gehirns: Messung der kortikalen Dicke

In Zusammenarbeit mit der Charité-Universitätsmedizin Berlin wurde am 3T-Tomographen der PTB die individuelle Dicke der Großhirnrinde beim Menschen bestimmt. Ein Vergleich der Gehirne von Rauchern und Personen, die niemals geraucht haben, zeigte bei der Rauchergruppe eine verringerte Dicke in einer Region, die u. a. für die Impulskontrolle und das Treffen von Entscheidungen relevant ist. (F. Schubert, FB 8.1, florian.schubert@ptb.de)



4-Kanal-Spule für die Herzbildgebung im 7-Tesla-MRT

In Kooperation mit Kollegen vom Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin (MDC), der Charité und der Firma Siemens wurde an der Berliner Ultrahochfeld-Facility BUFF eine 4-Kanal-Herz/Torso-Spule entwickelt und aufgebaut. Die Spule überzeugte auf Anhieb durch gute Bildqualität. Zwischenzeitlich wurde von einer Benannten Stelle auch die sicherheitstechnische Unbedenklichkeit dieser Eigenentwicklung bescheinigt, sodass die Spule jetzt auch für Probandenstudien eingesetzt werden darf. (H. Pfeiffer, FB 8.1 harald.pfeiffer@ptb.de)

Butler-Matrix für die 7-Tesla-MRT

Eine Butler-Matrix ist eine passive $n \times n$ -Schaltmatrix, in der ein hochfrequentes Eingangssignal in n Ausgangssignale gleicher Amplitude, aber unterschiedlicher Phase aufgespalten wird. Je nach gewähltem Eingangskanal können rechts- und linkszirkular polarisierte Moden und deren Obertöne erzeugt werden. Der Aufbau einer solchen Matrix erfordert hohe Sorgfalt, da sich bei der Vielzahl der intern verarbeiteten Bauelemente kleine Phasenabweichungen schnell zu inakzeptablen Gesamtfehlern aufaddieren können. Für den 7-Tesla-MRT der Berliner Ultrahochfeld-Facility wurde jetzt eine 16-kanalige Butler-Matrix realisiert. Das Gerät hat sich im praktischen Einsatz sofort bewährt. (H. Pfeiffer, FB 8.1 harald.pfeiffer@ptb.de)

Messungen zur europäischen Gesundheits-Studie IMAGEN abgeschlossen

Die Erfassung der Probandendaten des 2007 gestarteten EU-Projekts zum Sucht- und Risikoverhalten von Jugendlichen IMAGEN ist beendet. MR-Daten von 2000 Probanden wurden an acht europäischen Zentren gemessen, 254 davon von der Berliner Charité-PTB-Kooperation. Dies ist die bisher größte am PTB-MR-Scanner untersuchte Probandenkohorte, und besonders die Notwendigkeit, trotz signifikanter Hardware-Unterschiede ein mit allen anderen Zentren präzise abgeglichenes Messprotokoll zu implementieren, hatte eine große Herausforderung dargestellt. Aus PTB-Sicht ist die Vergleichbarkeit von Messdaten aus verschiedenen Quellen von besonderem Interesse. (R. Brühl, FB 8.1, ruediger.bruehl@ptb.de)

Neuer MR-Tomograf in Betrieb genommen

Im Sommer 2009 tat sich die Möglichkeit auf, die seit Längerem angestrebte Ablösung des 14 Jahre alten Bruker MR-Tomografen durch ein modernes Nachfolgegerät kurzfristig umsetzen zu können. Die Rahmenbedingungen für die Neuinstallation eines MR-Systems inklusive aller zugehörigen Elektro-, Wasser- und Klimatechnik waren aufgrund der baulichen Enge und der laufenden Kernsanierung des Observatoriums eine enorme Herausforderung. Am 23.11.2009, nur vier Monate nach der Grundsatzentscheidung, war der neue 3-Tesla-MRT vom Typ Siemens Verio fertig installiert und wurde an die Nutzer übergeben. Seit Jahresbeginn 2010 läuft das System im bisher problemlosen Routinebetrieb. (B. Ittermann, FB 8.1, bernd.ittermann@ptb.de)

Untersuchung der E-Feld-Verteilungen beim parallelen Senden im MRT

Die Bildqualität von Ultrahochfeld-MRT-Systemen durch parallelen Einsatz mehrerer Sendekanäle zu verbessern ist ein innovatives und dynamisches Forschungsgebiet. Um die Patientensicherheit dieser Verfahren zu gewährleisten, muss die Verteilung der absorbierten Hochfrequenzleistung (SAR) im Körper bekannt sein. Dazu wurde in der PTB ein optisch-elektrischer E-Feld-Sensor (OEFS) in Betrieb genommen und an einem 4-Kanal-Sendearray getestet. Erste Messungen in Phantomen bestätigen die Existenz von „hot spots“ in der SAR-Verteilung, wie sie von numerischen EM-Feld-Simulationen vorhergesagt wurden. (F. Seifert, FB 8.1, frank.seifert@ptb.de)

Tx-SENSE-Simulationen für die 7-Tesla-MRT

Tx-SENSE, d. h. räumlich selektive Anregung durch parallelen Einsatz mehrerer Sendekanäle im MRT, ist eine vielversprechende Möglichkeit, die Bildqualität von Kardio-MRT-Aufnahmen insbesondere bei hohen Feldstärken zu verbessern. Um die komplizierten Hochfrequenz-Pulse für eine Tx-SENSE-Anregung berechnen zu können, werden möglichst exakte Sensitivitätskarten für die einzelnen Elemente der verwendeten Hochfrequenzspule benötigt. Ein verbreitetes Näherungsverfahren zur Messung solcher Karten ist die Virtuelle-Referenz-Methode (VRM). Durch aufwendige numerische Simulation konnte jetzt nachgewiesen werden, dass die VRM-Näherung noch hinreichend gute Ergebnisse für Tx-SENSE-Messungen am Kopf liefert, aber für den Einsatz in der Körperbildgebung nicht mehr brauchbar ist. (F. Seifert, AG 8.11, frank.seifert@ptb.de)

Nachweis der Wanderung von ^{19}F -markierten dendritischen Zellen durch MR-Bildgebung

^{19}F ist ein empfindlicher MR-Sondenkern, der im natürlichen Gewebe nahezu nicht vorkommt. Einer Kooperation von Wissenschaftlern aus dem MDC Berlin-Buch, der Berliner Ultrahochfeld-Facility, der Charité und der PTB ist es jetzt gelungen, dendritische Zellen, die eine wichtige Rolle im Immunsystem spielen, mit ^{19}F -Nanopartikeln zu markieren und in Versuchstiere zu injizieren. Durch Überlagerung untergrundfreier ^{19}F -MR-Bilder mit zeitnah aufgenommenen anatomischen ^1H -MR-Bildern konnte dargestellt werden, wie die Zellen innerhalb von 24 h zu nahe liegenden Lymphknoten wandern. Damit ist gezeigt, dass die Methode das Potenzial besitzt, einmal eine wichtige Rolle in der gezielten Zelltherapie von Tumoren oder Autoimmunerkrankungen zu spielen. (H. Waiczies, AG 8.13, helmar.waiczies@ptb.de)

Lassen sich Hirnaktivitäten durch die Kernspintomografie direkt darstellen?

Im Rahmen des Projekts „Bernstein Fokus Neurotechnologie“, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wird, werden die Bedingungen untersucht, unter welchen es möglich ist, Hirnströme direkt durch die Kernspintomografie sichtbar zu machen. Hierzu wurden mit einem Dipolphantom der TU Ilmenau Hirnströme simuliert und ihre Wirkung auf die Kernresonanz der umgebenden wässrigen Lösung gemessen. (N. Höfner, FB 8.2, nora.hoefner@ptb.de; R. Körber, FB 8.2, rainer.koerber@ptb.de) Kooperation mit Prof. Dr. J. Haueisen, TU Ilmenau

MEG-Pilotuntersuchungen an Dystoniepatienten mit implantierter Tiefenhirnelektrode.

Bei Dystonie- und bei Parkinson-Patienten werden in schweren Fällen vermehrt Diagnoseansätze mittels implantierter Hirnstimulatoren verfolgt. Dabei stehen die Tiefenhirnelektroden-Anschlüsse für ca. 5 Tage extracorporal zur Verfügung. In diesem Zeitraum wurden in der PTB simultan die sog. Lokalen Feldpotentiale der Elektroden und das externe MEG gemessen werden. Mit dieser Messtechnik ist es möglich, diagnostisch wichtige Kopplungsphänomene zwischen der Hirnrinde (Kortex) und der durch die Elektroden erfassten Subkortikalen-Region nachzuweisen. (T. Sander-Thömmes, FB 8.2, tilmann.sander-thoemmes@ptb.de) Zusammen mit Prof. A. Kühn, Klinik für Neurologie, Charité – Campus Virchow



Quantifizierung von magnetischen Nanopartikeln für die Krebstherapie

Das Projekt „Magnetische Nanopartikel für die Krebstherapie“ wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert und hat zum Ziel, in Zusammenarbeit von technischen und biomedizinischen Arbeitsgruppen die physikalischen Grundlagen neuer, auf magnetischen Nanopartikeln basierender Krebstherapien, wie z. B. „Magnetic Drug Targeting“ und Magnetische Thermoablation, aufzuklären. Bei diesen Therapien werden magnetische Nanopartikel im Tumorgewebe angereichert, um damit die Wirkung von Chemotherapeutika oder Hitzebehandlungen zu fokussieren. Mittels magnetrelaxometrischer Messungen an Mäusen wurde die Nanopartikelmenge in der Zielregion detektiert mit einer Messunsicherheit von 0,5 mg absoluter Nanopartikelmasse. (H. Richter, FB 8.2, heike.richter@ptb.de) Kooperation mit Prof. I. Hilger, Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, FSU-Jena.

Quantitative Bestimmung der Farbstoffanreicherung für die Fluoreszenz-Mammografie

Der in der PTB seit einigen Jahren verfolgte Ansatz zur bildlichen Darstellung maligner Gewebeveränderungen mit Hilfe von fluoreszierenden Kontrastmitteln ist nun auf eine quantitative Basis gestellt worden. In dem neuartigen Verfahren werden tomografische Daten zur Erzeugung von 3D-Volumenbildern genutzt, um daraus die Lage einer fluoreszierenden Läsion zu bestimmen und deren Größe anhand von Vergleichsmessungen mit Phantomen abzuschätzen. Diese Informationen werden mit Daten zeitaufgelöster Absorptions- und Fluoreszenz-Messungen kombiniert, um daraus die Farbstoffanreicherung in der Läsion bezüglich des umliegenden Gewebes zu berechnen. (A. Hagen, FB 8.3, axel.hagen@ptb.de; D. Grosenick, FB 8.3, dirk.grosenick@ptb.de)

Erfolgreiche klinische Studie im deutsch-polnischen Verbundprojekt zur optischen Darstellung der Perfusionsdynamik bei Schlaganfallpatienten

In dem 2007 gestarteten und vom BMBF geförderten Verbundprojekt soll die Anwendbarkeit der zeitaufgelösten diffusen optischen Bildgebung bei der Überwachung der Hirndurchblutung über Messungen des zeitlichen Verlaufs der Kontrastmittelabsorption direkt am Krankenbett validiert werden. Bei Messungen an einer größeren Zahl von Schlaganfallpatienten in Zusammenarbeit mit der Charité ließ sich bei der Infarktlokalisierung eine sehr hohe Korrelation zwischen klinischen Diagnosen und den optisch ermittelten Bolus-Parametern feststellen. Auch konnte eine Perfusionsverbesserung nach einem chirurgischen Eingriff zur Behebung eines Gefäßverschlusses nachgewiesen werden. (O. Steinkellner, FB 8.1, oliver.steinkellner@ptb.de; H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de; R. Macdonald, FB 8.3, rainer.macdonald@ptb.de)

Bestimmung der Vitalität von Zellen für die regenerative Medizin

Die Vision der regenerativen Medizin ist die Heilung oder Wiederherstellung verletzter Zellen, Gewebe oder Organe. Eine zentrale Fragestellung bei der Entwicklung von geeigneten Verfahren zur Herstellung neuer Zellverbände ist die Bestimmung der Lebensfähigkeit der eingesetzten Zellen. Bei der Untersuchung von Zellen, die sich auf Oberflächen oder dreidimensionalen Gerüsten entwickeln, kann die Vitalität der Zellen durch fluoreszenzmikroskopische Untersuchungen festgestellt werden. In der PTB werden derzeit Vergleichsmessungen zwischen durchflusszytometrischen Methoden, die eine hohe statistische Genauigkeit haben, und fluoreszenzmikroskopischen Verfahren bei der Bestimmung der Vitalität von Zellen durchgeführt. (M. Frankowski, FB 8.3, marcin.frankowski@ptb.de; A. Kummrow, FB 8.3, andreas.kummrow@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de, R. Macdonald, FB 8.3, rainer.macdonald@ptb.de)



Statistisches Verfahren zur ELISA-Konzentrations-schätzung

Ein neu entwickeltes statistisches Verfahren ermöglicht eine zuverlässige Konzentrations-schätzung bei der Verwendung von Fluoreszenz-Sandwich-ELISAs, die unter anderem zum Nachweis von Infektionen, Hormonen oder Drogen eingesetzt werden. (Katy Klauenberg, FB 8.4, katy.klauenberg@ptb.de)

Lokalisation und Quantifizierung magnetischer Nanopartikel

Ausgehend von einem Multipolansatz wurde ein Verfahren zur Lokalisation und Quantifizierung magnetischer Nanopartikel anhand von Magnetfeldmessungen entwickelt und erfolgreich an physikalischen Phantomen getestet. (Wolfgang Haberkorn, FB 8.4, wolfgang.haberkorn@ptb.de; Frank Wiekhorst, FB 8.2, frank.wiekhorst@ptb.de)

Datenanalyse für die MEG

Gemeinsam mit der TU Berlin (Prof. Orglmeister) wurde ein von der DFG gefördertes Projekt zur Entwicklung neuer Verfahren für die Analyse von MEG-Daten erfolgreich abgeschlossen. (Florian Kohl, FB 8.4, florian.kohl@ptb.de; Gerd Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de; Markus Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de; Clemens Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

Neues DFG-Projekt zur Kopplung von Reaktions-Diffusions-Wellen und mechanischen Deformationen

Es wurde ein neues DFG-Projekt zur „Kopplung von Reaktions-Diffusions-Wellen und mechanischen Deformationen in elastischen anregbaren Medien“ im Rahmen des von der DFG an der TU Berlin neu eingerichteten Graduiertenkollegs 1558 „Kollektive Nichtgleichgewichtsdynamik in kondensierter Materie und biologischen Systemen“ eingeworben. (Markus Radszuweit, FB 8.4, markus.radszuweit@ptb.de; Markus Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

Simulationen von Phasenübergängen in der kollektiven Dynamik aktiver Stäbchen

Computersimulationen eines Modells für aktive Stäbchen („self-propelled rods“) zeigen einen Übergang zu langreichweitiger nematischer Ordnung in zwei Dimensionen, der mit einer Segregation in Bereiche hoher und niedriger Dichte verbunden ist. (Markus Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

Erfolgreicher Abschluss des Projektes „Selbstorganisation an aktiven Grenzflächen“ im Sonderforschungsbereich 555 „Komplexe Nichtlineare Prozesse“

Im Rahmen des SFB 555 (Humboldt-Universität Berlin) wurde in der PTB ein Projekt zur Selbstorganisation an aktiven Grenzflächen mit Arbeiten zur Strukturbildung in Biomembranen sowie zur Homogenisierung heterogener Reaktions-Diffusions-Systeme abgeschlossen. (Sergio Alonso, FB 8.4, sergio.alonso@ptb.de; Markus Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de).

Verbundvorhaben On-Board-Metering gestartet

Im Mai 2010 wurde im Rahmen des 5. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung das Verbundvorhaben On-Board Metering (OBM) unter Beteiligung der PTB gestartet. Es soll eine technologisch neue und wirtschaftlich effiziente Lösung für das Messen und Abrechnen von elektrischer Energie für den Fall entwickelt werden, dass die Messfunktion in das Fahrzeug verlagert wird. Bisher wurde die OBM-Systemarchitektur als Voraussetzung für weitere Arbeitsschritte erarbeitet. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)

Sichere Erfassung und Verarbeitung von Taxameterdaten

Die nachprüfbare Erfassung und Verwaltung von Taxameterdaten ist eine zwingende Konsequenz aus den gesetzlichen Anforderungen an Taxameter. In der PTB ist eine Lösung mit dem Ziel entwickelt worden, den erforderlichen Nachweis der Unverfälschtheit von Taxameterdaten führen zu können, auch wenn diese Daten aus dem Taxameter ausgelagert worden sind. Diese Lösung, die in Zusammenarbeit mit einem Datendienstleister und einem Taxameterhersteller in konkrete Hard- und Software umgesetzt worden ist, besteht in einem kryptografischen Sicherungskonzept. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)



Prototypen kryptografisch gesicherter Kassensysteme

Mit der Fertigstellung von Prototypen wurde für das vom BMWi geförderte MNPQ-Vorhaben „Integrierte Sicherheitslösung für messwertverarbeitende Kassensysteme“ ein wesentliches Ziel erreicht. Die Kassen der am Projekt beteiligten Partner verfügen über die volle Funktionalität und wurden zusätzlich mit den im Projekt erarbeiteten Sicherheitsfunktionen ausgestattet. Nach den Tests der Prototypen unter realen Bedingungen sind Feldtests im breiteren Umfang geplant. Parallel zu den Prototypen wurde von der PTB ein Referenzsystem für die Prototypenentwicklung aufgebaut. Damit steht nicht nur ein Demonstrator der Lösung zur Verfügung, sondern es eignet sich als Referenz für die Entwicklung von Testumgebungen. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)

Steigende Zulassungszahlen bei Spielgeräten

Im Geschäftsjahr 2009/2010 wurden 125 neue Spielgerätebauarten durch die PTB zugelassen. Damit ist erstmals die Grenze von 100 neu zugelassenen Bauarten in einem Jahr überschritten worden. Die Steigerung der Zulassungszahlen war notwendig, um der weiter wachsenden Zahl von Zulassungsanträgen gerecht zu werden. Sie wurde ermöglicht durch eine Verstärkung des Arbeitsbereiches, aber auch durch eine weitere Optimierung der Arbeitsabläufe, ohne die Qualitätsstandards der Zulassungsprüfung abzusenken. (R. Kuschfeldt, FB 8.5, reiner.kuschfeldt@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Nachweis der MEG-Erfassung mittels atomarer Mikromagnetometer

Im National Institute of Standards and Technology / USA (NIST) wurden hochempfindliche atomare Mikromagnetometer entwickelt, die auf der Technologie miniaturisierter Atomuhren basieren. Ein solches „Chip Scale Atomic Magnetometer“ (CSAM) des NIST zeigte schon im Vorjahr im Berliner magnetisch geschirmten Raum (BMSR-2) beeindruckende Eigenschaften. Mit einer weiterentwickelten Version mit geringerem Rauschen wurde nun ein mehrkanaliges Magnetenzephalogramm (MEG) aufgezeichnet. Durch den Vergleich mit einem anschließend aufgezeichneten konventionellen SQUID-MEG wurden die Messdaten validiert. (T. Sander-Thömmes, FB 8.2, tilmann.sander-thoemmes@ptb.de)

Vertretung in JCGM-WG1

Seit Frühjahr 2010 ist der Fachbereich „Mathematische Modellierung und Datenanalyse“ in der Arbeitsgruppe des JCGM am BIPM vertreten, die für die Erstellung von Richtlinien zur Bestimmung von Messunsicherheiten in der Metrologie verantwortlich ist. (Clemens Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

Internationaler Workshop zur „Mathematik für die Metrologie“ (MATHMET 2010)

Gemeinsam mit dem NPL, der EURAMET „Math focus group“ und dem IMEKO TC 21 hat die PTB 2010 einen internationalen Workshop zu aktuellen mathematischen Fragestellungen in der Metrologie veranstaltet. (Markus Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de; Clemens Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

Expertise der PTB zu Software im gesetzlichen Messwesen beim Asia-Pacific-Meeting gefragt

Die Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC) und das Asia-Pacific Legal Metrology Forum (APLMF) haben die PTB eingeladen, über die softwarebezogenen internationalen Richtlinien der OIML und über entsprechende WELMEC-Leitfäden zu referieren sowie Anleitungen für deren Anwendung bei softwaretechnischen Neuerungen in Messgeräten zu geben. Die in Seminar- und Tutoriumsform durchgeführten Veranstaltungen in Bangkok (Thailand) waren insofern erfolgreich, als dass sie zur internationalen Harmonisierung der Softwareanforderungen im gesetzlichen Messwesen beigetragen haben. (U. Grottker, FB 8.5, ulrich.grottker@ptb.de)



Anhang



Kuratorium

Mitglieder

Präsident des Kuratoriums

Ministerialdirektor Jürgen Meyer

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin

Stellvertretender Präsident des Kuratoriums

Prof. Dr. h. c. Dr. rer. nat. Klaus von Klitzing

Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

Dr.-Ing. Axel Anderlohr

Kaiserslautern

Prof. Dr. rer. nat. Gisela Anton

Physikalisches Institut IV der Universität Erlangen

Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Auweter-Kurtz

Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Winfried Büttner

Leiter Corporate Intellectual Property and Functions in der Zentralabteilung/Corporate Technology Siemens AG, München

Dr. rer. nat. Markus Dilger

Geschäftsführung der TST Biometrics GmbH, München

Prof. Dr. rer. nat. Olaf Dössel

Institut für Biomedizinische Technik, Universität Karlsruhe

Prof. Dr. Wolfgang Ertmer

Institut für Quantenoptik, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Dr. Petra Gowik

Komm. Leiterin der Referatsgruppe „Untersuchungen“, Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, Berlin

Prof. Dr. Axel Haase

Direktor des Zentralinstituts für Medizintechnik (IMETUM), Garching

Prof. Dr. Theodor W. Hänsch

Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, und Ludwig-Maximilians-Universität, München

Prof. Dr. Klaus-Peter Jäckel

Oberkirch

Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Kowalsky

Leiter des Instituts für Hochfrequenztechnik, Technische Universität Braunschweig

Dr. rer. nat. Gerald Linke

Leiter Kompetenz-Center Gastechnik, E.ON Ruhrgas AG, Essen

Dipl. Phys. Veronika Martens

Leiterin des Metrologiezentrums, Sartorius AG, Göttingen

Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Mlynek

Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft, Berlin

Prof. Dr.-Ing. Joachim Scheuren

Geschäftsführer der Müller-BBM GmbH, Planegg

Prof. Dr. Hans Schuler

Vice President Engineering Service, BASF SE, Ludwigshafen

Dr. rer. nat. Wolfgang Schwitz

Ehem. Direktor des Bundesamtes für Metrologie, Ittigen (Schweiz)

Dr. rer. nat. Thomas Sesselmann

Geschäftsführer
Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut

Dr. rer. nat. Augustin Siegel

Oberkochen

Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. Lothar Siekmann

Institut für Klinische Biochemie, Universität Bonn

Ind.-Kfm. Peter von Siemens

München

Prof. Dr. h. c. Dr. rer. nat. Joachim Treusch

Präsident der Jacobs University Bremen gGmbH

Prof. e. h. mult. Dr. rer. nat. Martin Winterkorn

Vorstandsvorsitzender der Volkswagen AG, Wolfsburg

Prof. Dr. rer. nat. Eberhard Umbach

Präsident des Karlsruher Instituts für Technologie

Dr.-Ing. Klaus Rudolf Wurster

Geschäftsführer
National Rejectors Inc. GmbH, Buxtehude

Ehrenkurator

Prof. Dr. h. c. mult. Dr. rer. nat. Heinz-Georg Wagner

Institut für Physikalische Chemie, Universität Göttingen



Präsidium			Fachbereich PSt Präsidentialer Stab	Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Präsident Prof. Dr. E. O. Göbel ☎ 1000	Vizepräsident Prof. Dr. M. Peters ☎ 2000	Mitglied des Präsidiums Dr. J. Stenger ☎ 3000	Dr. R. Wynands ☎ 1009	Dr. Dr. J. Simon ☎ 3005

Abteilung 1 Mechanik und Akustik Dr. R. Schwartz ☎ 1010	Abteilung 2 Elektrizität Dr. U. Siegner ☎ 2010	Abteilung 3 Chemische Physik u. Explosionsschutz Prof. Dr. K.-D. Sommer ☎ 3010	Abteilung 4 Optik Dr. F. Riehle ☎ 4010	Abteilung 5 Fertigungsmesstechnik Dr. H. Bosse ☎ 5010
--	---	---	---	--

Fachbereich 1.1 Masse Dr. D. Ratschko ☎ 1100	Fachbereich 2.1 Gleichstrom und Niederfrequenz Dr. J. Melcher ☎ 2100	Fachbereich 3.1 Metrologie in der Chemie Dr. B. Güttler ☎ 3100	Fachbereich 4.1 Photometrie und an- gewandte Radiometrie Dr. K. Stock ☎ 4100	Fachbereich 5.1 Oberflächenmess- technik Dr. L. Koenders ☎ 5100
Fachbereich 1.2 Festkörpermechanik Dr. R. Kumme ☎ 1200	Fachbereich 2.2 Hochfrequenz und Felder Dr. T. Schrader ☎ 2200	Fachbereich 3.2 Gasanalytik und Zustandsverhalten Prof. Dr. V. Ebert ☎ 3200	Fachbereich 4.2 Bild- und Wellenoptik Dr. E. Buhr ☎ 4200	Fachbereich 5.2 Dimensionelle Nanometrologie Dr. J. Flügge ☎ 5200
Fachbereich 1.3 Geschwindigkeit Dr. F. M. Jäger ☎ 1300	Fachbereich 2.3 Elektrische Energiemesstechnik Dr. M. Kahmann ☎ 2300	Fachbereich 3.3 Stoffeigenschaften und Druck *Prof. Dr. K.-D. Sommer ☎ 3010	Fachbereich 4.3 Quantenoptik und Längeneinheit Dr. P. Becker ☎ 4300	Fachbereich 5.3 Koordinatenmess- technik Dr. F. Härtig ☎ 5300
Fachbereich 1.4 Gase Dr. H. Többen ☎ 1400	Fachbereich 2.4 Quantenelektronik Dr. A. Zorin ☎ 2400	Fachbereich 3.4 Grundlagen des Explosionsschutzes Dr. H. Bothe ☎ 3400	Fachbereich 4.4 Zeit und Frequenz Dr. E. Peik ☎ 4400	Fachbereich 5.4 Interferometrie an Maßverkörperungen Dr. R. Schödel ☎ 5400
Fachbereich 1.5 Flüssigkeiten Dr. G. Wendt ☎ 1500	Fachbereich 2.5 Halbleiterphysik und Magnetismus Dr. H. W. Schumacher ☎ 2500	Fachbereich 3.5 Zünddurchschlags- prozesse Dr. U. Klausmeyer ☎ 3500	Fachbereich 4.5 Optische Technologien Dr. S. Kück ☎ 4500	Fachbereich 5.5 Wissenschaftlicher Gerätebau Prof. Dr. F. Löffler ☎ 5500
Fachbereich 1.6 Schall Dr. C. Koch ☎ 1600	Fachbereich 2.6 Elektrische Quantenmetrologie Dr. F. J. Ahlers ☎ 2600	Fachbereich 3.6 System- und Eigensicherheit Dr. U. Johannsmeyer ☎ 3600		
Fachbereich 1.7 Akustik und Dynamik Prof. Dr. W. Scholl ☎ 1700		Fachbereich 3.7 Zündquellensicherheit Dr. M. Beyer ☎ 3700		

Benannte Stelle (Nummer 0102) nach
EG-Richtlinien 94/9/EG, 2009/23/EG,
2004/22/EG, 2006/42/EG

Zertifizierungsstelle Dr. H. Stolz im Fachbereich Q.3 ☎ 8320	QUEST Institut an der PTB Prof. Dr. P. O. Schmidt ☎ 4700
--	---

Organigramm

Stand: 1. Dezember 2010

Vertreter d. Präsidenten in Berlin

Prof. Dr. H. Koch
☎ (Ch) 7343

Qualitätsmanager

Dr. A. Odin
☎ 8330

Interne Revision

Dr. U. Oberpottkamp
☎ 9012

Abteilung 6 Ionisierende Strahlung

Dr. H. Janßen
☎ 6010

Abteilung 7 Temperatur und Synchrotronstrahlung

Dr. G. Ulm
☎ (Ch) 7312

Abteilung 8 Medizinphysik und metrologische Informationstechnik

Prof. Dr. H. Koch
☎ (Ch) 7343

Abteilung Q Wissenschaftlich- technische Querschnittsaufgaben

Dr. R. Weiß
☎ 8010

Abteilung Z Verwaltungsdienste

C. Tampier
☎ 9010

Fachbereich 6.1 Radioaktivität

Dr. D. Arnold
☎ 6100

Fachbereich 7.1 Röntgenmesstechnik mit Synchrotronstrahlung

Prof. Dr. M. Richter
☎ (Ad) 5084

Fachbereich 8.1 Medizinische Messstechnik

Dr. B. Itermann
☎ (Ch) 7318

Referat Q.11 Wissenschaftliche Bibliotheken

Dr. J. Meier
☎ 8131

Referat Z.11 Haushalt und Beschaffung

M. Wasmuß
☎ 9110

Fachbereich 6.2 Dosimetrie für Strahlentherapie und Röntgendiagnostik

Dr. U. Ankerhold
☎ 6200

Fachbereich 7.2 Radiometrie mit Synchrotronstrahlung

*Dr. G. Ulm
☎ (Ch) 7312

Fachbereich 8.2 Biosignale

Dr. L. Trahms
☎ (Ch) 7213

Fachbereich Q.2 Theoretische Grundlagen

*Dr. R. Weiß
☎ 8010

Referat Z.12 Personal

S. Wiemann
☎ 9120

Fachbereich 6.3 Strahlenschutz- dosimetrie

Dr. P. Ambrosi
☎ 6300

Fachbereich 7.3 Detektorradiometrie und Strahlungs- thermometrie

Dr. J. Hollandt
☎ (Ch) 7369

Fachbereich 8.3 Biomedizinische Optik

Prof. Dr. R. Macdonald
☎ (Ch) 7542

Fachbereich Q.3 Gesetzl. Messwesen u. Technologietransfer

Dr. P. Ulbig
☎ 8300

Referat Z.13 Justitiariat

M. Gahrens
☎ 9130

Fachbereich 6.4 Ionenbeschl. u. Refe- renzstrahlungsfelder

Dr. F. Wissmann
☎ 6400

Fachbereich 7.4 Temperatur

Dr. J. Fischer
☎ (Ch) 7473

Fachbereich 8.4 Mathematische Modellierung und Datenanalyse

Dr. M. Bär
☎ (Ch) 7687

Fachbereich Q.4 Informations- technologie

Dr. S. Hackel
☎ 8400

Referat Z.14 Organisation und Controlling

Dr. J. Jaspers
☎ 9140

Fachbereich 6.5 Neutronenstrahlung

Dr. H. Schuhmacher
☎ 6500

Fachbereich 7.5 Kryo- und Vakuumphysik

Dr. T. Schurig
☎ (Ch) 7290

Fachbereich 8.5 Metrologische Informationstechnik

Prof. Dr. D. Richter
☎ (Ch) 7479

Fachbereich Q.5 Technische Zusammenarbeit

D. Schwohnke
☎ 8200

Referat Z.15 Verwaltung Berlin

A. Lubinus
☎ (Ch) 7449

Fachbereich 6.6 Grundlagen der Dosimetrie

Dr. H. Rabus
☎ 6600

Fachbereich 7.6 Wärme

Dr. T. Lederer
☎ (Ch) 7230

Fachbereich 8.6 Metrologische Informationstechnik

Prof. Dr. D. Richter
☎ (Ch) 7479

Referat Q.61 Technischer Dienst

M. Frühauf
☎ 9170

Referat Z.16 Innerer Dienst

M. List
☎ 9160

Referat 6.71 Betrieblicher Strahlenschutz

Dr. R. Simmer
☎ 6710

Fachbereich IB.T Technisch-wissensch. Infrastruktur Berlin

Dr. F. Melchert
☎ (Ch) 7446

Gesamtpersonalrat

U. Meyer

☎ 1090

Örtlicher Personalrat Braunschweig

W. Krien

☎ 1092

Örtlicher Personalrat Berlin

R. Thomas

☎ (Ch) 7337

Gleichstellungsbeauftragte

B. Behrens

☎ 9133

Gesamtvertretung der Schwerbehinderten

R. Lütge

☎ 1097

Vertretung der Schwerbehinderten Braunschweig

R. Lütge

☎ 1097

Vertretung der Schwerbehinderten Berlin

I. Wichmann

☎ (Ch) 7380

Ausschüsse

Personal	A-PE	Prof. Dr. Löffler	☎ 5500
Investitionen	A-IV	Prof. Dr. Peters	☎ 2000
IT-Infrastruktur	A-IT	Dr. Hackel	☎ 8400
Metrologische Dienstleistungen	A-MD	Prof. Dr. Peters	☎ 2000
Internationale Zusammenarbeit	A-IZ	Dr. Stenger	☎ 3000
Qualitätsmanagement	A-QM	Dr. Odin	☎ 8330
Forschungsprogramme	A-FP	Dr. Stenger	☎ 3000

Zeichenerklärung

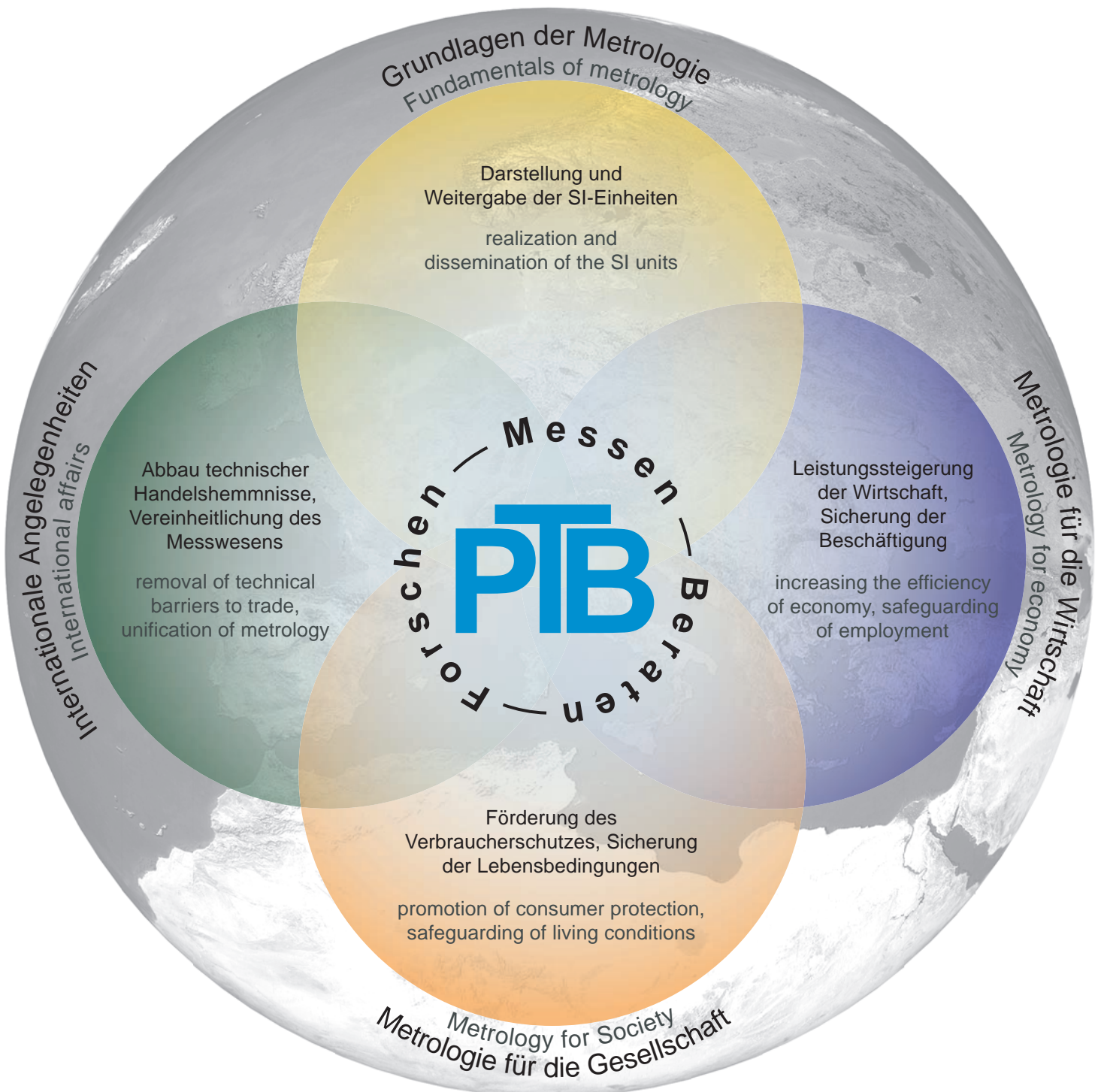
☎(0531) 592-0 Braunschweig/Durchwahl 592 ...

☎(030) 3481-0 Berlin Charlottenburg (Ch)/Durchwahl 3481 ...

☎(030) 3481-0 Berlin Adlershof (Ad)/Durchwahl 6392 ...

*wahrgenommen durch

Arbeitsgebiete und Ziele



Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) – das nationale Metrologie-Institut mit wissenschaftlich-technischen Dienstleistungsaufgaben

Für einen modernen Industriestaat ist eine leistungsfähige Infrastruktur für das Messen, Normen, Prüfen und für die Qualitätssicherung eine Grundvoraussetzung. Nur eine optimierte messtechnische Infrastruktur ermöglicht den richtigen Einsatz der Technik zum Wohle des Menschen, die effektive und umweltschonende Nutzung von Energie und Rohstoffen sowie den Austausch von Gütern, auch über Ländergrenzen hinweg. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig und Berlin, die zum Dienstbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gehört, ist in der Bundesrepublik Deutschland mit dieser Aufgabe betraut.

Der Existenz von Bundesanstalten liegt ein staatlicher Auftrag zugrunde, festgelegt in Gesetzen und Verordnungen. Im Falle der PTB ist dies ein Auftrag von Verfassungsrang, abgeleitet aus der originären Verantwortung des Staates für die Einheitlichkeit des Messwesens sowie für die Sicherheit und den Schutz des Bürgers. Dabei geht es auch um das Vertrauen, das jeder Einzelne, ob als Verbraucher, Behörde oder Firma, in die Zuverlässigkeit und Unparteilichkeit von Messungen haben muss. Der spezifische staatliche Auftrag für die PTB ist es, eine international akzeptierte leistungsfähige messtechnische Infrastruktur für Gesellschaft, Handel und Wirtschaft gleichermaßen bereitzustellen. Forschung und Technologieentwicklung dienen dazu, diesen Auftrag verantwortungsvoll und kompetent auszuführen.

Der Anteil an Forschung und Entwicklung über alle vier Arbeitsgebiete beträgt rund zwei Drittel aller PTB-Aktivitäten.

Grundlagen der Metrologie

Der Bereich „Grundlagen der Metrologie“ umfasst die in der Satzung verankerten Arbeiten zur Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten und der gesetzlichen Zeit. Hierzu gehören insbesondere die Entwicklung und Bereitstellung von Primärnormalen und Normalmesseinrichtungen und der gegebenenfalls für die Weitergabe der Einheiten benötigten Sekundär- und Transfernormale. Mission ist „die Schaffung des Fundaments für das nationale Messwesen, das den heutigen und für die Zukunft absehbaren Anforderungen genügt“.

Eine besondere Herausforderung stellen die Arbeiten zur Rückführung von SI-Einheiten auf Fundamentalkonstanten dar, wie dies für Sekunde, Meter, Volt und Ohm bereits gelungen ist, da man – zumindest nach unserem heutigen Verständnis der Physik – dann von einer von Ort und Zeit unabhängigen Realisierung der jeweiligen Einheit ausgehen kann. Durch den Beschluss des Comité International des Poids et Mesures (CIPM), vorbereitende Maßnahmen zur Neudefinition der Einheiten Ampere, Kelvin, Kilogramm und Mol auf der Basis von Fundamentalkonstanten einzuleiten, haben diese Arbeiten zusätzlich an Aktualität und Bedeutung gewonnen. Aber auch bei der Darstellung von Einheiten auf der Basis klassischer Prinzipien, z. B. für die dimensionelle Messtechnik, steigen die Anforderungen an die tolerierbaren Unsicherheiten stetig, sodass Technologien verbessert bzw. neu entwickelt und genutzt werden müssen. Zunehmende Bedeutung gewinnt die Rückführung von Messungen in der analytischen und speziell klinischen Chemie auf international anerkannte Normale oder Normalmesseinrichtungen, die für ausgewählte organische und anorganische Analyte in der PTB und ihren Kooperationspartnern (BAM, UBA, DGKL) entwickelt bzw. betrieben werden. Von besonderer gesellschaftlicher Bedeutung ist die Entwicklung von Normalen und Normalmesseinrichtungen für die medizinische Diagnostik und Therapiekontrolle, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung, die Ultraschall-Diagnostik oder optische, bioelektrische, biomagnetische und NMR-Diagnoseverfahren.

Ganz offensichtlich ist der Anteil an Forschung und Entwicklung in dem Bereich „Grundlagen der Metrologie“ besonders hoch, weit gespannt und deckt wesentliche Bereiche der modernen



Natur- und Ingenieurwissenschaften ab. Die Ergebnisse bilden nicht nur die Voraussetzung für die Entwicklung und Realisierung genauer Normale, sondern liefern auch – oft in Kooperation mit universitären und außeruniversitären Partnern – wesentliche Erkenntnisse für die Natur- und Ingenieurwissenschaften im Allgemeinen.

Metrologie für die Wirtschaft

Für eine exportorientierte Volkswirtschaft wie die der Bundesrepublik Deutschland ist eine hochentwickelte metrologische Infrastruktur sowie die Verfügbarkeit metrologischen Know-hows auf höchstem Niveau zur Unterstützung der Entwicklung neuer Technologien eine unabdingbare Voraussetzung.

Die PTB hat seit ihrer Gründung im Jahre 1887 zum Nutzen der deutschen Wirtschaft nicht nur die Basiseinheiten durch metrologische Grundlagenforschung dargestellt, sondern durch technische Entwicklungen von Normalen, Normalmessgeräten und erprobten Messverfahren Grundlagen für genaue und zuverlässige Messungen und Prüfungen in Industrie und Handel geschaffen. Die Durchdringung der Produktionsprozesse mit einer Messtechnik, die allen internationalen Ansprüchen gerecht wird, ist eine entscheidende Voraussetzung für zuverlässig funktionierende Qualitätsmanagement-Systeme in der Wirtschaft. Dabei ist es unverzichtbar, alle Messergebnisse auf das SI zurückzuführen.

Die Weitergabe der Einheiten wird durch die Akkreditierungen des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD; ab 1. 1. 2010 Teil der DAkkS) größtenteils auf die Ebene der industriellen Messtechnik verlagert. Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden durch die Akkreditierungsstelle kompetent überwacht und in nationalen und internationalen Gremien vertreten.

Wissenschaft und Wirtschaft enger zu verzahnen ist eine politische Forderung, die von der PTB ernst genommen wird. Bei allen Forschungs- und Entwicklungsergebnissen prüft die PTB daher, ob diese auch als Schutzrechte, Patente bzw. Gebrauchsmuster oder durch Know-how-Verträge für eine Vermarktung durch Innovationen in Anspruch genommen werden können. Eine wichtige Rolle im Know-how-Transfer von der PTB in die deutsche

Wirtschaft übernehmen Seminare und Fachtagungen, die wissenschaftlich-technische Entwicklungen wichtiger Arbeitsgebiete der PTB zum Thema haben. Speziell auf die Bedürfnisse von kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) ist das Mittelstandsforum der PTB ausgerichtet. Es stellt eine Internet-Plattform dar, welche die Dienstleistungsangebote der PTB einschließlich der Patentdatenbank in übersichtlicher Form aufzeigt und insbesondere auch Kunden, die mit der Struktur der PTB nicht vertraut sind, Navigationshilfen anbietet, die zu den richtigen Informationen und Ansprechpartnern führen.

Metrologie für die Gesellschaft

In weiten Bereichen des täglichen Lebens besteht ein besonderes öffentliches Interesse an richtigen Messergebnissen und zuverlässigen Messeinrichtungen. Die Metrologie für die Gesellschaft umfasst daher überwiegend Aufgaben, die gesetzlich geregelt sind. In einer Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen sind der PTB verschiedene Tätigkeiten zugewiesen; in vielen dieser Rechtsvorschriften wird sie als einzige Stelle genannt. Hierin liegt eine besondere Verantwortung. Es ist Aufgabe der PTB, „Messtechnik und -verfahren zum angemessenen Schutz der Verbraucher im geschäftlichen und amtlichen Verkehr, der arbeitenden Bevölkerung im beruflichen Umfeld, zum Erhalt und der Wiederherstellung der Gesundheit, für die persönliche und industrielle Sicherheit sowie zum Schutz der Natur und Umwelt“ zur Verfügung zu stellen und einzusetzen.

Ein Schwerpunkt in diesem Bereich ist die Bauartzulassung bzw. Baumusterprüfung von Messgeräten im Rahmen nationaler oder europäischer Rechtsvorschriften, zum Beispiel auf den Gebieten Energiemesstechnik für elektrische Energie, Gas und Wasser (Wärme, Kälte), Sicherheit im Straßenverkehr (Geschwindigkeitsüberwachung, Atemalkohol), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und Umweltmesstechnik (Absolutmessungen in der Schadstoff- und Spurenanalyse, Lärm-schutz 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 Normalmessenrichtungen, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung oder für medizinische Geräte mit Messfunktion, sowie durch Arbeiten zur Rückführung von analytischen Messungen in der klinischen Chemie auf die SI-Einheiten bzw. Normalmessverfahren.

In Absprache und Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ist die PTB auf den wirtschaftlich und vor allem gesellschaftlich wichtigen Gebieten der physikalischen Sicherheitstechnik und des Explosionsschutzes elektrischer Betriebsmittel tätig. Auf Grund ihrer Kompetenz fällt ihr dabei eine internationale Referenzfunktion zu. Gleiches gilt für die Arbeiten auf dem Gebiet des Strahlenschutzes.

Internationale Angelegenheiten

Mit der Gründung der Meterkonvention im Jahre 1875 wurde auf höchster staatlicher Ebene manifestiert, dass Metrologie eine internationale Angelegenheit ist. Durch die zunehmende Globalisierung von Wirtschaft und Handel hat diese Aufgabe in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Im Geschäftsbereich „Internationale Angelegenheiten“ ist es Aufgabe der PTB, „zur internationalen Einheitlichkeit des Messwesens und damit zum Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse beizutragen“. Hierzu dienen Kooperationen mit anderen nationalen Metrologieinstituten, maßgebliche Mitarbeit in den internationalen Gremien und technisch-ökonomische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern.

Wesentliches Element der Kooperation mit Partnerinstituten sind internationale „Key Comparisons“ von Normalen und Normalmessenrichtungen und sich daraus ableitende F&E-Arbeiten. Im Rahmen der internationalen Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Messergebnissen und Zertifikaten der nationalen Metrologieinstitute und der akkredi-

tierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien kommt diesen Vergleichen besondere Bedeutung zu.

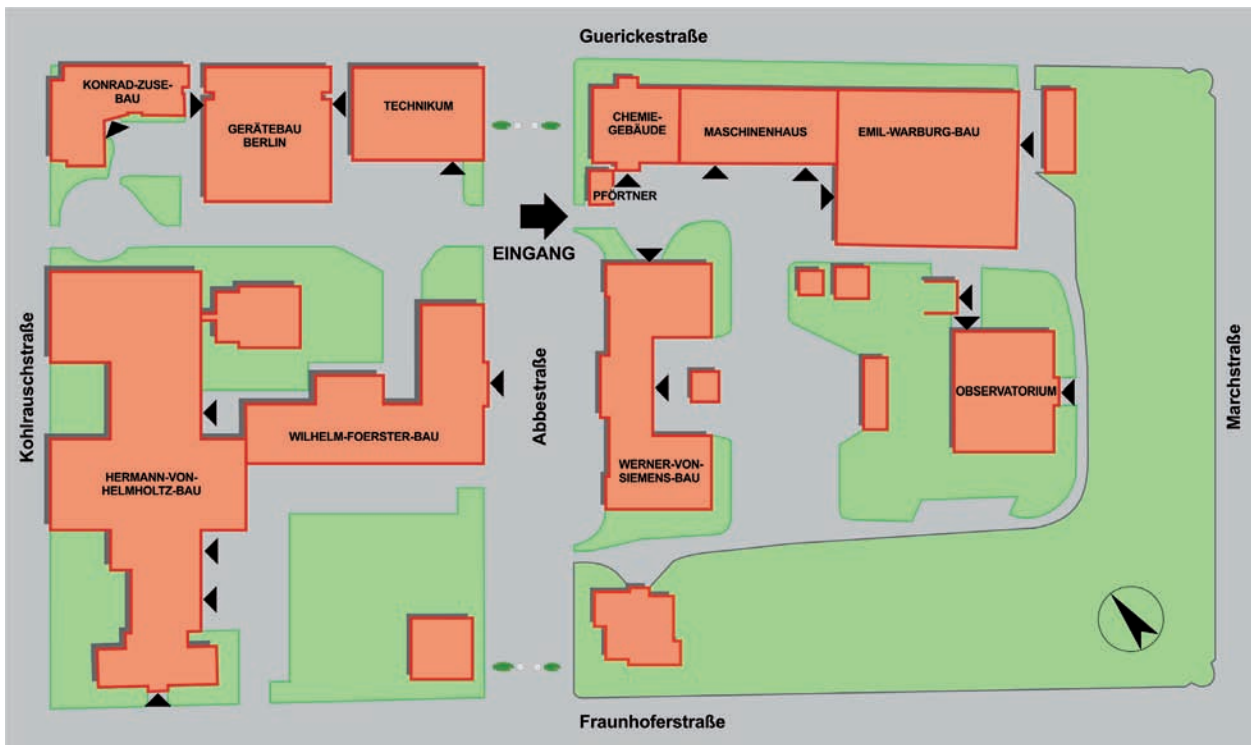
Die Anforderungen an die Metrologie werden in Zukunft sowohl vom Umfang als auch von der Komplexität her stetig wachsen, sodass ein einzelnes Institut nicht sämtlichen Ansprüchen auf Dauer genügen kann. Koordination und Kooperation bei F&E und Dienstleistungen sind daher unumgänglich. Die rechtsfähige europäische Metrologieorganisation EURAMET stellt hier die erforderlichen Strukturen zur Durchführung eines europäischen Metrologieforschungsprogramms zur Verfügung.

Neben ihrem europäischen Engagement arbeitet die PTB ebenfalls maßgeblich in allen internationalen Metrologieorganisationen mit, zu einem erheblichen Teil in leitender Funktion. Außerdem leistet die PTB einen wesentlichen Beitrag zur internationalen Normung durch Mitarbeit in Gremien von ISO, IEC, CEN, CENELEC. Die weltweite Angleichung von Anforderungen und Prüfvorschriften im gesetzlichen Messwesen dient dem Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse und damit der exportorientierten deutschen Messgeräteindustrie. Mit diesen Zielen arbeitet die PTB aktiv in OIML und WELMEC mit.

Einen erheblichen Umfang nimmt die Technische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern ein. Die PTB gibt ihre Erfahrungen weiter und leistet aktive Hilfe beim Aufbau der technischen Infrastruktur für die Metrologie sowie für das Normen-, Prüf- und Qualitätswesen einschließlich der Akkreditierung und der Zertifizierung. Die finanziellen Mittel werden überwiegend vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) sowie weiteren nationalen und internationalen Gebern, wie der EU und der Weltbank, zur Verfügung gestellt.



Geländeplan Berlin-Charlottenburg



Gebäude in Braunschweig

Gebäude (Building):

Abbe-Bau (V)
 Annahme und Versand
 (Delivery and Shipment) (S)
 Bessel-Bau (M)
 Bibliothek (Library) (K)
 Bothe-Bau (S)
 Bereitstellungslager (P)
 Bunsen-Bau (Q)
 Betriebswerkstätten
 (Workshops) (T)
 Chadwick-Bau (G)
 Elster-Geitel-Bau (S)
 Einstein-Bau (C)
 Explosionsprüfstand
 (Explosion test rig) (Q)
 Fahrbereitschaft
 (Driver pool) (R)
 Gauss-Bau (V)
 Gästehaus
 (Guest House) (V)
 Geiger-Bau (S)
 Glocker-Bau (T)
 Giebe-Bau (L)
 Gumlich-Haus (P)
 Hahn-Bau (L)
 Hauptwerkstatt
 (Main Workshop) (S)

Heisenberg-Bau (C)
 Helmholtz-Bau I (K)
 Helmholtz-Bau II (K)
 Hertz-Bau (K)
 Hörsaal (Auditorium) (C)
 Kasino (K)
 Kids & Co-Bau
 (Kita und Wissensforscher) (L)
 Kohlrusch-Bau (C)
 Kopfermann-Bau (U)
 v.-Laue-Bau (V)
 Leibniz-Bau (U)
 Meissner-Bau (K)
 Meitner-Bau Gerätebau (Q)
 Meitner-Bau Laborgebäude (Q)
 Meitner-Bau Galvanik (Q)
 Meitner-Bau Materiallager (Q)
 Schlichting-Bau (R)
 Nernst-Bau (R)
 Ohm-Bau (C)
 Paschen-Bau (L)
 Personalrat (Staff Council) (E)
 Planck-Bau (H)
 Prandtl-Bau (R)
 Röntgen-Bau (S)
 Reinraumzentrum
 (Clean Room Centre) (C)
 Raumzellen-Bau 4 (RZB 4) (Q)
 Raumzellen-Bau 6 (RZB 6) (S)

Schering-Bau (R)
 Sicherheitstechnik
 (Safety Technology) (F)
 Vieweg-Bau (B)
 Weber-Bau (R)
 Werkfeuerwehr (Fire Brigade) (R)
 Wohnhaus Ost
 (Residential Building East) (E)
 Wohnhaus West
 (Residential Building West) (A)
 Wirtschaftsgebäude (K)
 Willy-Wien-Turm (R)
 Zentralgebäude (Central Building)
 (K)

Einrichtungen / Institute auf dem Gelände (External Facilities and Institutions):

Deutsche Akkreditierungsstelle
 (DAkK), Vieweg-Bau (B)
 Etalon AG, Hauptwerkstatt (Main
 Workshop) (S)
 EURAMET e.V., Zentralgebäude
 (Central Building) (K)
 QUEST@PTB, v.-Laue-Bau (V)
 Underwriters Laboratories (UL),
 Raumzellen-Bau 4 (Q)