



# Vorwort

2007 war wieder ein ereignisreiches, aufregendes und – soweit es sich jetzt absehen lässt – erfolgreiches Jahr: In einem „Kraftakt“ unter dem Pseudonym „PTB 2016“ haben wir uns zu Beginn des Jahres im Rahmen einer offen geführten Aufgabenkritik trotz der andauernden gesetzlichen Stelleinsparung Handlungsspielraum und Flexibilität geschaffen, um strategisch gewünschte Schwerpunkte setzen zu können. Die koordinierte europäische Forschung in der Metrologie wurde durch die Erarbeitung und Verabschiedung des Europäischen Metrologie-Forschungsprogramms wesentlich vorangebracht und mit der Gründung von EURAMET e. V. wurde der rechtliche Rahmen geschaffen, Fördermittel der Europäischen Kommission für exzellent bewertete Forschungsprojekte eigenverantwortlich zu verwenden. Schließlich wurde Ende des Jahres eine erste Förderperiode mit 21 gemeinsamen Forschungsprojekten im Rahmen der ERA-NET Plus-Förderung mit einem Umfang von 65 Mio. Euro genehmigt, mit einem Förderanteil der EU von 21 Mio. Euro. Die PTB war bei der Antragstellung sehr erfolgreich und hat mit einem Gesamtanteil von ca. 37 % an den Fördermitteln hervorragend abgeschnitten.

Ja, und dann wurden wir mal wieder evaluiert. Diesmal durch eine Kommission des Wissenschaftsrats im Rahmen der Evaluation der gesamten Ressortforschung. Obwohl die endgültige Bewertung noch nicht vorliegt, möchte ich auch an dieser Stelle die Gelegenheit nutzen, mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihren engagierten Einsatz zu bedanken.

Auch was die internen Abläufe betrifft, haben wir einige Änderungen – Verbesserungen, so

hoffen wir – umgesetzt. Am sichtbarsten ist vielleicht die verstärkte Programmorientierung bei den Planungsprozessen einschließlich der Mittelzuweisungen.

Und natürlich war da „Braunschweig – Stadt der Wissenschaft 2007“ mit ihrer „Ideenküche“, in der die PTB ganz wesentlich mitgekocht hat.

Es spricht für das große Engagement der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, dass trotz dieser zusätzlichen Belastungen dennoch Raum blieb für – wie ich meine – ausgezeichnete fachliche Arbeit, über die der vorliegende Bericht auszugsweise Auskunft gibt. Exemplarischer Beleg dafür mögen sein die neuerliche Vergabe des Technologietransferpreises der IHK Braunschweig an die PTB – diesmal an die Forschergruppe von Frau Dr. Luszik-Bhadra – sowie die Beteiligung der PTB an zwei bewilligten Exzellenz-Clustern im Rahmen der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder. Darüber hinaus wurde gemeinsam mit der TU Braunschweig und mit Förderung des Landes Niedersachsen die „Braunschweig International Graduate School of Metrology“ gegründet, die inzwischen ihre Arbeit aufgenommen hat.

Die PTB ist – davon bin ich überzeugt – gut gerüstet für weiterhin erstklassige wissenschaftliche Arbeiten, technologische Entwicklungen und zuverlässige Dienstleistungen in den kommenden Jahren. Darauf freuen wir uns.

Ernst O. Göbel



# Foreword

2007 was another eventful, exciting and – as far as we can now foresee – successful year. In a „show of strength“ under the pseudonym „PTB 2016“ we gained – in the frame of a publicly held task appraisal at the beginning of the year and despite the continuing compulsory state job cuts – room to be able to define our strategically desired focal points. The coordinated European research in the field of metrology was intrinsically brought forward by the drafting and adoption of the European Metrological Research Programme, and with the foundation of the association EURAMET e. V., the legal structure was created to independently use European Commission funding for excellently evaluated research projects. Finally at the end of the year, a first funding period with 21 joint research projects – amounting to 65 million Euro – was approved in the framework of the ERA-NET Plus scheme, with the EU’s share of the funding at 21 million Euro. The PTB was very successful in applying for funds and did outstandingly with a total share of approx. 37 % of the funds.

And then we were evaluated once again. This time by a Commission from the Wissenschaftsrat (German Science Council) as part of the evaluation of all departmental research. Although the final evaluation is not yet available, I would like also, at this point, to take the opportunity to thank all our staff for their dedicated commitment.

We also implemented some changes – hopefully some improvements – regarding internal processes. The most visible is, perhaps, the increased programme orientation of our planning processes, including the allocation of funds.

And of course there was “Braunschweig – City of Science 2007” with its “Kitchen of Ideas”, in which the PTB, significantly, did some of the cooking.

That there was, despite this additional work load, still space for – in my opinion – excellent expert work (some extracts of which are detailed in this report) speaks for the huge commitment of our staff. Exemplary evidence of this might be the CCI Braunschweig’s recently awarded Technology Transfer Prize which went to the PTB again – this time to Dr. Luszik-Bhadra’s Research Group – as well as the PTB’s participation in two approved Clusters of Excellence in the framework of the Excellence Initiative of the Federal Republic of Germany and the German Federal States. Furthermore, the “Braunschweig International Graduate School of Metrology” was jointly founded with the Technical University Braunschweig and the support of the Federal State of Lower Saxony; it has since commenced with its work.

The PTB is – I am convinced – well equipped for further first-class scientific work, technological developments and reliable services in the coming years.

We are looking forward to all that.

Ernst O. Göbel

Der gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2007. Den kompletten Jahresbericht mit Nachrichten und speziellen Listen finden Sie auf den Internetseiten der PTB (unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de) im Bereich „Publikationen“).

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

### **Jahresbericht im Internet**

- Vorwort
- Nachrichten des Jahres
- Aus den Abteilungen
  - Abteilungsleiterberichte
  - Nachrichten
  - Tätigkeitsbereiche
  - Forschungsvorhaben
  - Kooperationen
- Kuratorium
- Organigramm (Stand: Dezember 2007)
- 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 6

Theoretische Physik • Theoretical Physics 19

Kuratorium • Board of Consultants 22

Präsidium • Presidential Board 24

Qualitätsmanagement • Quality Management 32

Gesetzliches Messwesen • Legal Metrology 34

Justitiariat • Legal Matters 36

Technische Zusammenarbeit • Technical Cooperation 37

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit • Press and Information Office 40

Zahlen und Fakten • Figures and facts 44

Berichte der Abteilungen

Mechanik und Akustik 55

Elektrizität 71

Chemische Physik und Explosionsschutz 81

Optik 93

Fertigungsmesstechnik 107

Ionisierende Strahlung 119

Temperatur und Synchrotronstrahlung 135

Medizinphysik und metrologische Informationstechnik 155

Der Deutsche Kalibrierdienst 170

Anhang

Kuratorium 173

Organigramm 174

Arbeitsgebiete 176

Geländepläne 180

# Nachrichten des Jahres • News of the Year

## Bestimmung der atomaren Masseneinheit durch Ionenakkumulation

Ziel des Experimentes Ionenakkumulation ist es, die atomare Masseneinheit (etwa  $1,6605 \cdot 10^{-27}$  kg), die bisher aus anderen Fundamentalkonstanten berechnet wird, zum ersten Mal experimentell zu bestimmen. Dazu wird ein Wismut-Ionenstrahl erzeugt und in einem Kollektor akkumuliert. Ein Dipolmagnet separiert die einfach geladenen Wismutionen von Ionen mit einem anderen Masse-Ladungs-Verhältnis.

Durch Integration des Ionenstroms über die Zeit und durch Wägung ergibt sich dann für die Summe aller akkumulierten Ionen das Verhältnis der Masse zur Ladung. Durch Gleichsetzen mit dem entsprechenden Masse-Ladungs-Verhältnis für das einzelne Ion ergibt sich daraus die Masse der atomaren Masseneinheit.

Bei den Akkumulationsversuchen wurden schließlich 108 mg Wismut akkumuliert und die atomare Masseneinheit mit einer relativen Standardunsicherheit von  $2,8 \cdot 10^{-4}$  ermittelt. Die relative Abweichung vom Literaturwert beträgt  $4,2 \cdot 10^{-4}$ . Die größten Unsicherheitsanteile sind die der Zerstäubungsverluste ( $1,940 \text{ mg} \pm 0,022 \text{ mg}$ ) und die der akkumulierten Masse ( $107,920 \text{ mg} \pm 0,021 \text{ mg}$ ). Die relative Unsicherheit des im Jahre 2002 veröffentlichten Ergebnisses konnte so um mehr als das 50-fache verbessert werden.

Die erreichte Unsicherheit liegt aber noch um einige Größenordnungen über dem gewünschten Wert für die in den kommenden Jahren vorgesehene Neudefinition des Kilogram. Aus diesem Grunde und wegen notwendiger Personaleinsparungen soll die Arbeit an diesem Experiment bis auf Weiteres eingestellt werden.

Ionenstrahlapparatur

## Determination of the atomic mass unit by ion accumulation

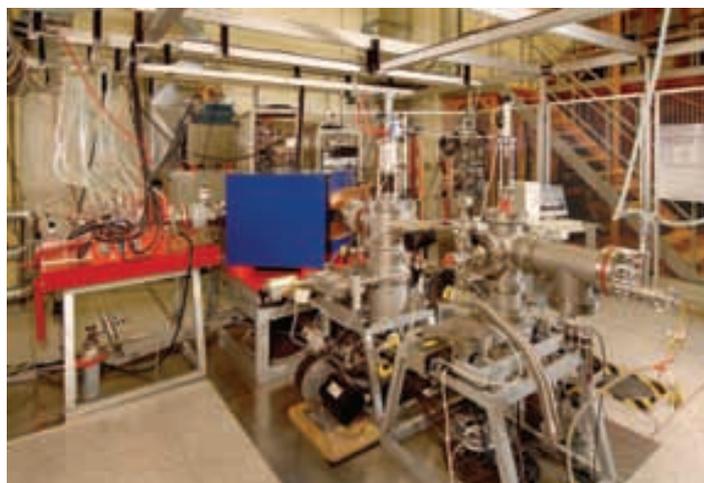
It is the aim of the "Ion Accumulation" experiment to determine the atomic mass unit (approx.  $1.6605 \cdot 10^{-27}$  kg), which has so far been calculated from other fundamental constants, for the first time by experiment. For this purpose, a bismuth ion beam is generated and accumulated in a collector. A dipole magnet separates the single-charged bismuth ions from ions having a different mass-to-charge ratio.

By integrating the ion current over the time and by weighing, the mass-to-charge ratio then results for the sum of all accumulated ions. Equating with the respective mass-to-charge ratio for the single ion then furnishes the atomic mass unit.

In the accumulation tests, 108 mg of bismuth were finally accumulated and the atomic mass unit was determined with a relative standard uncertainty of  $2.8 \cdot 10^{-4}$ . The relative deviation from the value stated in literature amounts to  $4.2 \cdot 10^{-4}$ . The largest uncertainty components are those of the losses due to sputtering effects ( $1.940 \text{ mg} \pm 0.022 \text{ mg}$ ) and of the accumulated mass ( $107.920 \text{ mg} \pm 0.021 \text{ mg}$ ). The relative uncertainty of the result published in 2002 could thus be improved upon by more than a factor of 50.

However, the achieved uncertainty still lies by some orders of magnitude above the value desired for the redefinition of the kilogram planned for the coming years. For this reason and because of required staff cuts, work on this experiment will be suspended until further notice.

Ion beam equipment



## Einzelelektronenpumpe mit nur einer Modulationsspannung

Dank moderner lithographischer Methoden lassen sich halbleitende oder metallische Strukturen realisieren, in denen einzelne Elektronen transportiert werden können. Das Pumpen einzelner Elektronen wird in der PTB im Hinblick auf ein zukünftiges Quantenstromnormal untersucht, das die Stromstärke auf die Elementarladung und die Frequenz zurückführt. Ein solches Quantenstromnormal muss nicht nur eine geringe Unsicherheit aufweisen, es muss auch Stromstärken im Nanoamperebereich oder darüber liefern, um praktische Relevanz zu haben.

Im Fachbereich „Halbleiterphysik und Magnetismus“ wurde eine Quantenschaltung auf der Basis einer niedrigdimensionalen Halbleiterstruktur entwickelt, in der einzelne Elektronen mit nur einer Modulationsspannung von der Source-Elektrode zur Drain-Elektrode gepumpt werden können. Dabei wird ein neuer nicht-adiabatischer Pumpmechanismus ausgenutzt. Theoretische Betrachtungen sagen voraus, dass mit diesem Konzept metrologisch relevante Unsicherheiten erzielt werden können. Da nur eine Modulationsspannung zum Betrieb der Einzelelektronenpumpe erforderlich ist, wird die Beschaltung der Pumpe erheblich vereinfacht. Dies soll in Zukunft ausgenutzt werden, um mehrere Pumpen in einer komplexeren Quantenschaltung parallel zu betreiben und dadurch die Stromstärke weiter zu erhöhen.

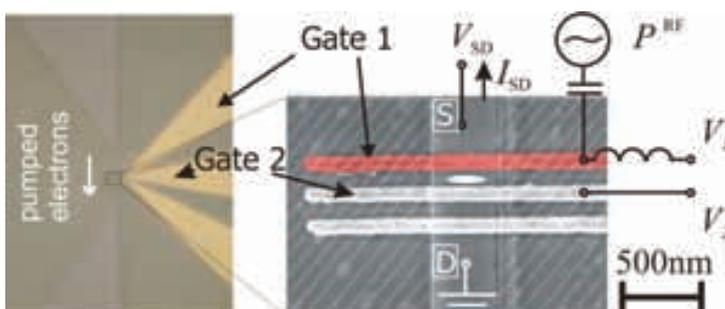
## Single-electron pump with only one modulation voltage

Thanks to modern lithographic methods, semi-conducting or metallic structures can be realized in which single electrons can be transported. At PTB, pumping of single electrons is investigated in view of a future quantum current standard which traces the current back to the elementary charge and the frequency. To be of practical relevance, such a quantum current standard must not only have a small uncertainty, but it must also furnish currents in the nanoampere range or above.

In the “Semiconductor Physics and Magnetism” Department, a quantum circuit was developed on the basis of a low-dimensional semiconductor structure, in which single electrons can be pumped from the source electrode to the drain electrode with only one modulation voltage. For this purpose, a new non-adiabatic pump mechanism is used. Theoretical results predict that this concept will allow metrologically relevant uncertainties to be achieved. As only one modulation voltage is required to operate the single electron pump, the connection of the pump is considerably simplified. In future, this advantage shall be made use of to operate several pumps in parallel in a more complex quantum circuit and to further increase the current.

Quantum circuit for the pumping of single electrons with only one modulation voltage. The scanning electron microscopy image on the right shows, between the hatched areas, a one-dimensional semiconductor channel in which a quantum dot is generated by means of metallic electrodes. A modulation voltage is applied only to the red-coloured electrode. The lowest electrode is not used.

Quantenschaltung zum Pumpen einzelner Elektronen mit nur einer Modulationsspannung. In der Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahme rechts erkennt man zwischen den schraffierten Bereichen einen eindimensionalen Halbleiterkanal, in dem mittels metallischer Elektroden ein Quantenpunkt erzeugt wird. Nur an die rot eingefärbte Elektrode wird eine Modulationsspannung angelegt. Die unterste Elektrode wird nicht benutzt.



### Zündung von Wasserstoff/Luft-Gemischen durch elektrische Entladungen bei hochfrequenter Wechselspannung

Elektrische Entladungen können brennbare Gas/Luft-Gemische entzünden und müssen daher beim Explosionsschutz elektrischer Geräte berücksichtigt werden. Diesbezüglich wurde an der Spitze-Platte-Anordnung (stark inhomogenes Feld) durch eine Wechselspannung ( $f = 630 \text{ kHz}$ ) die Zündfähigkeit eines Wasserstoff/Luft-Gemisches durch Vorentladungen untersucht, indem die Anzahl der Schwingungen und damit die Pulsdauer variiert wurde.

Das Akkumulieren von Entladungen bei hochfrequenter Wechselspannung ist durch die mangelnde Beweglichkeit der Ionen zu erklären, die während einer Halbschwingung des elektrischen Feldes nicht die Elektrode erreichen können und somit im elektrischen Feld verbleiben. Der Energieinhalt wird im Wesentlichen durch die Anzahl der Ionisationen bestimmt. Mit Erhöhung des Wasserstoffgehalts in Luft nimmt die zur Zündung notwendige Anzahl an Schwingungen und damit die notwendige Pulsdauer zu.

Beim Vergleich mit der Zündgrenzkurve wird deutlich, dass die Energie der Vorentladungen bei hochfrequenter Wechselspannung in Abhängigkeit von der Anzahl an Schwingungen akkumuliert. Die Ladungsmenge vergrößert sich dabei überproportional durch Erhöhung der Feldstärke und proportional durch Erhöhung der Anzahl der Schwingungen.

Hinsichtlich der Dimensionierung der Luft- und Kriechstrecken für explosionsgeschützte elektrische Geräte dürfen die in dieser Veröffentlichung untersuchten Effekte nicht vernachlässigt werden. Eine Übertragung auf andere brennbare Gase soll weitere Aufschlüsse über die relevanten chemischen und physikalischen Prozesse aufzeigen.

Abhängigkeit der zur Zündung notwendigen Anzahl von Schwingungen vom Volumenanteil Wasserstoff

### Ignition of hydrogen/air mixtures by electric discharges at high-frequency a.c. voltage

Electric discharges can ignite flammable gas/air mixtures and must, therefore, be taken into account for the explosion protection of electrical equipment. In this regard, the ignition capability of a hydrogen/air mixture was investigated at the tip-plate arrangement (strongly inhomogeneous field) by an a.c. voltage ( $f = 630 \text{ kHz}$ ) by pre-discharges. For this purpose, the number of oscillations and thus the pulse duration was varied.

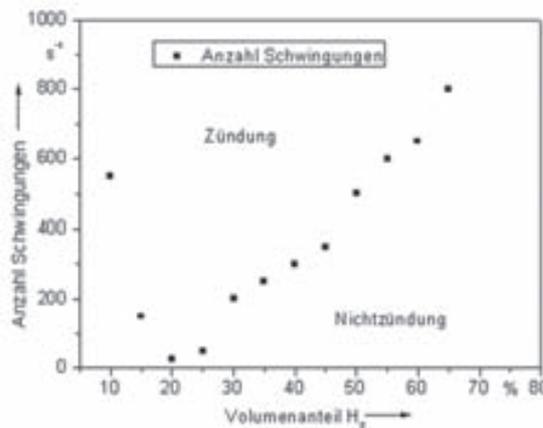
The accumulation of discharges at high-frequency a.c. voltage can be explained by the lacking mobility of the ions which cannot reach the electrode during a half cycle of the electric field and thus remain in the electric field. The energy content is mainly determined by the number of ionizations. With the increase in the hydrogen content in air, the number of oscillations required for ignition – and thus the required pulse duration – increases.

A comparison with the ignition limiting curve shows that in the case of high-frequency a.c. voltage, the energy of the pre-discharges accumulates as a function of the number of oscillations. In this process, the charging quantity increases disproportionately by an increase in the field strength and proportionally by the increase in the number of oscillations.

For the dimensioning of the creepage distances and clearances for explosion-protected electrical equipment, the effects investigated in this publication must not be neglected. A

transfer to other flammable gases is to provide additional information on the relevant chemical and physical processes.

Dependence of the number of oscillations required for ignition on the volume fraction of hydrogen.



## Hermann-von-Helmholtz Symposium „Was ist Masse?“

Die PTB lud am 19. Juni 2007 zu ihrem 9. Hermann-von-Helmholtz-Symposium in die Stadthalle Braunschweig ein. Mit diesen Symposien greift die PTB, die damit zugleich an ihren ersten Präsidenten erinnert, jeweils ein aktuelles besonderes Thema der physikalischen Grundlagenforschung auf, das in besonders engem Zusammenhang zu aktuellen Fragen der Metrologie steht oder für diese zukunftsweisende Bedeutung erlangen kann. Angesichts der bevorstehenden Ablösung des seit 1889 geltenden Urkilogramms als Prototyp der SI-Einheit wurde in diesem Jahr die Bedeutung der physikalischen Größe „Masse“ unter theoretischen und experimentellen Gesichtspunkten hinterfragt. Über 400 Besucher folgten der Einladung der PTB und erlebten eine gut besuchte und überaus lebhaftere Veranstaltung mit den Schwerpunkten: Herkunft und gegenwärtiges Verständnis des Massebegriffs, das Phänomen dunkler Masse und Energie, experimentelle Gewissheit über die Äquivalenz von träger und schwerer Masse sowie Tendenzen der Neudefinition der SI-Einheit Masse (mit Bezug auf Naturkonstanten). Im Zentrum eines Abendvortrags stand die Physik kosmischer Gravitationswellen.

Das Symposium gab in einer sehr lebhaften Atmosphäre einen umfassenden Überblick über den Begriff „Masse“, sowohl aus theoretischer als auch aus experimenteller Sicht – ein gelungener Versuch, auch Probleme der aktuellen metrologischen Grundlagenforschung einem breiteren Publikum nahe zu bringen.

Das Helmholtz-Symposium „Was ist Masse?“ fand am 19. Juni 2007 in der Stadthalle Braunschweig statt.

The Helmholtz Symposium “What is mass?” took place on 19<sup>th</sup> June 2007 in the Braunschweig Stadthalle.

## Hermann von Helmholtz Symposium „What is mass?“

On 19<sup>th</sup> June 2007 the PTB invited guests to its 9<sup>th</sup> Hermann von Helmholtz Symposium in the Braunschweig Stadthalle. With each symposium, the PTB (which, with these symposia, commemorates at the same time its first president) takes up a special topical subject in the field of basic research in physics, which is particularly closely linked to a current metrological issue or might achieve trend-setting significance. In light of the coming replacement of the primary kilogram which has been in effect as the SI unit prototype since 1889, the significance of the physical quantity “mass” was scrutinised from theoretical and experimental view points. Over 400 people took up the PTB’s invitation and experienced a well-visited, extremely lively event, focussing on: the origin and present understanding of the term mass, the phenomenon of dark matter and energy, experimental certainty about the equivalence of inertial and gravitational mass as well as trends in the re-definition of the SI unit mass (with reference to fundamental constants). The physics of cosmic gravitational waves was the central point of an evening lecture.

The symposium gave a comprehensive overview of the term “mass” in a very lively atmosphere from both theoretical and experimental view points – a successful attempt at bringing also problems of current basic metrological research to a wider audience.



## Messung der Frequenz einer optischen Atomuhr und deren Übertragung per Glasfaser

In einer Zusammenarbeit mit dem LNE-SYRTE in Paris wurde der transportable Frequenzkamm der PTB benutzt, um die Frequenz des Uhrenübergangs von spinpolarisierten  $^{87}\text{Sr}$ -Atomen in einer optischen Atomuhr zu  $\nu = 429\,228\,004\,229\,873,6$  (1,1) Hz zu messen, was mit dem kürzlich am JILA gemessenen Wert im Rahmen der Messunsicherheit übereinstimmt. Die erreichte relative Unsicherheit von  $2,6 \cdot 10^{-15}$  wird gegenwärtig durch die optische Atomuhr begrenzt.

Die Frequenz eines zweiten Lasers bei einer Wellenlänge von  $1,55\ \mu\text{m}$  wurde an die Frequenz dieser optischen Atomuhr angeschlossen. Die Übertragung der Frequenz im Telekommunikationsband gelang über eine Glasfaserstrecke von 86 km Länge, die zwei Forschungsinstitute in Paris unterirdisch miteinander verbindet. Mechanische, thermische und akustische Einflüsse, die auf die Faser wirken, wurden durch eine Regelung unterdrückt. Die verbleibenden Frequenzfluktuationen erlauben bei einer Übertragung über eine Strecke von 86 km bei einer Mittelungszeit von wenigen Stunden eine relative Unsicherheit von etwa  $3 \cdot 10^{-18}$ ; über eine mit Faserspulen verlängerte Strecke von 211 km werden etwa  $10^{-17}$  erreicht.

Die durchgeführten Untersuchungen eröffnen die Möglichkeit, genaueste Referenzfrequenzen, wie sie bisher nur in den nationalen Metrologieinstituten (NMIs) verfügbar sind, prinzipiell ohne Genauigkeitsverlust auch an entfernte Nutzer in Forschungslaboratorien oder Universitäten weiterzugeben.

Frequenzfluktuationen bei der Übertragung einer optischen Frequenz über eine Faserstrecke von 86 km innerhalb des Pariser Faser-netzwerkes.

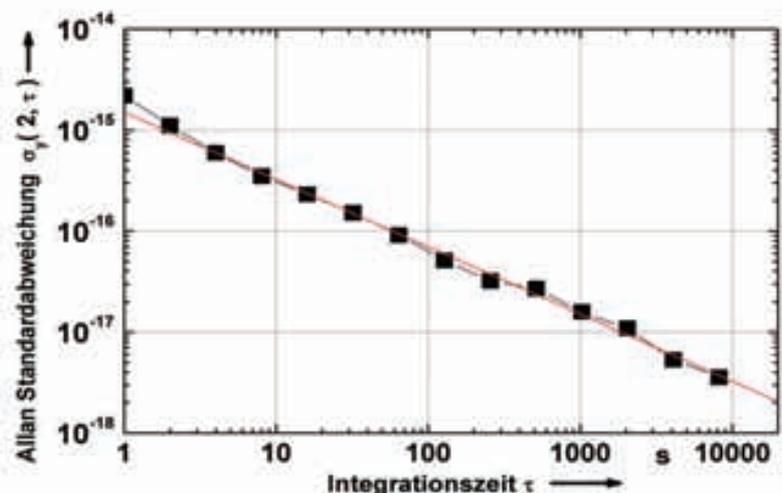
Frequency fluctuations during the transmission of an optical frequency over a fibre section of 86 km within the Paris fibre network.

## Measurement of the frequency on an optical atomic clock and its transmission by an optical fibre

In a cooperation with LNE-SYRTE in Paris, the transportable optical comb of PTB was used to measure the frequency of the clock transition of spin-polarised  $^{87}\text{Sr}$  atoms in an optical atomic clock as  $\nu = 429\,228\,004\,229\,873.6$  (1.1) Hz, which is in agreement with the value recently measured at the JILA within the scope of the measurement uncertainty. The achieved relative uncertainty of  $2.6 \cdot 10^{-15}$  is at present limited by the optical atomic clock.

The frequency of a second laser at a wavelength of  $1.55\ \mu\text{m}$  was linked up with the frequency of this optical atomic clock. The transmission of the frequency in the telecommunication band was achieved via an optical fibre section 86 km in length which connects two research institutes in Paris under ground. Mechanical, thermal and acoustic influences acting on the fibre were suppressed by a control unit. For an averaging period of a few hours, the remaining frequency fluctuations allow a relative uncertainty of approx.  $3 \cdot 10^{-18}$  to be achieved over a distance of 86 km, and a relative uncertainty of approx.  $10^{-17}$  over a distance of 211 km (extended with fibre coils).

The experiments open up the possibility of disseminating very precise reference frequencies – as they have so far been available only in national institutes – also to distant users in research laboratories or universities without any loss of accuracy.



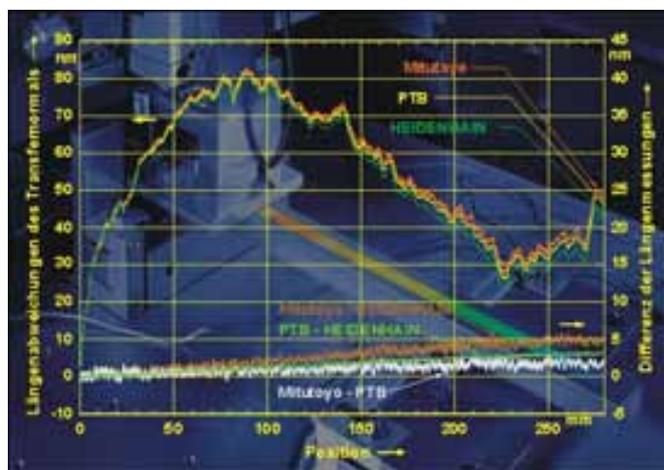
## Hochgenaue Längenmesstechnik für Präzisionsfertigung

Interferometrische Längenmessungen in Luft genügen für die in verschiedenen Bereichen industrieller Produktion geforderten Genauigkeiten oft nicht mehr. Bei dem in Kooperation mit der Dr. Johannes Heidenhain GmbH entwickelten Nanometerkomparator wird daher die interferometrische Längenmessung komplett unter Vakuumbedingungen realisiert. Ähnliche unter Vakuumbedingungen betriebene Längenkomparatoren für größere Messlängen sind zurzeit an keinem anderen Metrologieinstitut vorhanden. Allerdings verfügen die Firma Heidenhain selbst sowie die Mitutoyo Corporation in Japan ebenfalls über Vakuum-Längenkomparatoren.

In einem kürzlich abgeschlossenen Vergleich der 3 Vakuum-Längenkomparatoren an einem als TransfERNormal verwendeten inkrementalen Längenmesssystem wurde über eine Strecke von insgesamt 280 mm eine Übereinstimmung der Längenmessergebnisse von 5,5 nm erreicht. Das entspricht einer relativen Übereinstimmung von besser als  $2 \cdot 10^{-8}$ . Diese ist um mindestens einen Faktor 5 besser als bei vorhergehenden Längenmaßvergleichen, bei denen die Interferometer in Luft betrieben wurden.

Das Ergebnis dokumentiert die Leistungsfähigkeit der beteiligten Vakuum-Längenkomparatoren. Die künftig noch steigenden Anforderungen an die Präzision industrieller Längen- und Koordinatenmessungen, etwa bei der bevorstehenden Einführung von Doppelbelichtungsverfahren in der 193-nm-Lithographie, legen eine zielgerichtete Weiterentwicklung des Nanometerkomparators nahe. Mit den entsprechenden Arbeiten wurde bereits begonnen.

Messergebnisse der 3 Vakuum-Interferenzkomparatoren an dem als TransfERNormal eingesetzten inkrementalen Längenmesssystem LIP 382 (Hintergrund: TransfERNormal auf Nanometerkomparator).



## High-precision length measuring technique for precision manufacturing

Interferometric length measurements in air are often no longer sufficiently accurate to meet the requirements which are placed today in various areas of industrial manufacturing. The nanometer comparator which was developed in cooperation with the Dr. Johannes Heidenhain GmbH therefore performs interferometric length measurements completely under vacuum conditions. Similar length comparators which are suitable for larger measuring lengths and are operated under vacuum conditions are presently not available at any other metrology institute. However, the Heidenhain company itself, as well as the Mitutoyo Corporation in Japan also have vacuum length comparators.

In a comparison which has recently been completed, the 3 vacuum length comparators, tested on an incremental length-measuring system used as a transfer standard, achieved an agreement of the length measurement results of 5.5 nm over a distance of 280 mm in total. This corresponds to a relative agreement of better than  $2 \cdot 10^{-8}$ . This is an improvement of the previous length measurement comparisons – in which the interferometers were used in air – by a factor 5 at least.

The result proves the performance of the involved vacuum length comparators. The requirements on the precision of industrial length and coordinate measurements, which will be increasing in the future, for example with the forthcoming introduction of double-exposure procedures in 193-nm lithography, suggest a targeted further development of the nanometer comparator. Research has already started in this field.

Measurement results of the 3 vacuum interference comparators on the incremental length-measuring system, LIP 382, used as a transfer standard (in the background: transfer standard on nanometer comparator).

## Strahlbetrieb im Glocker-Bau

Der Glocker-Bau, der die neue Elektronenbeschleuniger-Anlage der PTB beheimatet, wurde am 10. September 2007 termingerecht bezugsfertig. Nur 14 Tage später konnten dort erstmals Elektronen auf eine Energie von 15 MeV beschleunigt werden. Die Dosisleistung der erzeugten Photonenstrahlung erreichte den Sollwert 5 Gy/min.

Die nach vollständiger Fertigstellung weltweit einzigartige Anlage erhält drei Beschleuniger: zwei medizinische Elektronenbeschleuniger und einen 11 m langen Linearbeschleuniger für die dosimetrische Grundlagenforschung. Insgesamt kann die Anlage Photonen- und Elektronenstrahlung im Energiebereich von 0,5 MeV bis 50 MeV erzeugen. Damit werden für unterschiedlichste Strahlungsqualitäten und Bestrahlungsbedingungen Referenzfelder zur Darstellung der Einheit Gray für die Messgröße Wasser-Energiedosis bereitgestellt.

Hauptanwendungsgebiet ist die Dosimetrie für die Strahlentherapie. Deren Bedeutung wird nicht zuletzt aus der Tatsache ersichtlich, dass es allein in Deutschland jährlich 10 Millionen Bestrahlungsvorgänge gibt und die korrekte Dosierung mit ausschlaggebend für den Therapieerfolg ist. Mit Hilfe der neuen Anlage prüft, verbessert und entwickelt die PTB Dosimeter und Dosismessverfahren, arbeitet an nationalen und internationalen Normen und Forschungsprogrammen mit und liefert somit wesentliche Grundlagen für die Qualitätssicherung der klinischen Dosimetrie.

Der erste Elektronenstrahl in der neuen Anlage: Eine glühende Elektronenquelle schießt den Strahl mit einer Energie von 52 keV in die Beschleunigungsstrecke. Hier werden die Elektronen auf die Energie von 15 MeV beschleunigt.



The first electron beam in the new facility: a glowing electron source shoots the beam with 52 keV into the acceleration track. Here the electrons are accelerated to the final energy of 15 MeV.

## Beam operation in the Glocker Building

On 10<sup>th</sup> September 2007, the Glocker Building which houses the new electron accelerator facility of the PTB, was ready for occupancy right on schedule. Only 14 days later it was possible to accelerate electrons for the first time to a final energy of 15 million electron volts (MeV). The dose rate of the produced photon radiation achieved the nominal value of 5 grays per minute (Gy/min).

The facility – which will be unique worldwide when it is completed – will receive three accelerators: two medical electron accelerators and an 11 m long linear accelerator for basic dosimetric research. Altogether, the facility can produce photon and electron radiation in the energy range from 0.5 MeV to 50 MeV. This enables standards of the unit Gray to be made available for the water-absorbed dose measurand for the most varied radiation qualities and radiation conditions.

The main field of application is dosimetry for radiation therapy. The importance becomes apparent not least from the fact that in Germany alone there are 10 million radiation procedures carried out annually, and the correct dose is one of the crucial factors for the success of the therapy. With the help of the new facility, the PTB will test, improve and develop dosimeters and dosimetric processes, work on national and international standards and research programmes and thereby provide an essential basis for quality assurance in clinical dosimetry.

## Technologietransferpreis für PTB-Wissenschaftler

Im Strahlenschutz gilt die Devise: So wenig Strahlung wie irgend möglich! Wer dies jedoch umsetzen will, muss zunächst wissen, wie groß die aktuelle Strahlenbelastung tatsächlich ist. Ein neuartiges Messgerät, das gleich mehrere Strahlungsarten auf einmal registrieren kann, kommt hier gerade recht. Die Physikerin Marlies Luszik-Bhadra aus der PTB hat gemeinsam mit einem Industriepartner ein Messgerät entwickelt, das gleichzeitig Neutronen- und Photonenstrahlung messen kann. Dieses Personendosimeter ist ein handliches Gerät, welches über eine Direktanzeige und eine Alarmfunktion verfügt. Durch eine Erfindung, deren wesentliche Prinzipien patentiert sind, konnte das Dosimeter besonders leicht und kompakt aufgebaut werden. Für den Technologietransfer an die Firmengruppe Synodys erhielten Marlies Luszik-Bhadra und ihre Mitarbeiter Wilfried Wendt und Mathias Weierganz den diesjährigen Technologietransferpreis der Industrie- und Handelskammer Braunschweig.

Das neue Personendosimeter ist in der Lage, sowohl Photonenstrahlung als auch Neutronenstrahlung in einem handlichen und zudem sehr leichten Gerät zu messen. Es ist das derzeit kleinste Dosimeter für gemischte Neutronen/Photonen-Strahlungsfelder. Verglichen mit einer üblichen Laborelektronik ist der Aufbau um einen Faktor 1000 kleiner. Die innovative Idee steckt dabei im inneren Aufbau des Detektors. Während bisher stets mehrere Halbleiterdetektoren für den Aufbau eines Neutronendosimeters verwendet wurden, kommt das neue Dosimeter mit einem einzigen Detektor, umgeben von mehreren dünnen Absorberschichten, aus. Damit stehen dem Dosimeter die unterschiedlichsten Einsatzgebiete offen: von der Medizin über die Kerntechnik bis hin zu Weltraumeinsätzen.

Die Preisträger des diesjährigen Technologietransferpreises der IHK Braunschweig (v.l.n.r.): Mathias Weierganz, Dr. Marlies Luszik-Bhadra, Wilfried Wendt und der Präsident der IHK: Dr. Wolf-Michael Schmid.

The prize recipients of this year's Technology Transfer Prize of the Braunschweig CCI (from left to right): Mathias Weierganz, Dr. Marlies Luszik-Bhadra, Wilfried Wendt and the President of the CCI, Dr. Wolf-Michael Schmid.

## Technology Transfer Prize for PTB scientists

In radiation protection, the motto is: as little radiation as at all possible! Whoever wants to convert this to action, however, must first know how high the current radiation exposure actually is. A new type of measuring device which can even register several types of radiation simultaneously, comes at the right time here. The physicist Marlies Luszik-Bhadra from the PTB has, together with a partner from industry, developed a measuring device which can measure neutron and photon radiation at the same time. This personal dosimeter is a handy device which has a direct readout and an alarm function. It was possible by means of an invention – the essential principles of which have been patented – to make the dosimeter especially light and compact. For the technology transfer to the Synodys group, Marlies Luszik-Bhadra and her colleagues Wilfried Wendt and Mathias Weierganz receive this year's Technology Transfer Prize of the *Braunschweig Chamber of Commerce and Industry*.

The new personal dosimeter is able to measure both photon radiation and also neutron radiation in a handy and moreover very light device. Currently it is the smallest dosimeter for mixed neutron/photon radiation fields. Compared to conventional laboratory electronics, the construction is smaller by a factor of 1000. The innovative idea thereby is found in the interior construction of the detector. Whereas up to now, several semiconductor detectors have always been used for the construction of a neutron dosimeter, the new dosimeter gets by with a single detector surrounded by several thin absorber layers. Hence the dosimeter is open to diverse fields of application: from medicine to nuclear technology and also to space-related assignments.



## Physik und Metrologie bei ultratiefen Temperaturen

Am 5. und 6. Juni trafen sich im Hermann-von-Helmholtz-Bau der PTB in Berlin namhafte Wissenschaftler deutscher Universitäten und Forschungsinstitute mit dem Ziel, die Entwicklungen der letzten Jahre auf dem Gebiet der Tieftemperaturphysik einer Bestandsaufnahme zu unterziehen und die Richtung zukünftiger Forschung zu erörtern. Das Symposium, das in der Reihe „Tieftemperaturphysik unterhalb von 1 Kelvin“ nach 1992 und 2002 zum dritten Mal stattfand, wurde gemeinsam von den Berliner Tieftemperatureinrichtungen der PTB, des Hahn-Meitner-Instituts und der Freien Universität getragen. In 18 eingeladenen Vorträgen und einer Podiumsdiskussion unter Leitung von F. Pobell (Rossendorf) zur Frage „Tieftemperaturphysik – quo vadis?“ wurden von den ca. 50 Teilnehmern aktuelle Themen des Tieftemperaturverhaltens der kondensierten Materie sowie der Mess- und Kryotechnik aufgegriffen und mit dem Ziel künftiger Kooperationen diskutiert.

Der breite Themenkreis offenbarte die nach wie vor hohe Dynamik und anhaltende Aktualität der Tieftemperaturforschung, die auch in einem steigenden Interesse an industriell gefertigten Tieftemperatureinrichtungen zum Ausdruck kommt. Dazu berichteten Vertreter namhafter Hersteller über neue Entwicklungen von Mischungskryostaten, Pulsrohrkühlern und Tieftemperatursystemen. Die Produkte dieser und weiterer Hersteller wurden in einer Firmenausstellung präsentiert. Anregende Diskussionen lieferten sowohl Impulse für eigene Arbeiten als auch Anstöße für neue gemeinsame Forschungsprojekte und Kooperationen.

Die Mikrokelvinanlage MKA3 der PTB wird begutachtet, links vom Kryostateneinsatz Prof. R. Gross, rechts Prof. H. v. Löhneysen.

## Physics and metrology at ultra-low temperatures

On 5<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> June eminent scientists from German universities and research institutes met in the PTB's Hermann von Helmholtz Building in Berlin with the aim of reviewing recent developments in the field of low temperature physics and discussing the direction of future research. The symposium which took place for the third time following 1992 and 2002, was part of the series on "Low-temperature Physics below 1 Kelvin", and was held jointly by the PTB's Berlin low temperature department, the Hahn Meitner Institute and the Free University. In 18 invited scientific lectures and a panel discussion chaired by F. Pobell (Rossendorf) on "Ultra-low temperature physics – quo vadis?", current topics related to the low temperature behaviour of condensed matter as well as metrology and cryogenic technology were taken up by approximately 50 participants and discussed with the aim of future cooperations.

The broad range of topics displayed the still highly dynamic and long-standing topicality of low temperature research which is also expressed by a growing interest in industrially manufactured low temperature devices. Relating to this, representatives of well-known manufacturers reported on new dilution refrigerators, pulse-tube coolers and low

temperature system developments. Products produced by these manufacturers and others were presented in an exhibition. Lively discussions provided impulses for the participants' own work as well as impetus for new joint research projects and cooperations.

The PTB's microkelvin facility MKA3 is examined, left of the cryostat unit Prof. R. Gross, right Prof. H. v. Löhneysen.



### Erstes Licht der Metrology Light Source

Die Metrology Light Source (MLS), ein für die metrologische Nutzung optimierter Niederenergie-Elektronenspeicherring zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung vom fernen Infraroten bis zum extremen UV, wurde von der BESSY GmbH im Rahmen einer Kooperation mit der PTB konzipiert und aufgebaut. Der Aufbau der komplexen Speicherringanlage im Willy-Wien-Laboratorium mit einem 100-MeV-Mikrotron als Injektor wurde wie geplant im Februar 2007 abgeschlossen, bereits am 5. Juni 2007 konnten erstmals Elektronen bei einer Energie von 100 MeV gespeichert werden. Die Erhöhung der Energie der gespeicherten Elektronen auf 600 MeV gelang problemlos im ersten Anlauf im August 2007.

Zur Nutzung der von den Elektronen emittierten Synchrotronstrahlung und als Diagnostik für den gespeicherten Elektronenstrahl wurden von der PTB im Rahmen eines Erstausstattungsprogramms zeitgleich zur Aufbau- und Inbetriebnahmephase der MLS erste Strahlrohre und Messeinrichtungen aufgebaut. Im August 2007 konnte nach Erfüllung der aufwändigen Strahlenschutzvorschriften erstmals Synchrotronstrahlung in der Experimentierhalle beobachtet werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Projekt MLS sehr gute Fortschritte gemacht hat, nur 3 Jahre nach dem Spatenstich für das Willy-Wien-Laboratorium am 24. September 2004 konnten bereits erste Experimente durchgeführt werden. Ziel ist nun, mehr Strom zu speichern und im Rahmen einer Anlaufphase Routinebetriebsbedingungen zu finden und festzulegen.

### First light of the Metrology Light Source

The Metrology Light Source (MLS), a dedicated low-energy electron storage ring for the generation of synchrotron radiation from the far infrared up to the extreme UV, was designed and set up by BESSY GmbH within the scope of a cooperation with PTB. The setting up of the complex storage ring facility at the Willy Wien Laboratory with a 100-MeV microtron as injector was completed in February 2007 according to schedule; and already on June 5, 2007, electrons at an energy of 100 MeV could be stored for the first time. Furthermore, it was possible already in the first run in August 2007 to increase the energy of the stored electrons to 600 MeV without any difficulty.

Within the scope of a basic equipment programme carried out simultaneously with the setting up and commissioning phase of the MLS, PTB set up first beamlines and experimental stations in order to use the synchrotron radiation emitted by the electrons and as diagnostics for the stored electron beam. In August 2007, after fulfilling demanding radiation protection provisions, synchrotron radiation could be observed in the experimentation hall for the first time.

In summary, one can assert that the MLS project has made good progress: Only 3 years after the groundbreaking for the Willy Wien Laboratory, on September 24, 2004, first experiments could already be carried out. The aim is now to store more current and, within the scope of a start-up phase, to find and determine routine operating conditions.

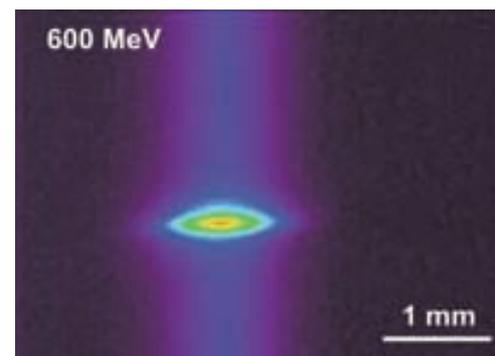


Layout des MLS-Speicherrings mit einem Mikrotron (unten rechts) als Injektor

Layout of the MLS storage ring with a microtron (bottom right) as injector

Optische Abbildung des Quellpunkts der Synchrotronstrahlung bei einer Elektronenenergie von 600 MeV

Visible light image of the source point of the synchrotron radiation at an electron energy of 600 MeV



## Lange Nacht der Wissenschaften 2007

Dass Licht mehr ist, als man mit bloßem Auge sieht, zeigte die PTB während der Langen Nacht der Wissenschaften am 9. Juni einer interessierten Öffentlichkeit in ihrem neu errichteten Willy-Wien-Laboratorium (WWL) im Wissenschafts- und Technologiepark Berlin-Adlershof.

Mit einem interdisziplinären Ansatz näherten sich Wissenschaftler, Architekten, Kaufleute und sogar Theologen dem Thema „Licht“. Sie versuchten, die Nutzung weiter Bereiche des elektromagnetischen Spektrums für Wissenschaft und Technik, den Einsatz von Licht und Farbe als Gestaltungsmerkmal und nicht zuletzt die Wirkung der Farben auf den Menschen zu „beleuchten“. Die Resonanz war mit mehr als 2500 Besucher eindrucksvoll. So ganz nebenbei konnten sie auch einen Blick auf die im Aufbau befindliche Metrology Light Source MLS werfen, die das Licht für die metrologischen Arbeiten der PTB im WWL liefern wird.

Nach dem ersten Spatenstich für den neuen Standort am 24. September 2004 ist das Laboratoriumsgebäude nunmehr fertiggestellt. An der MLS arbeiten die Speicherring-Experten der BESSY GmbH in enger Kooperation mit der PTB, um ab 2008 mit dem Nutzerbetrieb an der MLS zu beginnen und die Strahlparameter für die verschiedenen Betriebsmodi zu optimieren. Die PTB setzt an der MLS ihre mehr als 25-jährige Tradition der Nutzung von Synchrotronstrahlung für metrologische Aufgaben fort und wird auch hier eng mit ihren bisherigen und künftigen Partnern zusammenarbeiten.

Besucher der Langen Nacht der Wissenschaften vor dem Willy-Wien-Laboratorium der PTB

Long Night of Science visitors in front of the PTB's Willy Wien Laboratory

## Long Night of Science 2007

Light is more than what we see with our bare eyes. The PTB showed this to interested members of the public during the Long Night of Science on 9<sup>th</sup> June in the newly built Willy Wien Laboratory (WWL) in the Science and Technology Park in Berlin-Adlershof.

Scientists, architects, business people and even theologians approached the topic of “light” in an interdisciplinary way. They tried to “illuminate” the use of further areas of the electro-magnetic spectrum for science and technology, the application of light and colour as a design feature, and not least the effect that colours have on people. With more than 2500 visitors, the resonance was impressive. As an extra, the visitors were also able to have a look at the Metrology Light Source MLS which is under construction. This is going to supply the light for the metrological work of the PTB in the WWL.

The laboratory building has now been completed following the first sod being turned for the new site on 24<sup>th</sup> September 2004. The storage ring experts of BESSY GmbH are working in close co-operation with the PTB at the MLS to start user operation there from 2008 onwards and to optimise the beam parameters for the various operation modes. The PTB is continuing its 25-year plus tradition of utilising synchrotron radiation for metrological tasks at the MLS and will also work closely with its existing and future partners there.



## 120 Jahre PTR/PTB

Anlässlich des 120-jährigen Jubiläums der PTB und ihrer Vorgängerinstitution, der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR), fand im Institut Berlin in Berlin-Charlottenburg am 10. Dezember ein Festkolloquium statt. Nach der Begrüßung durch Prof. Dr. Ernst O. Göbel und Grußworten von MR Dr. Rainer Jäkel (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie), Dr. Hans-Gerhard Husung (Staatssekretär für Wissenschaft und Forschung), Marc Schulte (Bezirksstadtrat, Charlottenburg-Wilmersdorf) und Ruprecht von Siemens (Helmholtz-Fonds e.V.) hielten Prof. Dr. Rudolf P. Huebener (Universität Tübingen) und Dr. Terry Quinn (emeritierter Direktor des Bureau International des Poids et Mesures in Sèvres) ihre Festvorträge.

Über die Gründung der PTR und die Konsequenzen für die Wissenschaft des Messens berichtete Rudolf Huebener, der seinen Vortrag dabei auf umfangreiche Recherchen abstützen konnte. Gemeinsam mit Dr. Heinz Lübbig ist er der Autor eines Buches über die wissenschaftliche Geschichte der PTR („A Focus of Discoveries – The Physical-Technical Imperial Institute in Berlin and the Origin of Quantum Physics“). Nach diesem Rückblick wendete sich der zweite Festvortrag ganz der Gegenwart und der Zukunft zu. Terry Quinn beleuchtete die aktuellen Entwicklungen im Internationalen Einheitensystem (SI), in dem die Neudefinitionen mehrerer Basiseinheiten durch den Bezug auf Naturkonstanten nahe bevorstehen.

## 120 years of the PTR/PTB

A celebratory colloquium was held in the Berlin Institute in Berlin-Charlottenburg on 10<sup>th</sup> December on the occasion of the 120<sup>th</sup> anniversary of the PTB and its predecessor, the Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR). Prof. Dr. Rudolf P. Huebener (University of Tübingen) and Dr. Terry Quinn (Director emeritus of the Bureau International des Poids et Mesures in Sèvres) held their celebratory lectures after the welcome address by Prof. Dr. Ernst O. Göbel and greetings given by Dr. Rainer Jäkel (Federal Ministry of Economics and Technology), Dr. Hans-Gerhard Husung (State Secretary responsible for Science and Research), Marc Schulte (Borough Councillor, Charlottenburg-Wilmersdorf) and Ruprecht von Siemens (Helmholtz Fund).

Rudolf Huebener spoke about the foundation of the PTR and the consequences for the science of measurement, and was able to support his speech with extensive research. Along with Dr. Heinz Lübbig, he is the author of a book on the scientific history of the PTR („A Focus of Discoveries – The Physical-Technical Imperial Institute in Berlin and the Origin of Quantum Physics“). Following this review, the second celebratory lecture turned to the present and the future. Terry Quinn focused on current developments in the International System of Units (SI), in which several base units will be re-defined with reference to the fundamental constants in the near future.



In der ersten Reihe  
(v. l. n. r.):  
In the first row (from left  
to right):

Prof. Dr. Rudolf P.  
Huebener, Dr. Hans-  
Gerhard Husung,  
MR Dr. Rainer Jäkel,  
Dr. Terry Quinn, Prof.  
Dr. Klaus von Klitzing

## Biochemische Indikatoren psychischer Erkrankungen

Die Aminosäure L-Glutamat ist ein wichtiger Botenstoff im Gehirn; ihre Rolle für die Entstehung und den Verlauf psychischer Erkrankungen wird weltweit intensiv untersucht. Ein am 3-Tesla-Tomographen der PTB entwickeltes Verfahren zur nichtinvasiven Quantifizierung von Glutamat im Gehirn mittels MR-Spektroskopie hat im Rahmen einer Kooperation mit der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Charité – Universitätsmedizin Berlin zu neuen Erkenntnissen über die *bipolare Störung* (früher: manisch-depressive Erkrankung) geführt; laut WHO eine der 10 Krankheiten, die weltweit die meisten Langzeit-Behinderungen verursachen. Vergleichende Messungen der Glutamatkonzentration im Hippocampus von gesunden Probanden und bipolaren Patienten, die sehr effektiv mit Lithium therapiert werden, haben gezeigt, dass der Glutamat-spiegel bei Patienten signifikant erhöht und positiv mit der Lithiumkonzentration im Blutserum korreliert ist. Weiterhin wurde eine negative Korrelation mit der Konzentration des Stresshormons Cortisol nachgewiesen.

Damit hat diese Arbeit nicht nur die hypothesierte Bedeutung von Hippocampus-Glutamat bei bipolaren Störungen erstmals am lebenden Menschen nachgewiesen, sondern auch in den Korrelationen von Neurotransmitterkonzentrationen im Gehirn mit Wirkstoffkonzentrationen in Körperflüssigkeiten einen konkreten Ansatzpunkt gefunden, um dem Verständnis psychischer Erkrankungen auf biochemischer Ebene einen Schritt näher zu kommen.

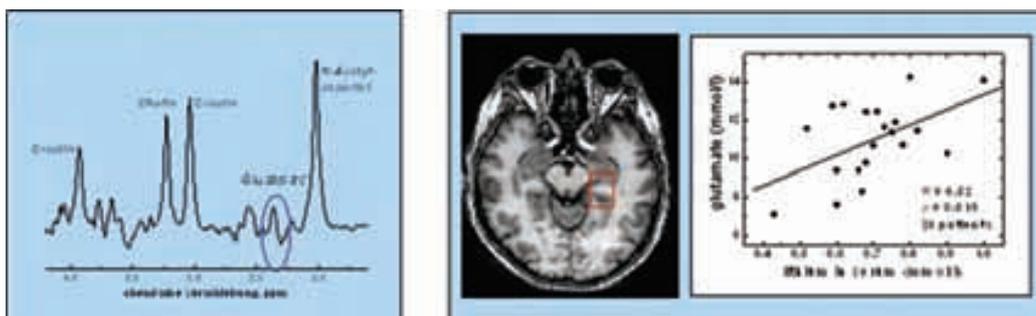
Links: <sup>1</sup>H-Magnetresonanzspektrum. Rechts: Lage des linken Hippocampus im menschlichen Gehirn und Korrelation der dort bestimmten Glutamatkonzentrationen mit dem Lithiumspiegel im Blutserum.

## Biochemical indicators for mental disorders

The amino acid L-glutamate is an important transmitter in the brain; its role in the genesis and the course of mental disorders is being thoroughly investigated worldwide. A procedure developed on PTB's 3-tesla tomograph for the non-invasive quantification of glutamate in the brain by means of MR spectroscopy has led to new findings on the *bipolar disorder* (previously called "manic-depressive disease") within the scope of a cooperation with the Clinic for Psychiatry and Psychotherapy of the Charité – University Medicine in Berlin; according to the WHO, bipolar disorder is one of the ten diseases which cause the most long-term disabilities worldwide. Comparative measurements of the glutamate concentration in the hippocampus in healthy test persons and in bipolar patients who are very successfully treated with lithium have shown that the glutamate level in bipolar patients is significantly increased and positively correlated with the lithium concentration in blood serum. Furthermore, a negative correlation with the concentration of the stress hormone cortisol could be detected.

Thus this work has not only confirmed the hypothesis of the importance of hippocampus glutamate in bipolar disorders for the first time in living patients but also, with the correlations of neurotransmitter concentrations in the brain with those of active ingredients in body fluids, found a concrete approach, allowing another step to be taken towards the biochemical deciphering of mental disorders.

Left: <sup>1</sup>H-magnetic resonance spectrum. Right: Location of the left hippocampus in the human brain and correlation of the glutamate concentrations determined therein with the lithium level detected in blood serum.



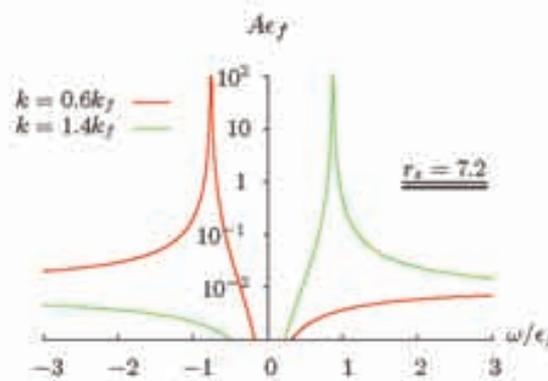
## Composite Fermions

Quanten-Hall-Systeme zeigen eine Vielzahl von Effekten je nach der Stärke des Magnetfeldes und der Ladungsträgerdichte („Füllfaktor“). Bei Füllfaktor  $1/2$  wird das Verhalten des Systems durch „Composite-Fermion“-Quasiteilchen bestimmt. Die Berechnung von Einteilcheneigenschaften solcher Quasiteilchen (in wechselwirkenden Systemen) ist immer noch ein formidables theoretisches Problem. Andererseits ist die genaue Bestimmung der Einteilcheneigenschaften die Grundlage für die Untersuchung der thermodynamischen (spezifische Wärme) und der Transport-Eigenschaften (Leitfähigkeitstensor) dieser Systeme. Hier wurde 2007 eine Doktorarbeit (Promotion an der TU Braunschweig) erfolgreich abgeschlossen, in der ein neues Verfahren zur Bestimmung der Einteilcheneigenschaften angewandt wurde: die Luttinger-Ward-Methode. Wegen der Schwierigkeiten, verursacht durch die verschiedenen Wechselwirkungen in der mikroskopischen Beschreibung der „Composite Fermions“, wurde das Verfahren erst für das gewöhnliche Coulombproblem (wechselwirkende Elektronen in zwei Dimensionen) formuliert. Die Abbildung zeigt ein Ergebnis, die Spektralfunktion. Diese ist für gegebenen Wellenvektor  $k$  das Einteilchenanregungsspektrum für Quasiteilchen ( $\omega > 0$ ) und Quasilöcher ( $\omega < 0$ ). Aus dem Peak der Spektralfunktion kann man die Quasiteilchendispersion bestimmen. Die Spektralfunktion reproduziert mit guter Genauigkeit das aus der Literatur bekannte Verhalten. Das numerische Verfahren ist gut handhabbar. Damit ist diese Methode ein sehr aussichtsreicher Kandidat, auch für „Composite Fermions“ ein Verfahren für eine mikroskopische, genaue Berechnung der Einteilcheneigenschaften (wie etwa der Masse) zu konstruieren.

Spektralfunktion  $A$  als Funktion der Frequenz für Impulse  $k = 0,6 k_f$  und  $k = 1,4 k_f$  in der sogen. GW-Näherung mit einem Dichteparameter von  $r_s = 7,2$ .

## Composite Fermions

Quantum Hall systems show a variety of effects as a function of the magnetic field strength and the charge carrier density (“filling factor”). In the case of filling factor  $1/2$ , the behaviour of the system is determined by “composite fermion” quasi-particles. The calculation of single-particle properties of such quasi-particles (in interacting systems) is still a formidable theoretical problem. On the other hand, the precise determination of the single-particle properties is the basis for the investigation of the thermodynamic (specific heat) and transport properties (conductivity tensor) of these systems. In 2007, a doctoral thesis (at the Braunschweig Technical University) in which a new procedure for the determination of the single-particle properties was applied – the Luttinger Ward method – was successfully completed. Due to the difficulties caused by the different interactions in the microscopic description of the “composite fermions”, the procedure was first formulated for the ordinary Coulomb problem (interacting electrons in two dimensions). Figure 1 shows a result: the spectral function. For the given wave vector  $k$ , this is the single-particle excitation spectrum for quasi particles ( $\omega > 0$ ) and quasi-holes ( $\omega < 0$ ). The quasi-particle dispersion can be determined from the peak of the spectral function. Fig. 1 reproduces with good accuracy the behaviour known from literature. The numerical procedure is well manageable. For this reason, this method is a very promising candidate for the construction – also for “composite fermions” – of a procedure for a microscopic, precise calculation of the single-particle properties (as, for example, the mass).

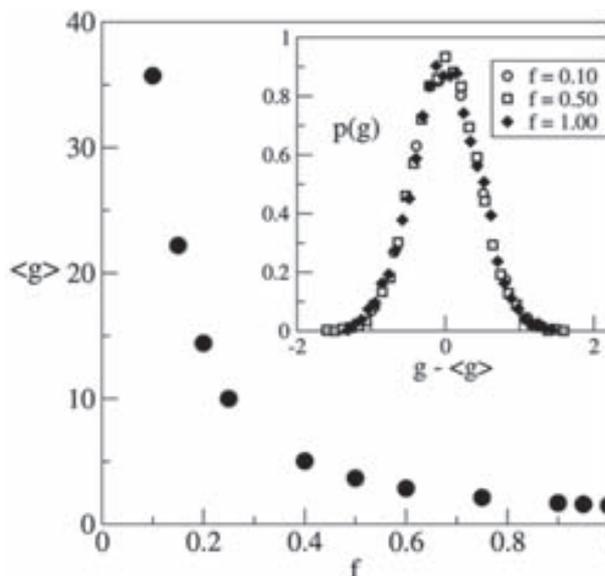


Spectral function  $A$  as a function of the frequency for momenta  $k = 0.6 k_f$  and  $k = 1.4 k_f$  in the so-called GW approximation with a density parameter of  $r_s = 7.2$ .

### Universelle Leitwertfluktuationen zweidimensionaler Gitter mit chiraler Symmetrie

Die elektrischen Transporteigenschaften von mesoskopischen Proben werden bei tiefen Temperaturen vor allem durch die statistischen Eigenschaften der vorhandenen Unordnungspotentiale beeinflusst. Ebenso spielen spezielle Symmetrien, die zum Beispiel von einem bestimmten Kristallgitter oder von einem von außen angelegten Magnetfeld herühren können, eine große Rolle. In letzter Zeit rücken Systeme mit chiraler Symmetrie in den Mittelpunkt der aktuellen Forschung, da diese einen besonderen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften von zweidimensionalen Materialien hat. Prominente Beispiele hierfür sind das ungewöhnliche elektronische Verhalten von Graphen – das ist eine einzelne Schicht aus Kohlenstoffatomen mit hexagonaler Struktur –, aber auch gewöhnliche Quadratgitter mit einer zufällig verteilten statischen magnetischen Flussdichte pro Plakette. In beiden Fällen ist die chirale Symmetrie mit der bipartiten Eigenschaft der zugrunde liegenden Gitter verknüpft, also mit der Zerlegbarkeit in zwei disjunkte Teilgitter. Rechnungen für ein zweidimensionales tight-binding Modell mit gleichverteiltem zufälligen magnetischen Fluss zeigen in der Mitte des Energiebandes einen skalenunabhängigen kritischen Leitwert, wohingegen der Leitwert bei anderen Energien im thermodynamischen Limes gegen Null geht. Für den gemittelten Leitwert  $\langle g \rangle$  am quantenkritischen Punkt ergeben die Rechnungen zwar eine Abhängigkeit von der Amplitude des fluktuierenden magnetischen Flusses, die Verteilung der jeweiligen Leitwertfluktuationen  $P(g - \langle g \rangle)$  jedoch zeigt eine universelle Varianz.

Der gemittelte kritische Leitwert  $\langle g \rangle$  als Funktion der Stärke  $f$  des magnetischen Flusses. Das Teilbild zeigt die Universalität der Varianz.



The averaged critical conductance  $\langle g \rangle$  as a function of the strength  $f$  of the magnetic flux. The inset shows the universality of the variance.

### Universal conductance fluctuations of two-dimensional lattices with chiral symmetry

At low temperatures, the electric transport properties of mesoscopic samples are affected above all by the statistical properties of the existing disorder potentials. Likewise, special symmetries, which may, for example, originate from a specific crystal lattice or an externally applied magnetic field, play an important role. Lately, systems with chiral symmetry have become the focal point of topical research, as this symmetry exerts a special influence on the physical properties of two-dimensional materials. Prominent examples of this are the unusual electronic behaviour of graphene (this is a single layer of carbon atoms with hexagonal structure), but also normal square lattices with a randomly distributed static magnetic flux density per plaquette. In both cases, the chiral symmetry is linked with the bipartite property of the underlying lattices, i.e. with the decomposability in two disjoint partial lattices. Calculations for a two-dimensional tight-binding model with uniformly distributed random magnetic flux show a scale-independent critical conductance in the centre of the energy band, whereas at other energies, the conductance in the thermodynamic limes tends towards zero. Although the calculations for the averaged conductance  $\langle g \rangle$  at the quantum-critical point show a dependence on the amplitude of the fluctuating magnetic flux, the distribution of the respective conductance fluctuations  $P(g - \langle g \rangle)$  shows a universal variance.

### Transport durch wechselwirkende Quantenpunkte: Eine Untersuchung im Rahmen der funktionalen Renormierungsgruppe

Quantenpunkte sind Nanostrukturen in Halbleitermaterialien, die wegen möglicher Anwendungen in der Quantenmetrologie sowie für Quantenrechner intensiv untersucht werden. Von aktuellem Interesse ist die theoretische Beschreibung wechselwirkender Quantenpunkte. Dazu wurde der Elektronentransport durch gekoppelte Quantenpunkte untersucht, die mit geeigneten Zuleitungen an die Umgebung angeschlossen sind. Zu berechnende Observable sind der Leitwert eines solchen Systems, die Transmissionsphase sowie die Besetzungsdichten der einzelnen Zustände im System der Quantenpunkte. Hierfür sind Methoden erforderlich, die es ermöglichen, sehr starke Coulombkorrelationen, die z. B. zum Kondoefekt führen, nichtstörungstheoretisch zu berücksichtigen.

Wir nutzen dazu mit der funktionalen Renormierungsgruppe eine neue Methode, die wesentlich geringeren numerischen Aufwand als Standardmethoden erfordert.

Bei der funktionalen Renormierungsgruppe handelt es sich um eine exakte funktionale Flussgleichung zur Beschreibung von Quantensystemen. Für praktische Anwendungen muss diese Gleichung geeignet genähert werden. Die Flussgleichung wird damit auf einen möglicherweise unendlichen Satz von gekoppelten gewöhnlichen Differentialgleichungen überführt. Wir konnten zeigen, dass dieser Satz für Fermionen unter bestimmten Voraussetzungen endlich ist. Weiterhin haben wir ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, diesen Satz von Differentialgleichungen komplett zu erstellen und zu lösen. Damit werden Rechnungen möglich, die über die üblichen in der Literatur gemachten Näherungen hinausgehen. Observable für verschiedene Doppel-Quantenpunktsysteme konnten bereits erfolgreich berechnet werden.

### Transport through correlated quantum dots: An investigation using the functional renormalization group

Quantum dots are nanostructures in semiconductor materials which are investigated in detail in view of possible applications in quantum metrology and quantum computers. Of recent interest is the theoretical description of correlated quantum dots. In this connection, the electron transport through coupled quantum dots, which are connected to the environment by suitable leads, was investigated. Observables to be calculated are the conductance of such a system, the transmission phase as well as the population densities of the single states in the system of the quantum dots. This requires methods which allow very strong Coulomb correlations – which lead, for example, to the Kondo effect – to be taken into account non-perturbatively.

We use for this purpose a new method, the functional renormalization group, which requires considerably less numerical effort than the standard methods like, e.g., Wilson's numerical renormalization group.

The functional renormalization group is an exact functional flow equation for the description of quantum systems. For practical applications, this equation must be suitably truncated. The flow equation is thus transformed into a possibly infinite set of ordinary coupled differential equations. We were able to show that this set is finite for fermions. Furthermore, we have developed a procedure which allows this set of differential equations to be completely established and solved. This allows calculations to be made which go beyond the approximations applied so far in literature. We successfully calculated observables for different double quantum dot systems.

## Die 58. Sitzung des Kuratoriums

Das Kuratorium traf sich am 3. und 4. Mai 2007 zu seiner 58. Jahrestagung in Braunschweig.

Die Tagung begann mit der Begrüßung der Kuratoren und Gäste durch Prof. Dr. Ernst O. Göbel, den Präsidenten der PTB. Danach besuchten die Teilnehmer ausgewählte Arbeitsgruppen und Messplätze der PTB.

Im traditionellen nachmittäglichen Kolloquium stellten drei Nachwuchswissenschaftler der PTB aktuelle Forschungsarbeiten vor. Zum Ende des ersten Tages trafen die Kuratoren und Gäste mit Vertretern der Abteilungen zu Fachgesprächen zusammen.

Die Kuratoriumssitzung am 4. Mai 2007 eröffnete Dr. Eckhard Franz, der Präsident des Kuratoriums der PTB. Dr. Franz informierte über aktuelle Aspekte der Wirtschaftspolitik und verwies auf die Anstrengungen der Bundesregierung, im Rahmen der „Hightech-Strategie für Deutschland“ den Technologie- und Innovationsstandort Deutschland intensiv zu fördern. Weiterhin hob er die Themen Normung und Akkreditierung hervor, deren Bedeutung mit der Einrichtung eines Akkreditierungsbeirates im BMWi, in dem auch die PTB vertreten ist, Rechnung getragen wurde. Ferner ging Dr. Franz auf die Novellierung des Eich- und Einheitengesetzes ein: erste Entwürfe sollen hier Ende 2007/Anfang 2008 vorliegen. Dem Ergebnis der anstehenden Evaluierung der Ressortforschungseinrichtungen, insbesondere der PTB, sehe man im BMWi gespannt, aber zuversichtlich entgegen. Abschließend ging er auf die BMWi-internen Umstrukturierungen ein.

Der Präsident der PTB, Prof. Dr. Ernst O. Göbel, bilanzierte in seinem Bericht die Arbeitsergebnisse der PTB. Dabei ging er u. a. auf eine Reihe von wissenschaftlichen Höhepunkten, wie die Entwicklung eines programmierbaren 10-V-Josephson-Normals, das Magnetic Marker Monitoring und ein Projekt, das eine Frequenzübertragung über Glasfasernetze ermöglichen soll, ein.

Er berichtete ferner über den Stand der nationalen und internationalen Kooperationen der PTB, insbesondere mit der Technischen Universität in Braunschweig, die Entwicklungen, die zu der Gründung der europäischen Metrologieorganisation EURAMET sowie zum europäischen

## 58<sup>th</sup> Meeting of the Board of Consultants

The Board of Consultants met in Braunschweig on 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> May 2007 on the occasion of its 58<sup>th</sup> annual meeting.

The meeting began with Prof. Dr. Ernst O. Göbel, the President of the PTB, welcoming the Board and the guests. After that the participants were taken to selected Working Groups and measurement facilities of the PTB.

Three of the PTB's junior scientists presented their current research in the traditional afternoon colloquium. Towards the end of the first day the Board and the guests met representatives of the Divisions for expert talks.

Dr. Eckhard Franz, the President of the Board of the PTB, opened the Board Meeting on 4<sup>th</sup> May 2007. In his lecture, Dr. Franz informed the participants about current aspects of economic policy and, in this context, referred to the endeavours of the German government to support the technological and innovative location of Germany intensively within the frame of the "High-tech Strategy for Germany". He emphasised the topics of standardisation and accreditation as a further important point, the importance of which is acknowledged by the establishment of an Accreditation Advisory Board in the Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi), on which the PTB is also represented. Furthermore, Dr. Franz addressed the amendment of the Verification and Units Act: the first drafts were expected at the end of 2007/beginning of 2008. The result of the coming evaluation of the departmental research institutions, especially of the PTB, is awaited eagerly and confidently in the BMWi. To conclude, he spoke about the internal restructuring of the BMWi.

In his report, the PTB's President, Prof. Dr. Ernst O. Göbel, took stock of the PTB's work results. He detailed, among other things, a series of scientific highlights, such as the development of a programmable 10-V Josephson standard, Magnetic Marker Monitoring, and a project which should allow frequency transmissions via glass fibre networks.



Teilnehmer an der 58. Sitzung des Kuratoriums

Participants in the 58<sup>th</sup> meeting in the Board of Consultants

Metrologie-Forschungsprogramm EMRP geführt haben. Dieses europäische Engagement hatte schließlich auch zum Besuch des EU-Forschungskommissars Dr. Janez Potocnik am 31. August 2006 in der PTB geführt. Zum Ende seines Vortrages skizzierte der Präsident das Konzept 2016 zur PTB-internen Aufgabengestaltung, das der PTB Ressourcen für neue oder zu verstärkende Arbeitsgebiete verschaffen soll.

Im weiteren Verlauf der Sitzung berichteten Dr. Schwartz und Dr. Wilkening über die Arbeiten der Abteilungen 1 bzw. 5 anlässlich ihrer Berufungen zu Abteilungsleitern.

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

#### **Persönliches:**

Als neue Mitglieder des Kuratoriums wurden Prof. Dr. Klaus-Peter Jäckel, Prof. Dr. Hans Schuler und Prof. Dr. Rainer Metternich berufen.

Im Berichtsjahr schieden die Mitglieder Dipl.-Ing. Helmwart Fülles, Prof. Dr. h. c. mult. Dr. Peter Fulde, Dr. Klaus-Dieter Sommer und Prof. Dr. Hans Tiziani aus dem Kuratorium aus.

He also reported on the status of the PTB's national and international cooperations, in particular with the Technical University in Braunschweig, the developments which have led to the foundation of the European metrology organisation EURAMET, as well as to the European Metrology Research Programme EMRP. This European engagement ultimately led to the visit of the European Commissioner for Science and Research, Dr. Janez Potocnik, to the PTB on 31<sup>st</sup> August 2006. At the end of his speech, the President outlined the "Concept 2016" on the organisation of PTB-internal tasks, which is expected to provide the PTB with resources for new areas of work or for those areas which are to be intensified.

Later during the session, Dr. Schwartz and Dr. Wilkening gave reports on the work of Divisions 1 and 5 respectively, following their appointments as Heads of Divisions.

The Chairman of the Supporting Committee for the Board, Dr. von Klitzing, reported on the committee meeting held the previous day and the treasurer of the Helmholtz Fund, Mr. Ruprecht von Siemens, presented his report on the economic development of the Helmholtz Fund.

#### **Personal matters:**

Prof. Dr. Klaus-Peter Jäckel, Prof. Dr. Hans Schuler and Prof. Dr. Rainer Metternich were appointed as new members of the Board. In the year under report, the members Dipl.-Ing. Helmwart Fülles, Prof. Dr. h. c. mult. Dr. Peter Fulde, Dr. Klaus-Dieter Sommer and Prof. Dr. Hans Tiziani retired from the Board.

### Gründung von EURAMET e.V.

Am 11. Januar 2007 wurde die neue europäische Metrologieorganisation EURAMET als eingetragener Verein (e.V.) nach deutschem Recht gegründet. Damit sind die erforderlichen Strukturen zur Durchführung des Europäischen Metrologie-Forschungsprogramms (EMRP) geschaffen.

An der Gründungsveranstaltung im Institut Berlin der PTB nahmen über 70 Gäste aus 28 europäischen Ländern teil; auch die Europäische Kommission und nationale Ministerien waren vertreten. Im ersten Teil der Veranstaltung unterschrieben die Vertreter der 26 Gründungsmitglieder die Satzung und riefen damit EURAMET ins Leben, verabschiedeten als erste Generalversammlung von EURAMET die Geschäftsordnung und wählten Prof. Dr. Michael Kühne, Mitglied des Präsidiums der PTB, zu dessen Vorsitzenden. Im Anschluss konstituierte sich das für die inhaltliche Ausgestaltung und Durchführung des EMRP zuständige EMRP-Komitee, dessen Vorsitzender zugleich zweiter stellvertretender Vorsitzender von EURAMET ist.

Mit Wirkung zum 1. Juli 2007 trat EURAMET die Nachfolge der seit 20 Jahren bestehenden und nun aufgelösten europäischen Metrologieorganisation EUROMET an. Im Unterschied zu dieser ist EURAMET e.V. rechtsfähig und erfüllt damit eine wichtige Voraussetzung für die Verwaltung von EU-Fördermitteln.

Das EURAMET-Sekretariat ist permanent bei der PTB angesiedelt, während die im Zusam-

### Founding of EURAMET e.V.

On 11 January 2007, the new European metrology organisation EURAMET was founded as a registered association (e.V.) according to German law. Thus the required structures for implementing the European Metrology Research Programme (EMRP) were created.

The founding event in PTB's Berlin Institute was attended by more than 70 guests from 28 European countries; also the European Commission and national ministries were represented. In the first part of the event, the representatives of the 26 charter members signed the Byelaws and thereby launched EURAMET, passed – as the first General Assembly of EURAMET – the rules of procedure and elected Prof. Dr. Michael Kühne, member of the Presidential Board of the PTB, as its chair. Following this, the EMRP Committee responsible for the thematic structure and implementation of the EMRP was set up, whose chair is at the same time the second deputy chairperson of EURAMET.

Effective 1 July 2007, EURAMET succeeded the European metrology organisation EUROMET, which had been in existence for 20 years and has now been dissolved. Unlike EUROMET, EURAMET e.V. has legal capacity and thus fulfils an important precondition for the administration of EU funds.



Gründungsveranstaltung und Vereinslogo des EURAMET e.V.

Founding event and association logo of EURAMET e.V.



menhang mit der Durchführung des EMRP anfallenden administrativen Aufgaben von EURAMET an das britische Metrologieinstitut NPL delegiert wurden.

### **iMERA-Plus**

Das europäische Metroloieforschungsprogramm EMRP soll nach Artikel 169 des EG-Vertrages je zur Hälfte aus nationalen bzw. europäischen Mitteln finanziert werden. Hierfür ist die Zustimmung von Parlament und Ministerrat im Rahmen des Mitentscheidungsverfahrens erforderlich.

Da die endgültige Entscheidung erst in 2009 fallen wird, hat die europäische Kommission 21 Millionen Euro aus dem ERA-NET Plus-Programm für die Überbrückungsmaßnahme iMERA-Plus bereitgestellt, mit der die dringendsten Forschungsvorhaben des EMRP bereits ab 2008 angegangen werden können. Aus EU-Mitteln werden maximal 1/3 der Aufwendungen erstattet, die von den teilnehmenden NMI aus nationalen Mitteln aufgebracht werden. Der Vertrag hierüber wurde Ende 2007 unterzeichnet.

Im Mai 2007 veröffentlichte das EMRP-Komitee einen Aufruf zur Abgabe von Interessenbekundungen der teilnahmeberechtigten Metrologieinstitute für vier Bereiche des EMRP: SI & Fundamentalkonstanten, Gesundheit, Länge, Elektrizität & Magnetismus. Aus den insgesamt 89 Interessenbekundungen aus 44 Instituten erarbeiteten Vertreter der interessierten Institute in Expertenrunden Vorschläge für gemeinsame Forschungsprojekte – *Joint Research Projects (JRP)*.

Die 39 Projektvorschläge wurden anschließend durch unabhängige, internationale Gutachter bewertet, wobei nur drei Projekte als nicht förderwürdig eingestuft wurden. Auf Grundlage der dabei festgelegten Rangliste erstellte das EMRP-Komitee die endgültige Projektliste, bestehend aus 21 JRP. Die Liste wurde dem aus Vertretern internationaler Institutionen und Repräsentanten aus Industrie, Forschung und Wissenschaft bestehenden *Research Council* vorgelegt, der sie befürwortete.

Die Europäische Kommission hat die im Rahmen von iMERA-Plus durch die europäischen nationalen Metrologieinstitute unter

The EURAMET Secretariat is permanently located at the PTB, whereas the administrative tasks of EURAMET, arising in connection with the implementation of the EMRP, have been delegated to the British Metrology Institute NPL.

### **iMERA-Plus**

The European metrological research programme EMRP is to be financed – according to article 169 of the EC Treaty – half from national and half from European funds. For this purpose, the approval of Parliament and the Council of Ministers is required, within the scope of a co-decision procedure.

As the final decision will not be made until 2009, the European Commission appropriated 21 million Euro from the ERA-NET Plus Programme for the bridging measure iMERA-Plus with which the most urgent research projects of the EMRP can already be tackled in 2008. A maximum of 1/3 of the expenses contributed by the participating NMIs from national funds will be reimbursed from EU funds. The agreement on this was signed at the end of 2007.

In May 2007, the EMRP Committee published a call for the submittal of expressions of interest by the eligible metrology institutes for four areas of the EMRP: SI & fundamental constants, health, length, electricity & magnetism. From the total of 89 expressions of interest from 44 institutes, representatives of the interested institutes worked out in expert rounds, proposals for joint research projects – *Joint Research Projects (JRP)*.

The 39 project proposals were subsequently evaluated by independent, international experts, whereby only three projects were categorized as unworthy of promotion. On the basis of the ranking list determined thereby, the EMRP Committee prepared the final project list consisting of 21 JRPs. The list was submitted to the *Research Council* – composed of representatives of international institutions and representatives of industry, research and science – which approved it.

The European Commission very much welcomed the procedures developed within the scope of iMERA-Plus by the European national metrology institutes, with significant

maßgeblicher Beteiligung der PTB entwickelten Prozeduren, die sich von den gängigen Verfahren bei EU-Fördermaßnahmen unterscheiden, sehr begrüßt.

### Konzept PTB 2016

Um trotz angespannter Haushalts- und Personalsituation Handlungsspielraum zu erlangen und den zukünftigen Anforderungen gerecht werden zu können, wurde im Rahmen des Konzepts 2016 eine umfassende PTB-interne Aufgabenkritik durchgeführt.

Der Prozess gliederte sich in folgende Schritte:

- Abteilungsweise Nennung von Aufgaben, die grundsätzlich beendet werden könnten, im Umfang von 30 % der Personalressourcen. In Betracht kamen dabei nur Aufgaben, die nicht explizit gesetzlich festgelegt sind und denen keine größere Investition in den letzten 5 Jahren vorangingen.
- Auswahl einer 20 % der Personalressourcen der PTB entsprechenden Teilmenge der genannten Aufgaben durch das Präsidium für die Lesung und Diskussion im Direktorium.
- Lesung und Diskussion im Direktorium (Präsidium, 10 Abteilungsleiter, Beteiligung von Vertretern des gesetzlichen Messwesens, des DKD und des QM).
- Entscheidung über die Beendigung von Aufgaben im Umfang von etwa 10 % der Personalressourcen der PTB durch das Präsidium, „Poolbildung“ der mit diesen Aufgaben verbundenen Mitarbeiter und Stellen.
- Diskussion über neu aufzunehmende oder zu verstärkende Aufgaben im Rahmen der jährlichen Arbeitsplanbesprechungen des Präsidiums mit den Abteilungen.
- Entscheidung über neu aufzunehmende Aufgaben durch das Präsidium.

Im Ergebnis wurde die Beendigung bzw. Neuaufnahme von Aufgaben entsprechend einem Personalaufwand von über 100 Mitarbeitern beschlossen.

Darüber hinaus werden für Einzelaufgaben von befristeter Dauer zukünftig verstärkt Postdocs, Doktoranden und Diplomanden eingestellt. Das Konzept 2016 sieht hierfür

involvement by the PTB, which differ from the procedures prevalent with EU funding measures.

### Concept PTB 2016

In order to obtain room for action in spite of the strained budgetary and personnel situation and to be able to satisfy future requirements, an extensive PTB-internal task review was conducted within the scope of Concept 2016.

The process was composed of the following steps:

- Divisional stating of tasks which categorically could be ended, to the extent of 30 % of the personnel resources. Only those tasks came into consideration thereby which have not been explicitly statutory and where no larger investments have preceded in the past 5 years.
- Selection by the Presidential Board of a partial amount of the stated tasks corresponding to 20 % of the personnel resources of the PTB for reading and discussion in the Directorate.
- Reading and discussion in the Directorate (Presidential Board, 10 division heads, participation of representatives of Legal Metrology, the DKD and the QM).
- Decision by the Presidential Board on the termination of tasks to the amount of approx. 10 % of the personnel resources of the PTB, “pooling“ of the employees and posts connected with these tasks.
- Discussion on tasks to be newly taken on or to be emphasized within the scope of the annual work plan discussions of the Presidential Board with the divisions.
- Decision by the Presidential Board on new tasks to be taken on.

As a result, the termination and/or addition of new tasks corresponding to a personnel expenditure of more than 100 employees was agreed upon.

Furthermore in future, for limited-term individual tasks, an increase of post docs, doctorates, and graduands will be employed. Concept 2016 makes provision here for 10 new posts to be assigned annually, limited to three years, to scientists or polytech engineers. In addition, within the scope of Concept 2016,

jährlich jeweils 10 neu zu vergebende, auf drei Jahre befristete Stellen für Wissenschaftler bzw. FH-Ingenieure vor. Hinzu können im Rahmen des Konzepts 2016 jedes Jahr 10 ausgelernte Auszubildende einen Anschlussvertrag für 2 Jahre erhalten und weitere 30 für 6 Monate weiterbeschäftigt werden. Bis 2016 sollen aus dem oben genannten „Stellenpool“ insgesamt 90 Planstellen mit befristet angestellten Mitarbeitern besetzt sein.

Die intensive Diskussion über die Beendigung bzw. Neuaufnahme von Aufgaben wurde ausschließlich aufgabenorientiert im Rahmen der Programmenthemen des Arbeitsprogramms geführt. Eines der übergeordneten Leitziele war die Aufgabenkonzentration auf folgende strategisch ausgewählte Schwerpunktthemen, die weiter ausgebaut werden sollen:

- Dynamische Messung mechanischer Größen
- Einheitendarstellung mit Quanteneffekten, quantenmetrologisches Dreieck
- Nanomagnetismus
- EMV
- Wirkung ionisierender Strahlung mit Schwerpunkt im Gesundheitsbereich
- Metrologische Grundlagen zur Fusionsforschung mit Schwerpunkt Neutronen
- Dimensionelle Metrologie kleinster Strukturen, komplexer großer Strukturen sowie von Oberflächen
- Metrologie in der Chemie
- NMR und bildgebende Verfahren in der Medizinphysik
- Biomagnetismus
- Photometrie/Radiometrie
- Metrologie mit Synchrotronstrahlung und im (Sub-)THz und IR-Bereich
- Topografie/Mikroskopie
- Thermometrie
- Zeit und Frequenz
- Avogadro-Projekt
- Boltzmann-Projekt

Darüber hinaus wurde im Sinne einer am Ansatz der Programmstruktur orientierten Bündelung größerer Themengebiete vereinbart, dass die Bereiche „Durchfluss“ und „Terahertz-Metrologie“ jeweils abteilungsübergreifend bearbeitet werden.

each year 10 apprentices who have completed their training will receive a follow-up contract for 2 years and 30 more will be employed for another 6 months. By 2016, from the above-mentioned “post pool”, a total of 90 established posts are to be filled with employees having limited employment contracts.

The intensive discussion on the termination of tasks and/or taking on of new tasks was led exclusively task-oriented within the scope of the programme subjects of the working programme. One of the overriding objectives was the concentration of tasks on the following strategically selected main foci, which are to be expanded further:

- Dynamic measurement of mechanical quantities
- Realization of units with quantum effects, quantum-metrological triangle
- Nanomagnetism
- EMC
- Effect of ionizing radiation with an emphasis on health-related issues
- Metrological fundamentals for fusion research with an emphasis on neutrons
- Dimensional metrology of smallest structures, complex large structures as well as of surfaces
- Metrology in chemistry
- NMR (nuclear magnetic resonance) and imaging methods in medical physics
- Biomagnetism
- Photometry/radiometry
- Metrology with synchrotron radiation and in the (sub-)THz and IR range
- Topography/microscopy
- Thermometry
- Time and frequency
- Avogadro Project
- Boltzmann Project

Furthermore, it was agreed, in terms of the bundling of larger topics – based on the approach of the programme structure – that the areas “Flowrate” and “Terahertz Metrology” are handled in a divisionally overlapping manner in each case.



Die Evaluationskommission

The evaluation commission

### Begehung der PTB durch die Bewertungsgruppe des Wissenschaftsrats

Im Rahmen der zweiten Runde der Evaluation der Bundeseinrichtungen mit F&E-Aufgaben durch den Wissenschaftsrat wurde die PTB vom 25. bis 27. September 2007 von einer 20-köpfigen Bewertungskommission begangen. Der Kommission gehörten neben drei Mitgliedern des Wissenschaftsrats und je einem Vertreter von Länder- bzw. Bundesseite 15 externe Gutachter aus dem Bereich der universitären wie der außeruniversitären Forschung an.

Eingerahmt von einem einleitenden und einem abschließenden Treffen mit der Leitung der PTB umfasste die Begehung auch 12 Besichtigungsblöcke mit Besuchen in Laboratorien an den Standorten Braunschweig und Berlin. Dazu kamen Gespräche der Bewertungsgruppe mit Vertretern des Kuratoriums, der Fachaufsicht sowie aus den Kreisen der universitären und außeruniversitären Kooperationspartner und der Kunden der PTB.

Zur Vorbereitung der Begehung war die PTB Anfang Mai 2007 aufgefordert worden, neben Angaben einer Reihe von Basisdaten einen 65 Punkte umfassenden Fragenkatalog zu beantworten, der die Themenbereiche Aufgabenstellung, Organisation und Management, Forschung und Entwicklung und wissenschaftsbasierte Dienstleistungen abdeckte. Aus den Antworten der PTB und den bereitgestellten Informationen erstellte die Geschäftsstelle des Wissenschaftsrats in Abstimmung mit der PTB und der Fachauf-

### Inspection of the PTB by the evaluation group of the Science Council

Within the scope of the second round of the evaluation by the Science Council of the federal institutes with R&D tasks, the PTB was inspected from 25 to 27 September 2007 by an evaluation commission of 20. The commission was composed of, in addition to three members of the Science Council and one state and one federal representative, 15 external experts from the area of university as well as non-university research.

Framed by an introductory and a concluding meeting with the head of the PTB, the inspection also encompassed 12 inspection blocks with visits to laboratories at the Braunschweig and Berlin sites. In addition, there were talks by the evaluation group with representatives of the Board of Consultants, the technical supervision as well as of the circles of the university and non-university cooperation partners and the customers of the PTB.

In preparation of the inspection, the PTB had been requested at the beginning of May 2007 to, besides providing information on a series of basic data, answer a question catalogue of 65 items which covered the subject areas assignment of tasks, organisation and management, research and development and scientifically based services. From the answers given by the PTB and the information provided, the business office of the Science Council prepared, in agreement with the PTB and the technical supervision in the BMWi, the so-called status report which forms the

sicht im BMWi den so genannte Sachstandsbericht, der die Einleitung des Evaluationsgutachtens bildet, das voraussichtlich im Mai 2008 vorliegen wird

### **Nachrichten aus CIPM und CGPM**

Vom 12. bis 16. November 2007 fand in Paris die 24. Generalkonferenz der Meterkonvention (CGPM) statt und verabschiedete u. a. die Empfehlung, dass zur nächsten Generalkonferenz in 2011 die vier Basiseinheiten Ampere, Kelvin, Kilogramm und Mol bezogen auf Fundamentalkonstanten neu definiert werden sollen. Für das Kilogramm gilt dabei die Einschränkung, dass zuvor die Diskrepanzen zwischen Avogadro-Experiment und den Wattwaagen-Experimenten zu klären sind.

Auf seiner der Generalkonferenz vorausgehenden Tagung wählte das CIPM Herrn Prof. Dr. Michael Kühne, Mitglied des Präsidiums der PTB, zum Nachfolger des 2010 aus dem Amt scheidenden derzeitigen Direktors des BIPM.

### **PTB an zwei Exzellenz-Clustern beteiligt**

Nachdem in der ersten Runde der Exzellenzinitiative das Graduiertenkolleg „Berlin School of Mind and Brain“ unter Beteiligung der PTB für die Förderung ausgewählt worden war, waren auch in der zweiten Runde der Exzellenzinitiative zwei Anträge unter Beteiligung der PTB erfolgreich: Die Exzellenz-Cluster QUEST – Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research – unter Leitung der Leibniz-Universität Hannover sowie NeuroCure – Towards a better Outcome of Neurological Disorders – unter Leitung der Humboldt-Universität zu Berlin.

QUEST widmet sich den Themengebieten Quanten-Engineering und Quantensensoren sowie der Physik der Raumzeit. Ein für die PTB wichtiger Teilaspekt wird die Nutzung der Quantenmetrologie für Tests fundamentaler physikalischer Gesetze sein. Im Rahmen von QUEST wird in der PTB ein gemeinsames Institut mit der Universität Hannover entstehen und eine Professur für „Experimentelle Quantenmetrologie“ sowie eine Nachwuchsgruppe „Atominterferometrie und Fundamentalkonstanten“ in der PTB eingerichtet.

Das Exzellenz-Cluster NeuroCure soll neurowissenschaftliche Grundlagenforschung und

introduction to the evaluation report, which will be finished presumably in May 2008.

### **News from CIPM and CGPM**

From 12 to 16 November 2007, the 24th General Conference of the Meter Convention (CGPM) took place in Paris and adopted, among other things, the recommendation that by the next General Conference in 2011, the four base units ampere, kelvin, kilogram and mole are to be newly defined, based on fundamental constants. For the kilogram, the limitation applies that the discrepancy between the Avogadro experiment and the watt balance experiments be clarified beforehand.

In the meeting preceding the General Conference, the CIPM elected Prof. Dr. Michael Kühne, member of the Presidential Board of the PTB, to succeed the present director of the BIPM who is leaving this office in 2010.

### **PTB participation in two clusters of excellence**

After the graduate college “Berlin School of Mind and Brain“ was selected for promotion in the first round of the excellence initiative, with the involvement of the PTB, also in the second round of the excellence initiative two applications with the involvement of the PTB were successful: The excellence cluster QUEST (Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research) under the direction of the Leibniz University of Hannover, as well as NeuroCure (Towards a better Outcome of Neurological Disorders) under the direction of the Humboldt University of Berlin.

QUEST is concerned with the subject areas quantum engineering and quantum sensors as well as the physics of space-time. A partial aspect important for the PTB will be the use of quantum metrology for tests of fundamental physical laws. Within the scope of QUEST, a joint institute with the University of Hannover will be created and a professorship for “Experimental Quantum Metrology“ as well as a junior group “Atomic Interferometry and Fundamental Constants“ will be established at the PTB.

The NeuroCure excellence cluster is to closely interlink neuroscientific basic research and clinical application to be able to transfer new knowledge on the function of the nervous

klinische Anwendung eng vernetzen, um neue Erkenntnisse zur Funktion des Nervensystems und dessen Erkrankungen rasch in effektive Therapien übertragen zu können.

Die Maßnahmen erhalten eine finanzielle Förderung von Sach- und Personalausstattung für die nächsten fünf Jahre mit einer weiteren fünfjährigen Verlängerungsmöglichkeit.

### **Braunschweig International Graduate School of Metrology (BIGSM)**

Mit der Ringvorlesung „Foundations of Metrology“ nahm die gemeinsam von der Technischen Universität Braunschweig und der PTB getragene internationale Graduiertenschule für Metrologie ihren Betrieb auf.

Da der im Rahmen der Exzellenzinitiative eingereichte Antrag zur Errichtung der Graduiertenschule mit knappem Ergebnis nicht erfolgreich,

jedoch an sich fachlich sehr positiv begutachtet worden war, gelang es, das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) für eine finanzielle Unterstützung der Graduiertenschule in einer Gesamthöhe von 1 Mio. Euro für 5 Jahre zu gewinnen. Damit konnten erste Stipendien ausgeschrieben und die Position des für das Curriculum zuständigen „Course Directors“ besetzt werden. Die Förderzusage gilt zunächst für ein Jahr und für die weiteren 4 Jahre unter der Voraussetzung einer erfolgreichen Prüfung des Erreichten durch das MWK nach dem ersten Jahr.

### **Gründung des Innovations- und Patentverbundes Braunschweig**

Zur Stärkung der Patentverwertung und des Technologietransfers haben am 18.9.2007 die TU Braunschweig, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und die PTB eine enge regionale Zusammenarbeit beschlossen. Alle beteiligten Institutionen arbeiten seit Jahren auf dem Gebiet der Forschung und

system and its diseases quickly into effective therapies.

The measures receive financial aid of material equipment and personnel for the next five years with a possibility of extending for a further five years.

### **Braunschweig International Graduate School of Metrology (BIGSM)**

With the ring lecture “Foundations of Metrology“, the International Graduate School of Metrology – borne jointly by the Technical University of Braunschweig and the PTB – commenced operations.

As the application submitted within the scope of the excellence initiative for the founding of the Graduate School was not successful with a close result, but actually received a positive evaluation technically speaking, it was possible to win over the

*Niedersächsisches*

*Ministerium für Wissenschaft und Kultur* (MWK) (Ministry for Science and Culture of Lower Saxony) for financial aid of the Graduate School in a total amount of 1 million Euro for 5 years. As a result, initial stipendia could be announced and the position of “course directors“, responsible for the curriculum, could be filled. The promise of aid applies initially for one year and for the remaining 4 years under the presupposition of successful testing by the MWK of the achievements after the first year.

### **Founding of the Innovation and Patent Association of Braunschweig**

To strengthen patent exploitation and technology transfer, the TU Braunschweig, the *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) (German Aerospace Centre) and the PTB agreed on 18 September 2007 to a close regional cooperation. All participating institutions have been working together intensively and bilaterally for years in the field of research and development and with this step





Beschlossener Patentverbund (v. l. n. r.): Prof. Dr. M. Kühne (PTB), Prof. Dr. M. Bahadir (TU), Dr. R.-D. Fischer (DLR)

The agreed Patent Association (from left to right): Professor Dr. M. Kühne (PTB), Professor Dr. M. Bahadir (TU), Dr. R.-D. Fischer (DLR)

Entwicklung intensiv bilateral zusammen und vernetzen mit diesem Schritt ihre Nutzungsstrategien für Patente auf der Grundlage eines bei der PTB bereits umgesetzten Konzepts der Patentverwertung.

#### „Besuch aus dem Ministerium“

Anlässlich der Gründung des EURAMET e.V. am 11. Januar 2007 besuchte der u.a. für die Mittelstandspolitik und damit seinerzeit für die PTB zuständige Staatssekretär Dr. Walter Otremba das Institut Berlin der PTB.

Zum 1. Juni 2007 wurde im BMWi die neue Abteilung „Technologiepolitik“ eingerichtet, in welcher nun auch die Fachaufsicht über die PTB angesiedelt ist. Referatsleiter der Fachaufsicht ist weiterhin MinR Norbert Barz; der für die Abteilung zuständige Staatssekretär ist Dr. Joachim Wuermeling.

Der Leiter der neuen Abteilung „Technologiepolitik“, MinDir Detlef Dauke kam am 22. August 2007 in die PTB in Braunschweig zu einem Antrittsbesuch.

are interlinking their strategies for the use of patents on the basis of a concept of patent exploitation already implemented at the PTB.

#### Visitors from the ministry

On the occasion of the founding of EURAMET e.V. on 11 January 2007, Dr. Walter Otremba, responsible for, among other things, small and medium-sized business policy and therefore for the PTB at that time, visited the Berlin Institute of the PTB.

By 1 June 2007, the new “Technology Policy” division in the BMWi was set up, in which also the technical supervision of the PTB is now located. Norbert Barz continues as head of the technical supervision; responsible for the division is Dr. Joachim Wuermeling.

On 22 August 2007, Detlef Dauke, head of the new division “Technology Policy” visited the PTB in Braunschweig for an inaugural visit.

## Qualitätsmanagementsystem (QMS)

Die Weiterentwicklung des QMS der PTB wurde kontinuierlich fortgesetzt und an geänderte gesetzliche Anforderungen (z. B. Informationsfreiheitsgesetz) sowie an nationale und internationale Vereinbarungen angepasst. Davon waren alle Geschäfts- und Tätigkeitsbereiche betroffen.

Basis des QMS bilden weltweit anerkannte Anforderungen an die Kompetenz von Laboratorien (DIN EN ISO/ IEC 17 025) und die Empfehlungen der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur guten wissenschaftlichen Praxis. Seit Mai 2007 ist die Übergangsphase zur Einführung und Anwendung der Neufassung der überarbeiteten Norm abgeschlossen. Unter Berücksichtigung ihres eigenen Tätigkeitsspektrums haben die Abteilungen der PTB die Änderungen und die bisherigen Erfahrungen umfassend diskutiert und Vorschläge für eine praxisnahe Ausgestaltung der internen Regelungen entwickelt. Dies führte zur Überarbeitung von 11 QM-Verfahrensweisungen und zahlreicher nachgeordneter QM-Regelungen. Alle Anforderungen waren Bestandteil des internen Selbstbewertungsprozesses durch das Management.

Der Ausschuss „Qualitätsmanagement“ hat diese Prozesse gelenkt und geleitet. Dabei stand die kontinuierliche Bereitstellung einer qualitativ hochwertigen nationalen messtechnischen Infrastruktur für einen möglichst breiten Kreis von Nutzern ebenso im Vordergrund wie die Anpassung an neue Herausforderungen und an verminderte Ressourcen.

Zur umfassenden Information steht unseren Kunden und Partnern neben den Mess- und Kalibriermöglichkeiten seit 2007 auch das vollständige QM-Handbuch der PTB im Internet zur Verfügung.

## Erweitertes Leistungsangebot

Im Rahmen des multilateralen Abkommens zur gegenseitigen Anerkennung der nationalen Normale und der entsprechenden Ergebnisberichte der nationalen Metrologieinstitute (CIPM-MRA) konnten die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB in den Metrologiegebieten Elektrizität und Magnetismus, Photometrie und Radiometrie, Länge sowie in der Chemie ausgebaut bzw. bestätigt werden.

## Quality management system

The further development of PTB's quality management system has been continued and adapted to modified legal requirements (e.g. the Freedom of Information Act), as well as to national and international agreements. This concerned all levels of business and activities.

The basis of the quality management system is established by worldwide recognised requirements for the competency of laboratories (DIN EN ISO IEC 17 025) and the recommendations of the German Research Community for good scientific practice. Since May 2007, the transition phase for the introduction and implementation of the reviewed standard has been completed. Taking into account their own range of activities, the departments of PTB have exhaustively discussed the modifications and the experience gained up to now and developed propositions for a practice-oriented formulation of the internal regulations. This led to the revision of eleven quality management working instructions and numerous subordinate quality management regulations. All requirements were part of the internal self-assessment process by the management.

The "Quality Management" committee steered and guided these processes. Thereby, the continuous provision of a qualitatively high-value national metrological infrastructure for the widest possible circle of users has been the focal point in the same way as the adaptation to new requirements and reduced resources.

In order to keep our clients and partners informed, besides the metrological and calibration capabilities, also PTB's complete quality manual has been available on the Internet since 2007.

## Extended service spectrum

Within the scope of the multilateral agreement for the mutual recognition of the national standards and of the corresponding result reports of the national metrology institutes (CIPM-MRA), the calibration and measuring capabilities at PTB could be extended or confirmed in the metrological fields of electricity and magnetism, photometry and radiometry, length, as well as chemistry. A

Voraussetzung hierfür ist der dauerhafte und wirksame Betrieb eines QMS. Durch ein international vereinbartes Evaluierungsverfahren wird das jährlich überprüft. Nach jeweils fünf Jahren ist dann eine erneute grundlegende Evaluierung des Qualitätsmanagementsystems gefordert.

### Peer-Review und Bewertung

Diese Re-Evaluierung wurde Ende Februar 2007 vom EURAMET TC-Quality durchgeführt. Dabei hat die PTB erfolgreich nachgewiesen, dass die Anforderungen des CIPM-MRA hinsichtlich des Qualitätsmanagementsystems in vollem Umfang erfüllt werden. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die uneingeschränkte weltweite Anerkennung der Ergebnisberichte für mehr als 1400 Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB. Unmittelbar sichtbar wird diese herausgehobene Position im Konzept der messtechnischen Rückführung seit kurzem durch die Verwendung eines speziellen Logos zum CIPM-MRA. Hierzu hat der Präsident der PTB eine zusätzliche Vereinbarung unterzeichnet, die die Nutzung des Logos regelt.

precondition, therefore, is the durable and effective operation of a quality management system. This is verified every year by an internationally agreed-upon evaluation procedure. Every five years, a new basic evaluation of the quality management system is required.

### Peer review and assessment

This re-evaluation was carried out by EURAMET TC Quality at the end of February 2007. PTB thereby successfully proved that the requirements of the CIPM-MRA with regard to the quality management system are totally fulfilled. This is an essential precondition for the unlimited worldwide recognition of the result reports for more than 1400 calibration and measuring capabilities at PTB. This top position has lately become directly evident within the scope of the concept of metrological traceability to the CIPM-MRA by the use of a special logo. For this purpose, PTB's president has signed an additional agreement which regulates the use of the logo.



## Praktische Erfahrungen mit der Europäischen Messgeräte Richtlinie

Seit dem 30. Oktober 2006 ist die Richtlinie 2004/22/EG über Messgeräte (MID) anzuwenden, allerdings ist die Umsetzung nicht in allen Mitgliedstaaten fristgemäß erfolgt. Die PTB hat rechtzeitig die erforderlichen Vorbereitungen getroffen und führt seit dieser Zeit als benannte Stelle die von deutschen und ausländischen Herstellern beantragten Konformitätsbewertungen durch. Diese Hersteller sind überwiegend an Baumusterprüfungen und Anerkennungen von Qualitätsmanagementsystemen nach den Modulen B und D interessiert.

Ebenso wie in Deutschland werden in den meisten Mitgliedstaaten alle in der MID genannten Messgerätearten gesetzlich geregelt. Einige Mitgliedsstaaten haben allerdings in ihren Ländern weniger bedeutende Messgerätearten nicht in nationales Recht übernommen. Eine Analyse zu den nationalen Unterschieden einschließlich der Anforderungen nach dem Inverkehrbringen hat die PTB im Rahmen der Arbeitsgruppe „Messgeräte“ bei der Kommission der EU erarbeitet.

Diese Arbeitsgruppe hat auch sämtlichen von WELMEC (European cooperation in legal metrology) erarbeiteten Leitfäden zur einheitlichen Interpretation und Anwendung der MID zugestimmt, so dass diese Dokumente auf der Internetseite der Europäischen Kommission aufgeführt sind. Dies ist als Zeichen der Kommission für ihre Identifikation mit den Arbeitsergebnissen von WELMEC zu werten. Bisher sind beispielsweise Leitfäden zur Anerkennung benannter Stellen, zur Anwendung der Konformitätsbewertungsmodule B, D und H1 und für Softwareprüfungen veröffentlicht. Die Ergebnisse der Konformitätsbewertungen der benannten Stellen werden überwiegend in nationalen Datenbanken veröffentlicht, die zur Unterstützung der Marktaufsichtsbehörden zu einem europäischen Portal zusammengeführt werden sollen. Hierzu hat eine WELMEC-Arbeitsgruppe unter Leitung der PTB einen Auftrag zur Umsetzung erhalten.

Aufgrund unterschiedlicher Sprachfassungen der MID musste sich die Arbeitsgruppe „Messinstrumente“ mit den Interpretationen der Einseitigkeitsbedingung bei den Mess-

## Practical experience with the European Measuring Instruments Directive

Since October 30, 2006, Directive 2004/22/EU on measuring instruments (MID) has been applicable; however, it has not been implemented in due time by all member states. PTB has completed the required preparations on time and has, as notified body, since then been carrying out the conformity assessments applied for by German and foreign manufacturers. These manufacturers are mostly interested in type examinations and recognitions of quality systems according to modules B and D.

In most member states, just as in Germany, all measuring instrument categories mentioned in the MID are legally regulated. Some member states, however, have not integrated less important measuring instrument categories into their national law. An analysis with regard to the national differences including the requirements after the placing on the market was elaborated by PTB within the scope of the working group “Measuring Instruments” at the EU Commission.

This working group has also approved all guides on the uniform interpretation and application of the MID which have been elaborated by WELMEC (European Cooperation in Legal Metrology) so that these documents are listed on the European Commission’s website. This can be interpreted as a sign set by the Commission to show its identification with the results of WELMEC’s work. Up to now, guides on the recognition of notified bodies, on the application of the modules of conformity assessment B, D and H1 and for software tests have been published. The results of the conformity evaluations of the notified bodies are mainly published in national databases. It is planned to pool these into a single common European portal in order to support the work of the market surveillance authorities. A WELMEC working group headed by PTB has received an order of implementation in this regard.

Due to MID versions in different languages, the working group “Measuring Instruments” had to deal with the interpretations of the consumer protection clause for measurement deviations of gas meters – all the more so as

abweichungen von Gaszählern beschäftigen, zumal erhebliche wirtschaftliche Konsequenzen damit verknüpft sind. Ebenso problematisch und noch nicht abschließend geklärt ist der Austausch von Komponenten bei Messsystemen für Flüssigkeiten bei Tankstellen, da diese Komponenten nach bisherigem Recht jeweils gesonderte Bauartzulassungen erhalten konnten, während die MID nur eine Konformitätsbewertung für das vollständige Messsystem mit teilweise veränderten Anforderungen an die Komponenten erlaubt.

Von deutscher Seite wurde auch das Problem der unzureichenden Störfestigkeit bei nicht-selbsttätigen Waagen an die Arbeitsgruppe „Messgeräte“ herangetragen. Die PTB hat hierzu bereits erste Messergebnisse ermittelt und wird mit Hilfe einer in der PTB entwickelten Prüfeinrichtung weitere nachvollziehbare Messergebnisse vorlegen, um auf dieser Grundlage eine europäische Diskussion über zweckmäßige Störfestigkeitsanforderungen und über Maßnahmen zur Vermeidung von Manipulationen zu ermöglichen. Zu den Themen mit fachpolitischem Charakter zählt auch die Liberalisierung der Energiemärkte in Europa sowie die Richtlinie über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen. Von künftigen Elektrizitäts- und Gaszählern werden zusätzliche Funktionen erwartet, die derzeit nicht vollständig von der MID erfasst werden. Zur Einbindung dieser so genannten Smart-Meter in die MID sind erste Überlegungen erfolgt.

Die neben der MID noch bestehenden EWG-Richtlinien nach dem „Alten Ansatz“ auf der Grundlage der Rahmenrichtlinie 71/316/EWG können wegen fehlender Mehrheiten bei Abstimmung durch die Mitgliedstaaten nicht ersatzlos gestrichen werden. Somit sollen diese Messgerätearten die MID mit weiteren messgerätespezifischen Anhängen ergänzen. Hierzu hat die PTB die Aufgabe übernommen, für Getreideprober und für Reifendruckmessgeräte entsprechende Entwürfe zu erarbeiten und diese in den europäischen Gremien sowie mit der Industrie abzustimmen

the economic consequences which are linked to that clause are considerable. The issue of the exchange of components of measuring systems for liquids at petrol filling stations is also still a problem and has not been totally sorted out yet as so far, according to the laws in application up to now, separate type approvals could be issued for these components, whereas the MID allows only one conformity evaluation for the complete measuring system and partially differing component requirements.

At the German end, the working group “Measuring Instruments” has been entrusted with the issue of the insufficient electromagnetic compatibility of non-automatic weighing instruments. In this respect, PTB has already determined first measurement results and will, by means of a testing facility which was developed at PTB, present further, traceable results in order to provide a solid basis for a discussion at the European level on appropriate requirements for electromagnetic compatibility and on measures to avoid manipulations. One of the topics with a political background is the liberalisation of the energy markets in Europe, as well as the directive on energy efficiency and energy services. It is expected that future power and gas meters will have additional functions which are not yet completely covered by the MID. First reflections have taken place on how to incorporate these so-called “smart meters” in the MID.

The EEC directives which are based on the “old approach” and on the framework directive 71/316/EEC and are still valid alongside with the MID, cannot be abrogated without replacement because of the lack of a majority vote of the member states. Thus, these measuring instrument categories are intended to complement the MID with further measuring-instrument-specific annexes. For this purpose, PTB has taken on the task of elaborating drafts for grain probers and tyre pressure gauges and to bring these into agreement with the European bodies and industry.

## Gericht bestätigt PTB-Umgang mit vertraulichen Daten

Ein Gerichtsurteil hat den in der PTB-Praxis üblichen, sehr restriktiven Umgang mit sensiblen Daten ausdrücklich bestätigt. Damit wird die PTB auch in Zukunft dafür einstehen, dass sich jeder Hersteller bei Zulassungen und technischen Prüfungen vertrauensvoll und offen an sie wenden kann und eine Preisgabe seines Know-hows an Dritte nicht befürchten muss.

In dem konkreten Fall hatte eine Firma die PTB mit der Prüfung eines komplexen Geräts beauftragt. Für die Erstellung des Prüfberichts musste sie gegenüber der PTB die konstruktiven Details und auch die eingesetzte Software vollständig offenlegen. Wegen einer kontroversen, öffentlich geführten Diskussion über den Einsatz dieses Gerätes beehrte ein Wissenschaftsjournalist Einblick in sämtliche bei der PTB vorhandenen Geräteunterlagen. Dabei berief er sich auf das seit Anfang 2006 geltende Informationsfreiheitsgesetz (IFG), das in § 1 jedermann gegenüber Behörden des Bundes einen Anspruch auf Zugang zu amtlichen Informationen gibt.

Die PTB machte – nach Abstimmung mit dem Hersteller – dem Journalisten den allgemein gehaltenen Prüfbericht zugänglich, lehnte jedoch die Übersendung der dazugehörigen Anlagen, darunter der Quellcode der eingesetzten Software sowie Beschreibungen der Leistungsmerkmale und Abläufe des Gerätes, ab. Das Verwaltungsgericht Braunschweig, an das sich der Journalist wandte, wies seine Klage im Wesentlichen ab. Unter Bezug auf § 6 IFG kommt es zu dem Ergebnis, dass der Anspruch auf Zugang zu amtlichen Informationen durch den bestehenden Schutz geistigen Eigentums sowie durch Betriebs- oder Geschäftsgeheimnisse begrenzt wird, und bestätigt hier die Auffassung der PTB. Hervorgehoben wurde in der Urteilsbegründung auch, dass die PTB, wenn sie über hinreichende Kenntnisse verfügt, eigenständig darüber entscheiden darf, ob Betriebs- oder Geschäftsgeheimnisse vorliegen. Die Entscheidung des Gerichts ist mittlerweile rechtskräftig geworden.

## Court confirms PTB handling of confidential data

A court verdict has expressly confirmed the very restrictive handling of sensitive data that is the usual practice in the PTB. This means that also in the future the PTB will still guarantee that each manufacturer can turn to it for approval and technical testing in confidence and without any reserve and will not have to be afraid that its know-how will be divulged to third parties.

In the case in question, a company commissioned the PTB to test a complex device. It had to disclose the design details and also the software applied completely to the PTB so that the test report could be issued. A scientific journalist wanted to see all the documents about the device which were at the PTB, because of a controversial public discussion about the use of that device. In doing so, he referred to section 1 of the Freedom of Information Act (Informationsfreiheitsgesetz) (IFG) which has been in force since the beginning of 2006 and entitles everyone to have access to official information from federal authorities.

The PTB gave the journalist access to the generally worded test report – following the manufacturer's agreement – but refused to hand over the related documents, including the source code of the software applied as well as the descriptions of the user facility and device processes. The journalist turned to the Administrative Court of Braunschweig which in essence dismissed his case. With reference to section 6 of the IFG, it was concluded that the claim for access to official information is limited by the existing protection of intellectual property as well as by company or trade secrets and thus confirms the PTB's opinion here. In the reasons for the verdict, it was also emphasised that the PTB is permitted to make its own decisions as to whether company or trade secrets apply, if it possesses sufficient knowledge. In the meantime, the decision of the court has become final.

## Unsichtbar und unverzichtbar – Qualitätsinfrastruktur

Qualitätsinfrastruktur ist ein Sammelbegriff für alle jene Maßnahmen, die erforderlich sind, um die Übereinstimmung von Waren und Dienstleistungen mit den Vorgaben des Staates zum Schutz seiner Bürger (technischen Regeln) oder die Einhaltung der von den Kunden geforderten Standards nachzuweisen. Konformitätsbewertungen benötigen ein anerkanntes Qualitätsmanagement, es sind Messgeräte erforderlich, deren Messgenauigkeit festgestellt wurde, und es sind Prüflaboratorien notwendig, deren Kompetenz bestätigt ist etc. Alle jene aber, die Kalibrierungen durchführen, Akkreditierungen erteilen oder Zertifikate ausstellen, müssen wiederum ihre Fähigkeiten unter Beweis gestellt haben. Dies alles ist ein komplexes Netzwerk, welches fest mit internationalen Standards verbunden ist.

Der Aufbau eines solchen Netzwerks bedeutet für Entwicklungsländer eine große und auch kostspielige Herausforderung. Nur wenige von ihnen sind in der Lage, dieses aus eigener Kraft zu bewerkstelligen. Deshalb beteiligt sich die PTB durch Projekte zum Auf- und Ausbau der Qualitätsinfrastruktur und deren Komponenten des Mess-, Normen-, Prüf- und Qualitätswesens, der Akkreditierung und Zertifizierung daran, die Voraussetzungen für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung zu verbessern und die Teilnahme von Entwicklungsländern am Welthandel zu erleichtern. Diese Ziele werden zunehmend durch regionale Projekte verfolgt, die die Realisierung regionaler Märkte unterstützen und den Aufbau regionaler Qualitätsinfrastrukturen fördern. Von den insgesamt 35 vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, BMZ, finanzierten Projekten verfolgen zwölf einen regionalen oder sektoralen Ansatz. Im Auftrag der EU werden sechs Projekte und mit anderen Gebern, wie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und der Weltbank, weitere Projekte durchgeführt.

Im Jahr 2007 wurden 22 Länder in vier Kontinenten durch 25 bilaterale Projekte beim Aufbau ihrer Qualitätsinfrastruktur unterstützt. Eine ganze Reihe weiterer Länder profitierte von insgesamt 18 regionalen und

## Invisible and indispensable – quality infrastructure

Quality infrastructure is a collective term for all those measures which are necessary to prove the compliance of goods and services with state guidelines on the protection of citizens (technical rules) or the compliance with standards required by consumers. Conformity assessment necessitates recognised quality management, measuring instruments are required whose accuracy of measurement has been ascertained, and testing laboratories are necessary whose competence has been confirmed etc. All those, however, who undertake calibration, award accreditation or issue certificates have to, in turn, prove their capabilities. All this is a complex network which is firmly linked to international standards.

Setting up such a network means a large and also costly challenge for developing countries. Only a few of them are in a position to accomplish this themselves. The PTB, therefore, contributes to improving the pre-requisites for economic and social development and facilitating the participation of developing countries in world trade, through projects for setting up and extending quality infrastructure and its components of metrology, standardisation, testing and quality assurance, as well as accreditation and certification. These goals are increasingly being followed up by regional projects which support the realisation of regional markets and assist the setting up of regional quality infrastructures. Twelve of the total of 35 projects financed by the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ) are following a regional or sector-specific approach. Six projects are being carried out by order of the EU and further projects are being undertaken with other donors, such as the Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) and the World Bank.

In 2007, 22 countries in four continents were supported in the setting up of their quality infrastructure by 25 bilateral projects. A whole range of other countries profited from a total of 18 regional and sectoral projects. Germany's financial contribution amounted to over 5.5 million EUR. Around 3 000 experts from 49 countries were able to take part in ad-

sektoralen Projekten. Der finanzielle deutsche Beitrag betrug über 5,5 Mio. EUR. Etwa 3000 Fachkräften aus 49 Ländern wurde eine Fortbildung in Fachinstituten in Deutschland und anderen Ländern ermöglicht. Es wurden 120 Stipendiaten aus 36 Ländern über insgesamt mehr als 38 Monate in der PTB, der Deutschen Akademie für Metrologie (DAM), der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), in Firmen und Universitäten, in Laboratorien des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) und in metrologischen Staatsinstituten fortgebildet.

### Ein Poster geht um die Welt

Ob das Trinkwasser rein, die Luft sauber oder der Boden mit Schadstoffen belastet ist, lässt sich mit bloßem Auge nicht erkennen. Auch Klimawandel, Strahlungsbelastungen oder gesundheitsschädlicher Lärm können quantitativ nur mit Hilfe geeigneter Messtechnik festgestellt werden. „Messen für unsere Umwelt“ war deshalb das Thema des diesjährigen Weltmetrologietages.

Wie jedes Jahr gab es dazu neben zahlreichen Fest- und Informationsveranstaltungen auch ein Motto-Poster, um möglichst vielen Menschen und nicht zuletzt den kleinen und mittelständischen Betrieben der Schwellen- und Entwicklungsländer die Bedeutung der Metrologie darzustellen.

Auf Initiative des Internationalen Büros für Maß und Gewicht BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) in Paris wurde das Motto-Poster erstmals in alle wichtigen Verkehrssprachen übersetzt: Es ist in Englisch zu lesen, in Französisch, Italienisch, Spanisch, Portugiesisch, Chinesisch, Russisch und Arabisch, natürlich in Deutsch und sogar in japanischer sowie albanischer Sprache.

Der Entschluss, ein Poster für die ganze Welt zu gestalten, gründet auf dem großen Erfolg der Poster-Aktionen in den vergangenen Jahren. Die Poster wurden dabei stets vom südafrikanischen nationalen Metrologieinstitut NMISA und der PTB entworfen und verteilt. Sie zeigten im Jahr 2006 beispielsweise eine handgemalte Bildergeschichte, in der das sprechende Stethoskop „Sam“ die medizinische Messtechnik im Krankenhaus erklärt.

vanced training measures in specialised institutions in Germany and other countries. 120 scholarship holders from 36 countries were all together trained for more than 38 months in the PTB, the German Academy of Metrology (DAM), the Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), in companies and universities, in the labs of the German Calibration Service (DKD) and in metrological state institutes.

### A poster goes around the world

You cannot see with your bare eyes if drinking water is pure, the air is clean or the earth is polluted. Climate change, radiation exposure or noise which harms health can also only be determined quantitatively with the help of suitable measurement technology. “Measurements in our environment” was therefore the theme of this year’s World Metrology Day.

A thematic poster was also produced, as every year, besides the large number of celebratory and information events, to demonstrate the importance of metrology to as many people as possible and not least to small and medium-sized companies in developing and threshold countries.

The poster was translated into all the important languages for the first time on the initiative of the BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) in Paris: it can be read in English, French, Italian, Spanish, Portuguese, Chinese, Russian and Arabic, in German, of course, and even in Japanese as well as Albanian.

The decision to create a poster for the whole world was based on the large success of the poster actions in previous years. The posters have always been designed and distributed by the South-African National Metrology Institute NMISA and the PTB. In 2006, for example, they showed a story drawn by hand, in which the speaking stethoscope “Sam” explains medical measurement techniques in a hospital. It is still hanging in many African doctor’s surgeries, kindergartens and schools today.

Es hängt noch heute in vielen afrikanischen Arztpraxen, Kindergärten und Schulen.

### Geschichte des Weltmetrologietages

Im Oktober 1999 kürte die 21. Generalkonferenz für Maß und Gewicht CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures) den 20. Mai zum seither alljährlich gefeierten „Weltmetrologietag“. Der Hintergrund: Am 20. Mai 1875 unterzeichneten 17 Staatsvertreter aus der ganzen Welt in Paris die so genannte Meterkonvention und verpflichteten sich damit, Maße und Gewicht international zu vereinheitlichen und die dafür nötigen Organisationsformen zu schaffen. Inzwischen haben über 50 Staaten die Meterkonvention ratifiziert.

### The history of World Metrology Day

In October 1999, the 21<sup>st</sup> General Conference on Weights and Measures (CGPM) (Conférence Générale des Poids et Mesures) chose 20<sup>th</sup> May to be the annual “World Metrology Day” from then on. The background: on 20<sup>th</sup> May 1875, 17 representatives of nations from all over the world signed the so-called Meter Convention in Paris and thereby committed themselves to unifying measurements and weights at an international level and to create the organisational forms necessary for this. More than 50 nations have since ratified the Meter Convention.



## Stadt der Wissenschaft 2007

Das vergangene Jahr hatte – genau genommen – 430 Tage. Denn exakt diese Zeitspanne lag zwischen Start und Ziel des Veranstaltungsjahres „Stadt der Wissenschaft 2007“. Mit diesem Titel ehrte der Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft im nationalen Ausscheidungswettbewerb im Frühjahr 2006 die Stadt Braunschweig (Braunschweigs Konkurrenten auf der Zielgeraden waren Freiburg und Aachen) und gab der Stadt damit gleichzeitig ein großes Aufgabenpaket für das Jahr 2007 mit auf den Weg. Ein Aufgabenpaket, das eine verstärkte Öffentlichkeitsarbeit beinhaltete und welches Stadt, Wirtschaft und Wissenschaft gemeinsam schultern mussten. Angesichts der wissenschaftlichen Bedeutung der PTB in der internationalen Welt des Messens war es keine Frage, auch in diesem speziellen Veranstaltungsjahr eine angemessene Rolle zu übernehmen. Entsprechend engagierte sich die PTB, insbesondere die Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, nicht nur bei zahlreichen Aktionen und Veranstaltungen, sondern initiierte und organisierte viele davon aus eigener Kraft.



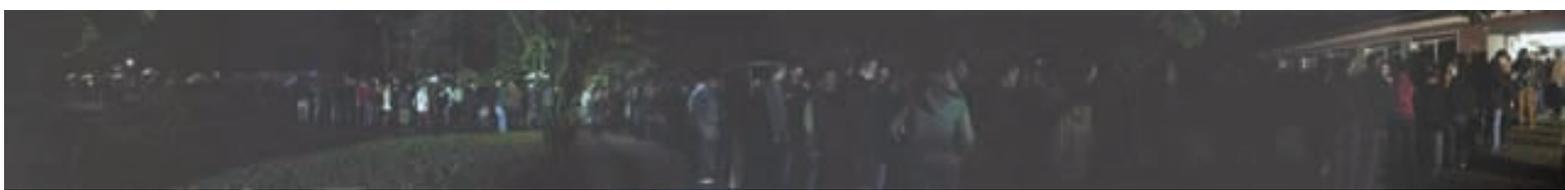
Die PTB hatte die Ehre, die Vorspeise zur „Ideenküche Braunschweig“ – so das generelle Motto des Jahres – zu servieren. Vor dem Hintergrund, ein „ausgezeichneter Ort im Land der Ideen“ zu sein, lud die PTB am 28. Oktober 2006 anlässlich der Zeitumstellung von Sommer- auf Normalzeit zur „Langen Nacht der Zeit“. Ein Ereignis, das sich wissenschaftlich, künstlerisch, kulturell

## City of Science 2007

Last year had 430 days – to be exact. Because that was exactly the length of time from the start to the end of the events organised in the “City of Science 2007”. The *Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft* (Founders’ Federation for Science in Germany) honoured the City of Braunschweig with this title in a national competition in the spring of 2006 (in the final round Braunschweig’s competitors were Freiburg and Aachen) and in doing so simultaneously gave the city a long “to-do list” for 2007. A to-do list that had increased publicity on it and had to be shouldered jointly by the city, business and science. In view of the scientific importance of the PTB in the international world of measurement, there was no question of the PTB also taking on an appropriate role in this special year of events. The PTB, especially the Press and Information Office, accordingly not only got involved with the numerous actions and events, but initiated and organised many of them itself.

The PTB had the honour of serving the starters for Braunschweig’s “Kitchen of Ideas” – in line with the general slogan of the year. Having been awarded a “distinguished place in the country of ideas”, the PTB invited visitors to the “Long Night of Time” on 28<sup>th</sup> October 2006. An event which looked at the concept of time from scientific, artistic and cultural viewpoints, all in an entertaining way, and that – somewhat unexpectedly – attracted over 10 000 visitors to the PTB. That night, which mixed science and culture so unusually, will stay anchored in the region’s memory for a long time.

After this positive start, the year 2007 itself, began punctually for the PTB on the first working day of the New Year: with the start of the daily column “Und täglich grüßt die Wissenschaft” (Science news every day). No less than one short article each day, every one filled with a scientific core, had to be published over the whole year – both in the regional newspaper the Braunschweiger



und insgesamt unterhaltend mit dem Zeitbegriff auseinandersetzt und das – so nicht erwartet – über 10 000 Besucher auf das PTB-Gelände lockte. Diese Nacht, die auf ungewöhnliche Weise Wissenschaft und Kultur mixte, wird im Gedächtnis der Region für lange Zeit verankert bleiben.

Nach diesem Auftakt fing das Veranstaltungsjahr 2007 für die PTB dann pünktlich am ersten Werktag des neuen Jahres an: mit dem Start der Kolumnenserie „**Und täglich grüßt die Wissenschaft**“. Nicht weniger als eine Glosse pro (Zeitungs)Tag, jeweils mit einem wissenschaftlichen Kern gespickt, galt es über das Kalenderjahr hinweg zu publizieren – einerseits in der regionalen Braunschweiger Zeitung, andererseits auf der Internetplattform der Stadt. Die Pressestelle der PTB übernahm die Redaktion dieses Projektes und schickte sich selbst sowie zahlreiche freie Autorinnen und Autoren auf die Reise in die regionale Vielfalt der Forschung. Die in Glossen verpackten Wissenschaftsnachrichten erreichten gerade aufgrund ihrer Stilform auch Leser, die sonst um die Wissenschaftsseiten der großen Tages- und Wochenzeitungen eher einen Bogen machen.

Ein breites Publikum fand auch die Vortragsreihe „**Zeit für die Zeit**“, die im Rahmen des Projekts „Zeitphänomene“ über das Jahr verteilt zu fünf Terminen (jeweils Freitags, 19 Uhr) in die Aula der Technischen Universität



Zeitung, as well as on the city's internet platform. The PTB's Press Office took on the editorship of this project and sent its staff, along with numerous freelance writers, on trips into the region's diverse places of research. Due to its style, the scientific news, served in short columns, reached even those readers who might otherwise avoid the science pages of the daily and weekly papers.

Und täglich grüßt  
die Wissenschaft



The series of lectures "**Time for Time**" also found a wide audience in the framework of the project "Phenomena of Time" spread over the year on five occasions (each time on Fridays at 7:00 pm) in the lecture hall of the Technical University Braunschweig, the future House of Science. A total of 800 attendees were told how you can tilt, feel, manage, stretch, gather and "make" time by appropriate experts: film makers and psychologists, time managers and physicists.

The chance of looking "**Behind the scenes**" while visiting the PTB earned a good response. Once a month, 20 to 30 people were able to register for a special evening tour (on matter or art, light or time) through some of the PTB's labs, lasting from two to three hours. These special groups of visitors supplemented the PTB's usual visitor programme, which 97 groups (including three teacher training courses) signed up for last year.

In June 2007 the PTB went to the city centre and took part in the big scientific event "**Science takes place**" at Braunschweig's Burgplatz and in the "**Science Cubes**" at Platz der Deutschen Einheit. Thematically, the PTB presented itself with scales and weighing technology as well as with the new Gravity Information System, which gives every user (in particular: manufacturers of weighing instruments) the local gravitational acceleration for every place on Earth via the internet.

Braunschweig, im zukünftigen Haus der Wissenschaft, einlud. Wie man Zeit kippen, empfinden, managen, dehnen, raffern und „machen“ kann, erfuhren insgesamt 800 Zuhörer von entsprechenden Experten: von Filmmachern und Psychologen, von Zeitmanagern und Physikern.

Gute Resonanz fand auch das Angebot, bei einem Besuch der PTB einen Blick „Hinter die Kulissen“ zu werfen. Jeweils einmal im Monat konnten sich 20 bis 30 Personen für eine abendliche, thematische Führung (von Masse bis Kunst, von Licht bis Zeit) von zwei bis drei Stunden Dauer durch einige Laboratorien der PTB anmelden. Diese speziellen Besuchergruppen erweiterten das gewohnte Besuchsprogramm der PTB, zu welchem sich im letzten Jahr 97 Gruppen (darunter drei Lehrerfortbildungen) angemeldet hatten



September was then the big month for visits. So many applications were received from all over Germany for **Pupils' Day** (7<sup>th</sup> September) that only half (around 1000 pupils and students) were able to attend. Each group of pupils had its own pre-arranged visit programme through various labs. One day later (on 8<sup>th</sup> September) the PTB organised its **Open Day** with an extended programme of events (ranging from live music to football coverage). A total of 4000 visitors made a detour to the land of measurements and mixed their own physics cocktails, in line with the slogan of the day.



Im Juni 2007 ging die PTB in die Mitte der Stadt und beteiligte sich an der großen Wissenschaftsaktion „**Wissen findet Stadt**“ auf dem Braunschweiger Burgplatz und an den „**Science Cubes**“ auf dem Platz der Deutschen Einheit. Thematisch präsentierte sich die PTB mit Waagen und Waagenmesstechnik sowie mit dem neuen Schwere-Informationssystem, das via

Internet jedem Anwender (im Besonderen: den Herstellern von Waagen) die lokale Erdbeschleunigung für jeden Ort der Erde angibt.

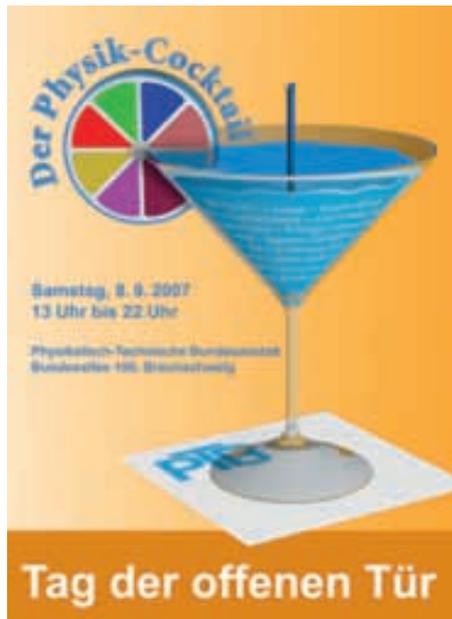
Der große Besuchermont war sodann der September. Zum **Schülertag** (am 7.9.) waren die Anmeldungen aus ganz Deutschland derart zahlreich, dass nur die Hälfte (etwa 1000 Schüler) eine Zusage bekommen konnte. Für jede Schülergruppe gab es ein zuvor abgesprochenes Besuchsprogramm durch diverse Laboratorien. Einen Tag darauf (am



The year of science was then rounded off for the PTB with real cocktails. At the grand **Finale** of the City of Science, held in Braunschweig's Volkswagenhalle on 14<sup>th</sup> December and attended by more than 4000 people, the PTB set up a cocktail bar with measuring technology attached: guests were

8.9.) veranstaltete die PTB ihren **Tag der offenen Tür** mit einem erweiterten Rahmenprogramm (von Livemusik bis Fußballübertragung). Insgesamt 4000 Besucher machten hier einen Abstecher in das Land des Messens und mixten sich ihren eigenen Physik-Cocktail, so das Motto des Tages.

Mit echten Cocktails ging dann für die PTB das Wissenschaftsjahr zu Ende. Beim großen **Finale** der Stadt der Wissenschaft, zu dem am 14. Dezember über 4000 Gäste in die Braunschweiger Volkswagenhalle kamen, baute die PTB eine Cocktailbar mit angeschlossener Messtechnik auf: die Gäste konnten die Frage klären, wie



able to clarify how much sugar was dissolved in their cocktails, and after drinking them, have their personal breath alcohol concentration measured.

The long and, given the numerous events, well-filled year was a great success – for the city, the region and

also for the PTB. To ascertain the effect of all these actions you could – typically of the PTB – proceed quantitatively and count everything that can be counted: the number of people at all the events, the size of the audiences at the lectures, the amount of readers of the daily science column, or the number of cocktails sold at the Finale. Large numbers would come



viel Zucker in ihrem Cocktail aufgelöst ist, und nach dem Cocktailgenuss ihren persönlichen Atemalkoholgehalt messen lassen.

Das lange und angesichts der zahlreichen Veranstaltungen gut gefüllte Jahr war ein Riesenerfolg – für die Stadt, die Region und auch für die PTB. Um die Wirkung all dieser Aktionen zu ermitteln, könnte man – ganz PTB-typisch – quantitativ vorgehen und alles zählen, was sich zählen lässt: die Besucher bei allen Veranstaltungen, die Zuhörer bei den Vorträgen, die Leser der täglichen Wissenschaftsglosse oder die Menge der verkauften Cocktails beim Finale. In jedem Fall würden hier große Zahlen herauskommen. Und dabei würden die Zahlen vor allem eines andeuten: die Präsenz der PTB in der Öffentlichkeit und damit einhergehend vermutlich einen deutlichen Imagegewinn.



out for sure. And the numbers would signify one thing above all, the presence of the PTB in the public eye and along with that, certainly a significant gain to its image.

# Zahlen und Fakten • Figures and Facts

## Personal: Entwicklung • Staff: development

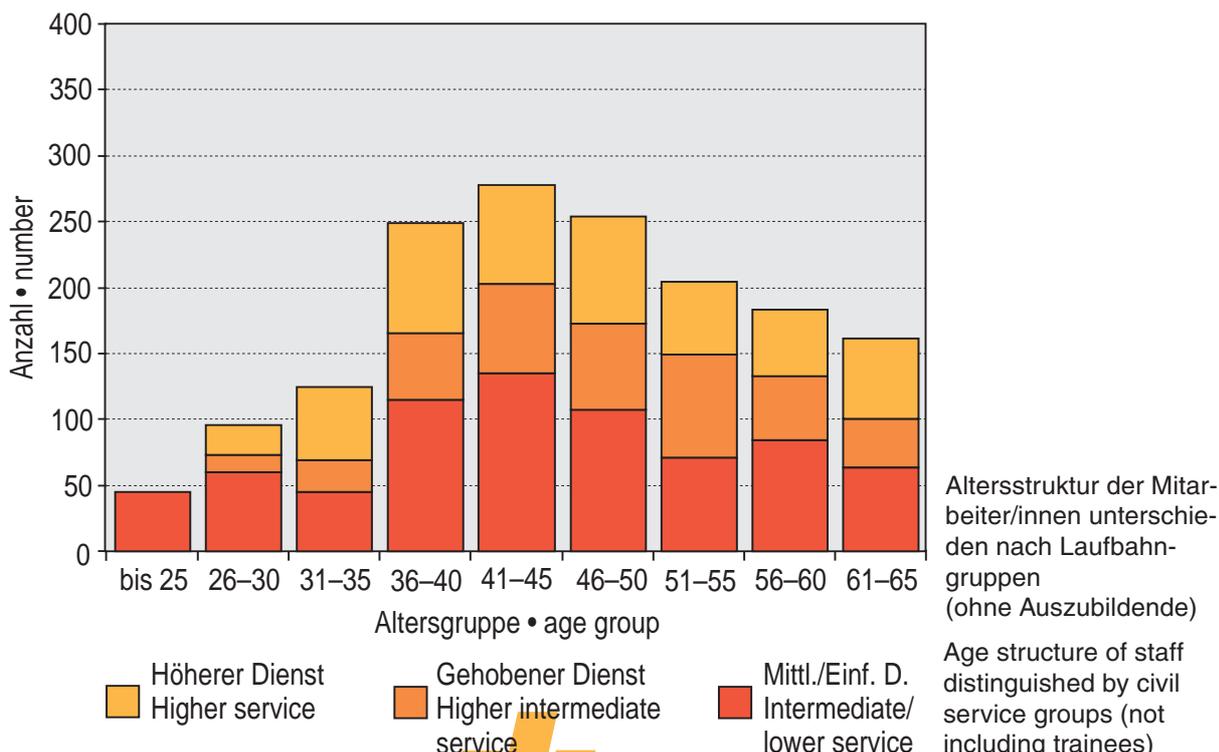
Personelle Entwicklung von 1998 bis 2007 (Stand: 31. Dezember 2007) • Development of staff

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

Beschäftigungsverhältnis	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
a)										
Beamte • civil servants	486	490	501	503	507	506	508	510	515	523
Angestellte • employees	827	821	808	786	767	744	727	692	863	833
Arbeiter • workers	227	223	201	204	201	201	193	196	—*	—
Kasino­personal • canteen staff	8	6	6	7	7	6	0	0	0	0
gesamt • total	1548	1540	1516	1500	1482	1457	1428	1398	1378	1356
b)										
Auszubildende • trainees	150	151	147	136	138	144	158	159	150	136
Aushilfskräfte temporary staff	35	32	44	52	53	52	61	69	66	98
Drittmittelpersonal staff members financed by third parties	110	70	92	104	106	122	105	109	169	162
Mitarbeiter gesamt staff member total	1843	1793	1799	1792	1779	1775	1752	1735	1763	1752

\* 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



**Ausbildung • Training (31. Dezember 2007)**

	BS	Berlin	
IT-Systemelektroniker Elektroniker/in für Geräte und Systeme	18 (6)	- -	information and telecommunication technologists electronics technician for devices and systems
Physiklaboranten	33 (8)	- -	laboratory technicians, physics
Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik	23 (6)	- -	electronics engineer for electrical and building services engineering
Feinwerkmechaniker	13 (3)	- -	precision instrument maker
Fachrichtung Feinmechanik	14 (4)	6 (0)	speciality: precision mechanics
Fotografen	4 (1)	- -	photographers
Technische Zeichner	3 (1)	- -	draftsmen
Mikrotechnologen	1 (0)	- -	microtechnologists
Tischler	- -	4 (2)	joiners
Systeminformatiker	- -	8 (4)	IT systems technicians
Fachangestellte für Bürokommunikation	- -	6 (0)	specialists in office communications
Verwaltungsfachangestellte	- -	3 (3)	public administration employee
gesamt	109 (29)	27 (9)	total

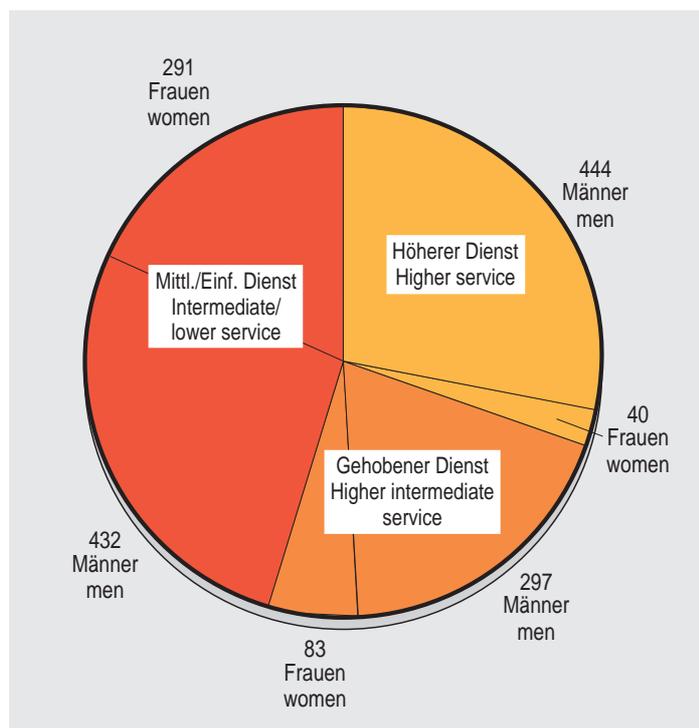
Die PTB gehört zu den größten Ausbildungsbetrieben in der Region. Gegenwärtig sind 136 Auszubildende bei der PTB angestellt. In Klammern sind die Neueinstellungen im Berichtsjahr angegeben.

The PTB is among the most important institutions of the region which provide training. 136 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 und Kasinopersonal)

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



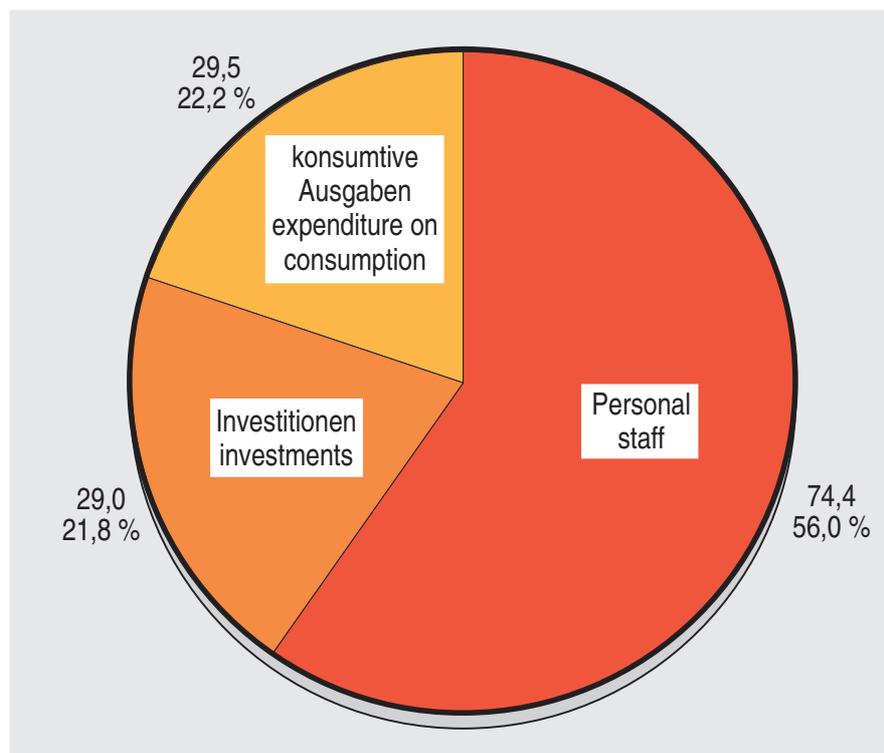
**Haushalt: Gebühren • Budget: charges**

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

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

Gebühren	2005	2006	2007	charges
Amtshandlungen und sonstige Gebühren	6008	6087	6457	official acts and repayment work; other fees
Prüfung und Zulassung von Spielgeräten	1489	1934	2162	tests and approvals of gaming machines
von Prüfstellen (Elektrizität)	251	393	222	of test centres (electricity)
Leistungen im Rahmen des DKD	1223	1465	1693	services rendered within the framework of DKD
gesamt	8971	9879	10534	total

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



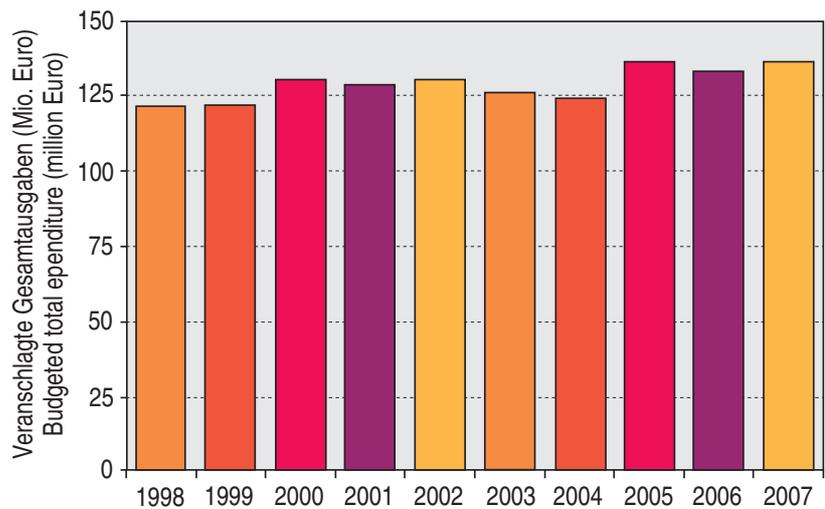
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. Euro). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

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	2005	2006	2007	budgetary means
Personalausgaben	77,9	77,7	74,4	staff costs
Investitionen (Bau und Geräte)	27,2	26,8	29,0	investments (building activities and instruments)
konsumtive Ausgaben	8,0	26,0	29,5	expenditure on consumption
gesamt	133,1	130,5	132,9	total

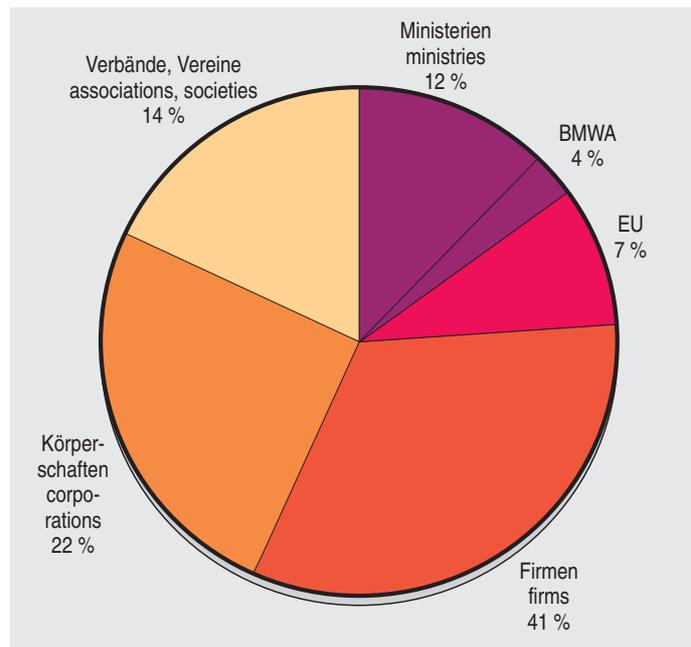
Haushalt: Entwicklung • Budget: development



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 2007 auf 7,4 Mio. Euro. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Insgesamt wurden im Berichtsjahr 13,2 Mio. Euro für 392 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) verwendet (davon 2,4 Mio. Euro für 51 Projekte in Berlin).



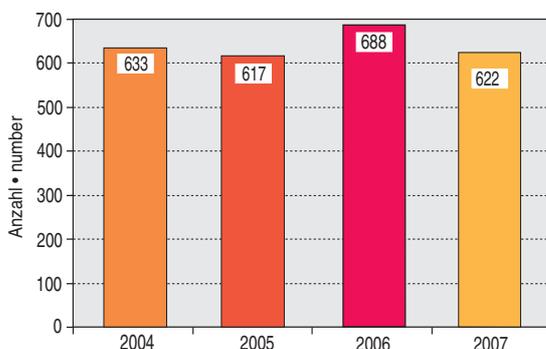
In 2007, the third-party funds for research projects added up to a total of 7.4 million Euro. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources. In the year under review, a total of 13.2 million Euro were used for 392 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 2.4 million Euro of these for 51 projects in Berlin.

Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures

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

... in Braunschweig		2005	2006	2007	
elektrische Energie	MWh	26 194	26 495	26 119	electrical energy
Wärme	MWh	23 336	24 206	20 492	heat
Gas	m <sup>3</sup>	25 845	30 855	26 775	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	99 930	92 492	87 419	water
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnliche					
Gewerbeabfälle	t	112	57	54	refuse-like industrial waste
recycelte Abfälle	t	191	282	398	recycled waste
Abfälle zur Beseitigung	t	28	21	94	hazardous waste
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	110 540	71 721	78 204	waste disposal costs (approx.)
... in Berlin		2005	2006	2007	
elektrische Energie	MWh	4344	4595	5883	electrical energy
Gas	m <sup>3</sup>	8590	51 727	49 200	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	39 290	29 800	24 650	water
Helium, flüssig	l	43 900	48 100	44 100	helium, liquid
Stickstoff, flüssig	l	63 374	55 500	57 798	nitrogen, liquid
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnliche					
Gewerbeabfälle	t	55	56	64	refuse-like industrial waste
recycelte Abfälle	t	112	28	25	recycled waste
Abfälle zur Beseitigung	t	4	4	4	hazardous waste
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	14 800	9900	9500	waste disposal costs (approx.)

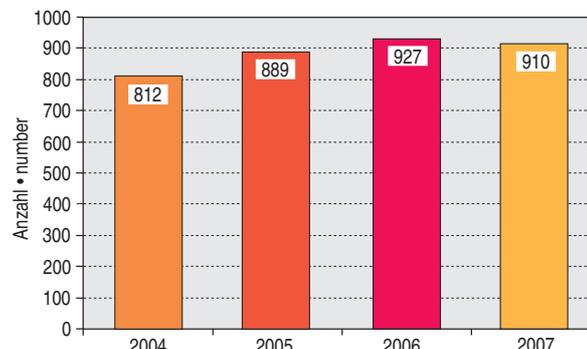
Veröffentlichungen • Publications



Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 2004 bis 2007 (vgl. Datenbank „PTB-Publica“ im Internet)

Number of publications by PTB staff members (in scientific journals, books, conference digests, etc.) between 2004 and 2007 (cf. database “PTB-Publica” on the web)

Vorträge • Lectures



Anzahl der auswärtigen Vorträge, die PTB-Mitarbeiter/innen in den Jahren 2004 bis 2007 gehalten haben

Number of lectures held by PTB staff members outside PTB between 2004 and 2007

**Aus dem Veranstaltungskalender • Events**

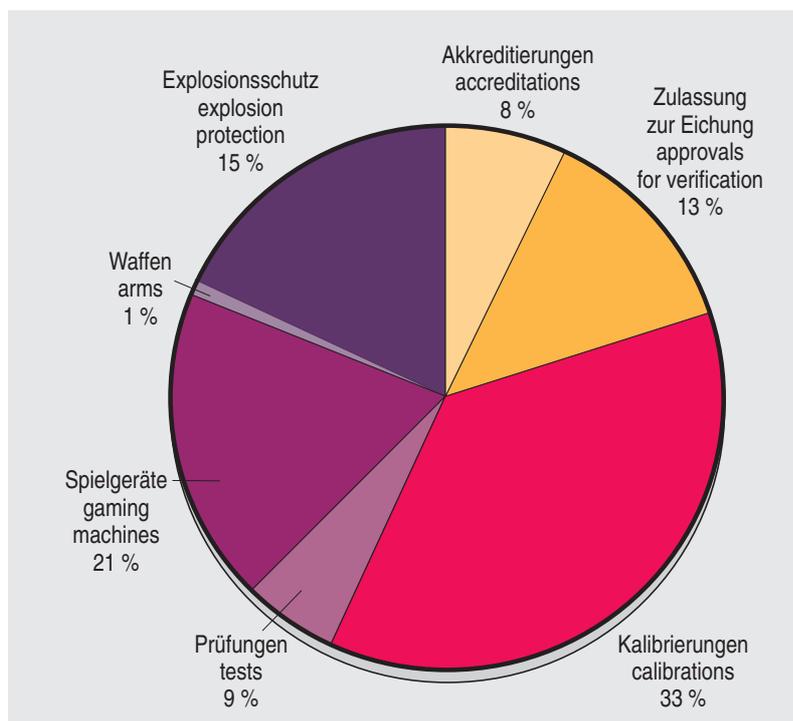
	2005	2006	2007	
PTB-Seminare	10	13	12	PTB Seminars
Tagungen, Workshops, etc.	15	27	17	Conferences, workshops, etc.
Kolloquien	94	68	73	Colloquies

Anzahl der Seminare, Tagungen, Workshops und Kolloquien in den letzten drei Jahren. Diese Veranstaltungen sind ein wichtiges Element sowohl für den Wissenstransfer aus der PTB etwa in die Industrie (z. B. durch PTB-Seminare) als auch umgekehrt in die PTB hinein (durch eingeladene wissenschaftliche Vorträge bei Kolloquien und durch den Erfahrungsaustausch bei Tagungen und Workshops).

Number of seminars, conferences, workshops and colloquies for the last three years. These events are an important tool for knowledge transfer from the PTB to industry (e.g. through PTB seminars) and vice versa (through invited scientific lectures and colloquies and through the exchange of experience at conferences and workshops).

**Aufteilung der Einnahmen • Distribution of the income**

Aufteilung der Einnahmen im Jahr 2007 auf die verschiedenen Dienstleistungsbereiche der PTB. Gesamteinnahmen: 10,53 Millionen Euro.



Distribution of the income of 2007 among the various service sectors of PTB. Total receipts: 10.53 million euro.

## Projektpartner der PTB

## PTB's project partners



### Internationale Zusammenarbeit

Großen Umfang innerhalb des Arbeitsgebiets „Internationale Angelegenheiten“ nimmt die Technische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern ein. Die PTB gibt ihre Erfahrungen weiter und leistet aktive Hilfe beim Aufbau von Systemen der Konformitätsbewertung mit den Komponenten Mess-, Normen-, Prüf- und Qualitätswesen, Akkreditierung und Zertifizierung (MNPQ) und Umweltschutz. Die Mittel werden überwiegend vom *Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung* (BMZ) zur Verfügung gestellt. Im Berichtsjahr wurden 22 Länder in vier Kontinenten durch 25 bilaterale Projekte beim Aufbau ihrer technischen Infrastruktur allein aus Mitteln des BMZ unterstützt. Weitere Länder profitieren von insgesamt 18 regionalen und sektoralen Projekten. Der finanzielle deutsche Beitrag betrug mehr als 5,5 Mio. Euro. Die Nationalflaggen bzw. die regionalen Embleme zeigen, wo die PTB ihre Projekte durchführt.

### International affairs

In the area of international affairs, Technical Cooperation with developing and newly industrialized countries is of great importance. The PTB offers its experience and lends active support for setting up conformity testing systems covering metrology, standardization, testing and quality assurance, accreditation and certification (MSTQ) as well as environmental protection. The funds are mainly made available by the *Federal Ministry for Economic Cooperation and Development* (BMZ) and by regional and international donors such as the EU and the World Bank. In the year under report, 22 countries in four continents were assisted within the scope of 25 projects in setting up a technical infrastructure from BMZ funds alone. Other countries are profiting from a total of 18 regional and sectoral projects. The financial contribution of Germany amounted to more than 5.5 million Euro. The ensigns or regional emblems show where PTB is implementing projects.

### Gastwissenschaftler, Gäste und Besucher

Im letzten Jahr kamen 14 130 Besucher aus aller Welt in die PTB (Standort Braunschweig). Den größten Anteil bildeten die metrologischen Fachbesucher aus Wissenschaft und Wirtschaft (8157) sowie die Teilnehmer an unterschiedlichsten Seminaren, Tagungen und Kolloquien (4001). Auch der allgemeine Besucherdienst der PTB, im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit, fand wie gewohnt regen Zuspruch. 1972 Besucher (in 97 Gruppen) schauten den Wissenschaftlern in Braunschweig über die Schultern.

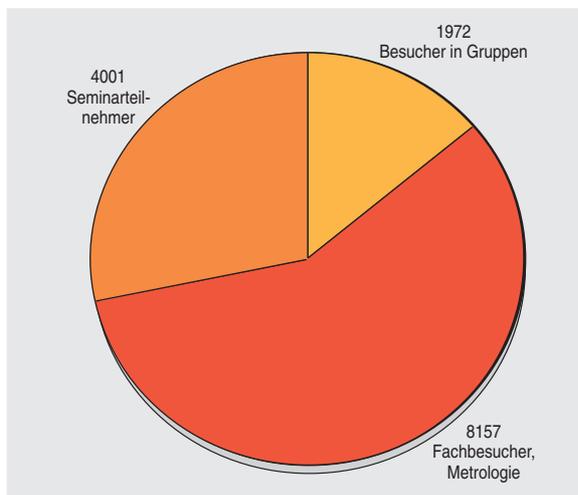
320 Besucher in (25 Gruppen) besuchten das Institut Berlin; 2500 Besucher kamen zur Langen Nacht der Wissenschaften.

### Guest scientists, guests and visitors

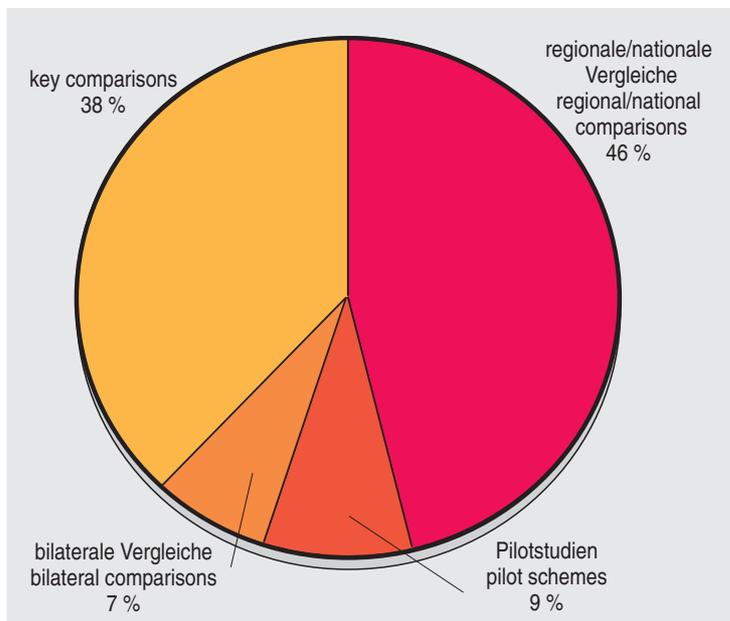
Last year, 14 130 people from all parts of the world visited PTB (Braunschweig site). Most of them were metrological professionals from science and economy (8157) as well as participants in the diverse seminars, meetings and colloquia (4001).

PTB's general visitor service within the scope of public relations work was also popular as usual. 1972 visitors (in 97 groups) observed the scientists work in their laboratories.

320 people (in 25 groups) visited the Berlin Institute; 2 500 visitors came to the Long Night of the Sciences.



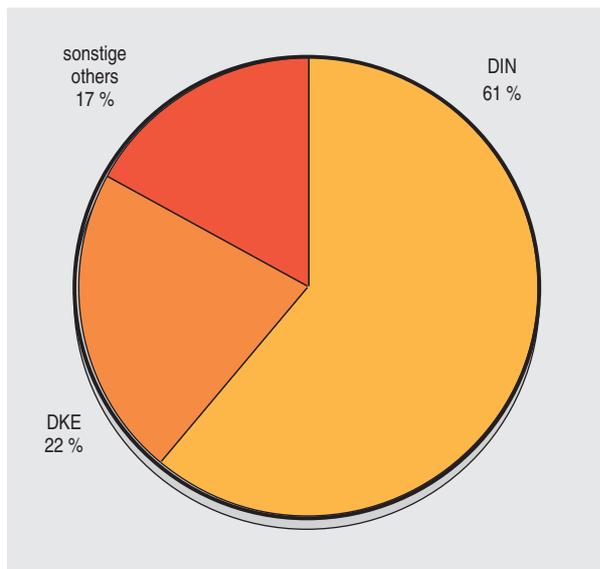
### Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements



In the year under report, PTB took part in 56 comparable measurements, namely 21 key comparisons, 26 regional/national comparisons, 5 pilot studies and 4 bilateral comparisons. 52 % of the comparable measurements were of direct relevance to the calibration and measurement capabilities of PTB within the scope of the CIPM MRA. PTB participated in 14 comparable measurements as a pilot lab.

Die PTB nahm im Berichtsjahr an 56 Vergleichsmessungen teil und zwar an 21 Schlüsselvergleichen, 26 regionalen/ nationalen Vergleichen, 5 Pilotstudien und 4 bilateralen Vergleichen. 52 % der Vergleichsmessungen waren von direkter Relevanz für die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB im Rahmen des CIPM-MRA. An 14 Vergleichsmessungen nahm die PTB als Pilotlabor teil.

Nationales Messwesen: Gremienarbeit • Metrology on the national level: committee work

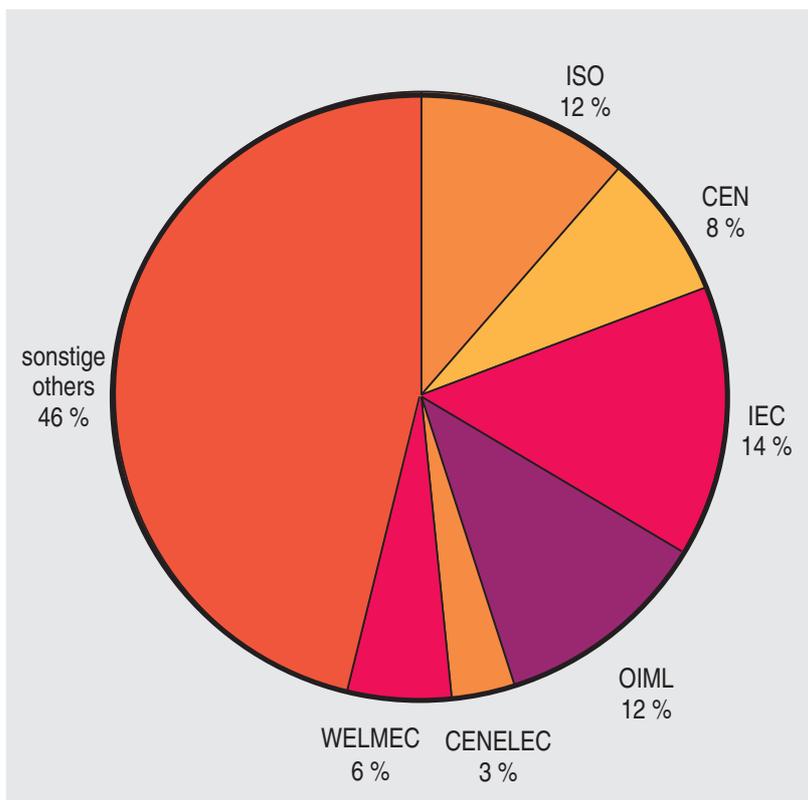


Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei nationalen Normungsvorhaben. Innerhalb des *Deutschen Instituts für Normung e. V.* (DIN) war die PTB an 156 Normenvorhaben beteiligt, bei der *Deutschen Elektrotechnischen Kommission* (DKE) bei 56 Vorhaben.

Break-up of the PTB’s committee work for national standardization projects (in percent). PTB cooperated in 156 projects of the *Deutsches Institut für Normung* (DIN) and in 56 projects of the *Deutsche Elektrotechnische Kommission* (DKE).

Internationales Messwesen: Gremienarbeit • Metrology on the international level: committee work

Prozentuale Verteilung der internationalen Gremienarbeit der PTB. Insgesamt arbeitete die PTB im letzten Jahr bei 543 solcher Gremien (davon 273 Normungsvorhaben) mit. 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.



Break-up of the PTB’s international committee work (in percent). In the past year, the PTB cooperated in 543 projects of this kind (thereof 273 international standardization projects). ISO: International Organization for Standardization; CEN: European Committee for Standardization; IEC: International Electrotechnical Commission; OIML: International Organization of Legal Metrology; CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization; WELMEC: European Cooperation in Legal Metrology.

**Promotionen 2007 • Doctorates in 2007**

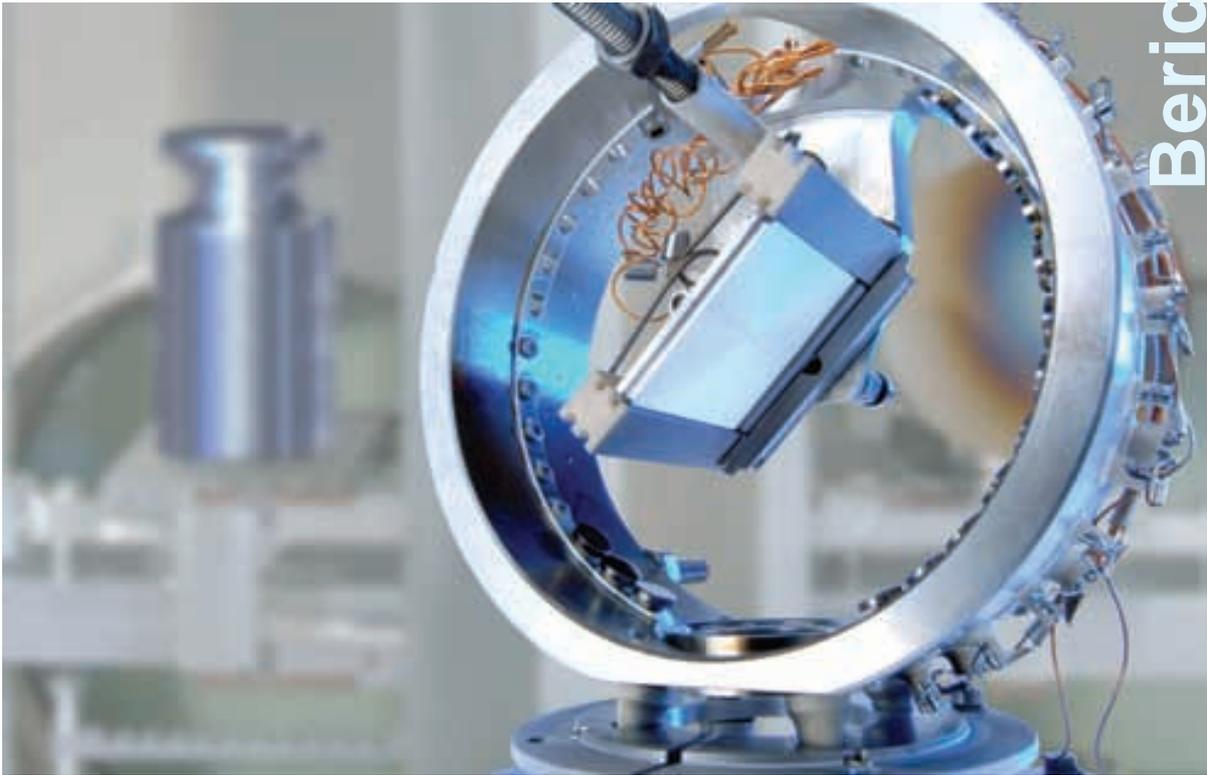
Gabriel Moniz-Pereira (1.4)	Experimentelle und numerische Untersuchungen an Konfigurationen zur Erzeugung von Vorstörungen
Nourreddine Bouaoua (1.6)	Free-field reciprocity calibration of condenser microphones in the low ultrasonic frequency range
Steffen Seitz (2.54/3.13)	Optimierung elektro-optischer Abtastverfahren für ultraschnelle elektrische Signale und Anwendungen in der Höchsthäufigkeitsmesstechnik
Rajesh Sadanandan (3.5)	Ignition by hot gas jets – A detailed investigation using 2D time resolved laser techniques and numerical simulations
Ha Dong Kim (3.5)	Application of a systematic approach for the design of electrical motors type of protection flameproof enclosure
Christian Lehrmann (3.7)	Über ein Zulassungsverfahren für explosionsgeschützte, umrichtergespeiste Käfigläufer der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“
Tatiana Nazarova (4.32)	Towards the quantum noise limit in Ramsey-Bordé atom interferometry
Claudio Dal Savio (5.15)	Spectroscopy of size dependent many-particle effects in single self-assembled semiconductor quantum dots
Karin Kniel (5.33)	Ein Beitrag zur Entwicklung eines laserinterferometrischen Trackingsystems für die Genauigkeitssteigerung in der Koordinatenmesstechnik
Guido Bartl (5.41)	Mitarbeit bei Untersuchung zum Einfluss von Wellenfrontaberration auf Durchmesserbestimmungen mit einem neu aufzubauenden Kugelinterferometer
Alexander Höink (5.42)	Untersuchung zur Entwicklung eines Messverfahrens zur Form- und Durchmesserbestimmung an dünnen Zylindern mittels Mehrwellenlängen-Diodenlaserinterferometrie
Amany Abdelaty (5.44)	Development of a double side gauge block interferometer for measurement of the absolute length
Hans-Jürgen Altmeyer (5.44/3.2)	Realisierung eines Zweistrahl-Laser-Komparators zum Vergleich von Feuchtgeneratoren
Gabor Laczko (6.5)	Investigation of the radial ionization distribution of heavy ions with an optical particle track chamber and Monte-Carlo simulations
Nicolaus Mathies (7.6)	Messunsicherheit einer gravimetrischen Kalt- und Warmwasser-Normalmessanlage für große Volumenströme
Steffen Rüttinger (8.3)	Confocal microscopy and quantitative single molecule techniques for metrology in molecular medicine
Mayank Prakash Agnihotri (Q.23)	One particle properties in the 2D Coulomb problem: Luttinger-Ward variational approach
Martin Gutbrod (Q.41)	Nachhaltiges E-Learning durch sekundäre Dienste

---

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

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

# Mechanik und Akustik



Berichte der Abteilungen

*Abteilung*



# Mechanik und

## 1. Mechanik und Akustik

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

Die Arbeiten der Abteilung 1 *Mechanik und Akustik* lassen sich den drei übergeordneten Programmenthemen *Masse und abgeleitete Größen* (Fachbereiche 1.1, 1.2, 1.3), *Durchfluss* (Fachbereiche 1.4, 1.5) sowie *Akustik, Ultraschall, Beschleunigung* (Fachbereiche 1.3, 1.6, 1.7) zuordnen. Nachfolgend werden wichtige Arbeiten und Schwerpunktthemen sowie bedeutende Entwicklungen auf diesen Gebieten vorgestellt.

### 1.1 Masse und abgeleitete Größen

Im Themenbereich *Masse und abgeleitete Größen* wird in den Fachbereichen 1.1 *Masse*, 1.2 *Festkörpermechanik* und 1.3 *Kinematik* – basierend auf dem Einheiten-, Eich- und Beschussgesetz sowie der Einheitenverordnung und der Eichordnung – an der Darstellung und Weitergabe der mechanischen Einheiten für Masse, Kraft (statisch und dynamisch), Drehmoment (statisch und dynamisch) sowie der dynamischen Druckmessung gearbeitet. Die Darstellung und Weitergabe der Einheit für den statischen Druck (auch im Vakuumbereich) erfolgt in den Abteilungen 3 *Chemische Physik und Explosionsschutz* sowie 7 *Temperatur und Synchrotronstrahlung*.

Im Rahmen des PTB-Konzepts 2016 wurden für diesen Themenbereich bisher die dynamische Kraftmessung, die dynamische Kalibrierung von Piezo-Druckaufnehmern sowie die Mitarbeit am internationalen Avogadro-Projekt als Schwerpunktthemen mit Ausbaupotential bestimmt.

Im Rahmen der internationalen Avogadro-Kooperation wurde erstmals ein Vergleich zur Massebestimmung einer 1-kg-Siliziumkugel in Luft und im Vakuum durchgeführt. Teilnehmer dieses Vergleiches waren das BIPM als Pilotlabor, das NMIJ (Japan), das NPL (Großbritannien), das NMIA (Australien) und die PTB. Vom NMIA wurde eine Siliziumkugel mit besonders hoher Oberflächenqualität zur Verfügung gestellt (Bezeichnung AVO#3). Die Masse dieser Kugel konnte im Fachbereich *Masse* mit  $1001132,780 \text{ mg} \pm 0,012 \text{ mg}$  in Luft und mit  $1001132,7860 \text{ mg} \pm 0,0083 \text{ mg}$  im Vakuum bestimmt werden. Die größten Beiträge zur Gesamtunsicherheit stammen vom nationalen Kilogrammprototyp als Referenznormal ( $5 \mu\text{g}$ ) sowie von der Luftauftriebskorrektur in Luft ( $9 \mu\text{g}$ ) bzw. der Sorptionskorrektur für die Massebestimmung im Vakuum ( $5 \mu\text{g}$ ). Mit den erzielten Ergebnissen in Luft und im Vakuum nimmt die PTB weltweit eine Spitzenstellung ein. Die Auswertung der Ergebnisse und der Abschlussbericht werden unter Leitung des BIPM erstellt und veröffentlicht.

Die Massebestimmung der akkumulierten Ionen beim Ionenexperiment muss um die Sputterverluste korrigiert werden. Ein Wismut-Ion mit einer Energie von 25 keV schlägt beim ungebremsten Aufprall aus dem Kollektorboden aus Aluminium im Mittel 5 Atome heraus. Ein Teil dieser Atome kann durch die Eintrittsöffnung des Kollektors verloren gehen und somit die zu bestimmende Gesamtmasse verringern. Um diese Verluste korrigieren zu können, wurde im Fachbe-

Titelbild  
Vorrichtung zur Messung der Winkelverteilung rückgestreuter Wismutatome am Ionenexperiment.

# nd Akustik

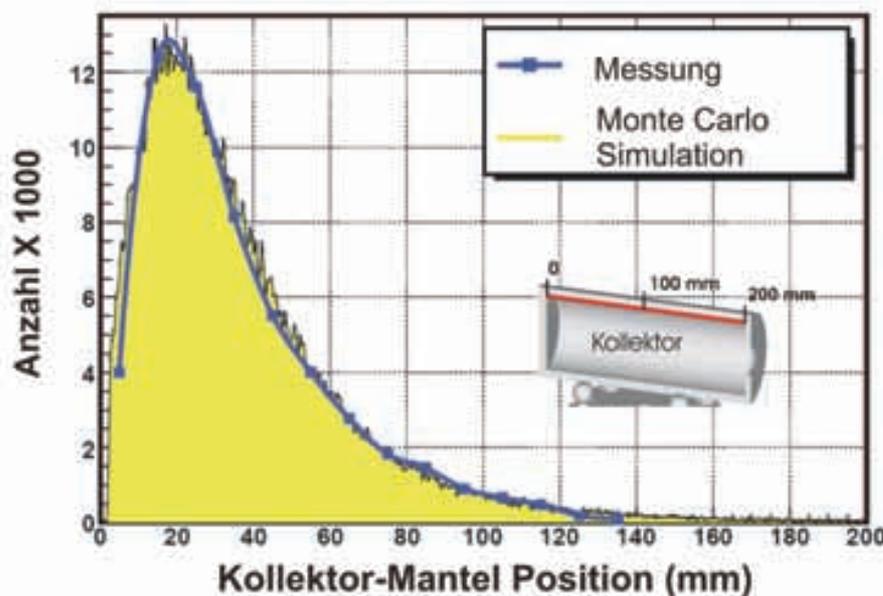


Bild 1: Verteilung der gesputterten Atome entlang des Kollektor-mantels (Experiment Ionenakkumulation).

reich *Festkörpermechanik* die Verteilung der gesputterten Atome entlang des Kollektor-Mantels (Bild 1) und auf der Rückseite der Eintrittsblende experimentell bestimmt. Die gemessene Verteilung konnte sehr gut mit einer Monte-Carlo-Simulation reproduziert werden. Bei einem Akkumulationsversuch konnten 108 mg Wismut akkumuliert und die atomare Masseneinheit mit einer relativen Standardunsicherheit von  $2,8 \cdot 10^{-4}$  ermittelt werden. Die relative Abweichung vom Literaturwert beträgt  $4,2 \cdot 10^{-4}$  (entsprechend einem Vertrauensbereich von 88 %). Die größten Unsicherheitsanteile sind die der Sputterverluste ( $1,940 \text{ mg} \pm 0,022 \text{ mg}$ ) und der akkumulierten Masse ( $107,920 \text{ mg} \pm 0,021 \text{ mg}$ ). Die relative Unsicherheit des im Jahre 2002 veröffentlichten Ergebnisses konnte so um mehr als das 50-fache verbessert werden. Im Rahmen des PTB-Konzeptes 2016 wurde entschieden, die Arbeiten am Experiment Ionenakkumulation mit Ablauf des Jahres 2007 bis auf Weiteres einzustellen.

Das EUROMET-Projekt 832 zur Massebestimmung von 50-kg-Normalen mit den nationalen Metrologieinstituten METROSERT

(Estland), MIKES (Finnland) als Pilotlabor, EIM (Griechenland), LNMC (Lettland), JV (Norwegen) und der PTB wurde erfolgreich abgeschlossen. Durch die Teilnahme der PTB (Fachbereich *Masse*) wurde der Anschluss an den entsprechenden CIPM key comparison CCM.M-K3 hergestellt. Die Differenzen zwischen den Ergebnissen der Teilnehmer und dem Referenzwert liegen für alle Teilnehmer innerhalb der angegebenen erweiterten Messunsicherheiten ( $k = 2$ ). Ein Abschlussbericht zu diesem Projekt wurde unter Leitung des MIKES erstellt und veröffentlicht.

Seit 1999 existiert ein deutsch-japanisches Abkommen über die gegenseitige Anerkennung der Prüfergebnisse von nicht-selbsttätigen Waagen (NSW). Der rasante messtechnische Fortschritt der letzten Jahre auf dem Gebiet der Wägetechnik machte eine Revision dringend erforderlich. Daher unterzeichneten die PTB und das National Metrology Institute of Japan (NMIJ/AIST) am 5. Juni 2007 eine umfassende Erweiterung dieses Memorandum of Understanding (MoU), das jetzt auch NSW mit deutlich höheren Höchstlasten (bis zu 5 t) und Wägezellen nach OIML-Empfehlung R60 mit

bestimmten Spezifikationen einschließt (Genauigkeitsklasse C oder D, Höchstlast 20 t, Anzahl der Teilungswerte maximal 6000, Feuchteklasse entweder SH oder CH). Damit gewährleistet das bilaterale MoU auch zukünftig die gegenseitige Anerkennung von Prüfergebnissen für Waagen und Wägezellen, unabhängig von den zur Zeit auf internationaler Ebene laufenden Diskussionen um das Mutual Acceptance Arrangement (MAA) der OIML.

Pünktlich zur Anwendung der EU-Messgeräte richtlinie 2004/22/EG (MID) am 30. Oktober 2006 konnte eine beträchtliche Anzahl von Zertifikaten für eichpflichtige selbsttätige Waagen ausgestellt werden. Dies war nur möglich dank der gründlichen Vorbereitung in enger Zusammenarbeit mit betroffenen Herstellern und Eichbehörden sowie effizienter Prüfungsdurchführung. Mittlerweile sind von der PTB bereits 60 Baumusterprüfbescheinigungen nach dem Konformitätsbewertungsmodul B und eine Entwurfsprüfbescheinigung nach dem Konformitätsbewertungsmodul H1 ausgestellt worden.

Die Industriekooperation auf dem Gebiet Mechatronik mit dem Ziel der Entwicklung neuartiger Silizium-(Si-)Wägezellen wurde erfolgreich fortgesetzt. Aufgrund der nahezu ideal elastischen Materialeigenschaften von einkristallinem Si und der direkten Dehnungsmessstreifen-Applikation mit dem Dünnschichtverfahren der Sputterdeposition lässt sich eine signifikante Verbesserung der messtechnischen Eigenschaften im Vergleich

zu konventionellen Wägezellen erwarten. Basierend auf umfangreichen numerischen Berechnungen wurden Wägezellen mit Federkörpern aus einkristallinem Si gefertigt (Bild 2). Erste Ergebnisse bestätigen die sehr guten Materialeigenschaften von Si und zeigen, dass die mechanischen Nachwirkungen des Federkörpers etwa um den Faktor 100 kleiner sind als bei den üblichen metallischen Materialien.

Im Fachbereich *Festkörpermechanik* wurden in den letzten Jahren Messeinrichtungen zur Messung periodischer Kräfte von 0 Hz bis 1000 Hz aufgebaut, mit denen neben den statischen Eigenschaften von Kraftmessgeräten insbesondere ihre dynamischen Eigenschaften untersucht werden können. Im Rahmen von Forschungsprojekten werden derzeit neuartige Sensorprinzipien (unter anderem DMS-Applikation nach dem Dünnschichtverfahren) in Zusammenarbeit mit der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* entwickelt und untersucht mit dem Ziel, der Industrie zukünftig rückgeführte Krafttransfornormale für dynamische Kräfte anbieten zu können.

Um den für Feinmechanik und Mikrosystemtechnik wichtigen Kraftbereich von wenigen Newton bis hin zu Millinewton mit Unsicherheiten von wenigen Mikronewton anbieten zu können, wurde eine neuartige Kraft-Normalmesseinrichtung (KNME) aufgebaut. Diese basiert auf kommerziellen, elektromagnetisch kompensierten Wägezellen (EMK-WZ) als rückführbare Referenz der Kraftmessung und einem voll justierbaren Rahmenaufbau. Die geregelte Krafterzeugung



Bild 2: Federkörper aus einkristallinem Silizium.

wird piezoelektrisch realisiert. Zur Zeit können Messunsicherheiten bis unter 1 mN erreicht werden. Es ist geplant, den Messbereich durch Austausch der EMK-WZ bis zu 12 N zu erweitern.

Um auch im oberen Kraftbereich den gestiegenen Anforderungen an die Messunsicherheit und die verstärkte Nachfrage nach neuartigen, dynamischen Kalibrierverfahren gerecht zu werden, wurde im Fachbereich *Festkörpermechanik* die 1-MN-KNME modernisiert und erweitert, so dass neben Belastungen mit direkter, statischer Massewirkung zukünftig auch zeitlich sich ändernde Belastungen (kontinuierliche Kraftänderungen) realisiert werden können.

An der neuen, weltweit einzigartigen 1-N·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung (Dm-NME, siehe Bild 3) wurden erste Untersuchungen im Handbetrieb durchgeführt. Die Abweichungen zwischen den Messergebnissen des Transfornormales TT1/1 N·m auf der neuen Einrichtung und auf der bereits umfangreich untersuchten 1-kN·m-Dm-NME liegen bei etwa  $2 \cdot 10^{-4}$ . Das bedeutet, dass der Abgleich der Hebellängen an der 1-N·m-Dm-NME mit laboreigenen Messmitteln sehr gut gelungen ist. Die Anschlussmessungen an die 1-kN·m-Dm-NME ergaben entsprechende Korrekturfaktoren, bei deren Berücksichtigung relative Messunsicherheiten ( $k = 2$ ) von besser als  $5 \cdot 10^{-5}$  erreicht werden.

Diesjähriger Schwerpunkt der Arbeitsgruppe *Dynamische Druckmessung* im Fachbereich *Kinematik* war der Auftrag der Ständigen Kommission zur Prüfung von Handfeuerwaffen (CIP), neue Messverfahren zu entwickeln, mit denen die innen- und außenballistischen Kenngrößen an Schrotgarben ermittelt werden können. Neben Untersuchungen zu innenballistischen Kenngrößen war für die Außenballistik zu analysieren, wie sich ein möglichst für alle Stahlschrotpatronen geeignetes Messverfahren mit zwei Lichtschranken für die Geschwindigkeit der Schrotkugeln bzw. den Gesamtimpuls der Garbe nach Verlassen des Gasdruck-Messlaufs realisieren lässt. Es konnte experimentell nachgewiesen werden, dass dies für die gängigsten Munitionsarten möglich ist, wenn sich die erste Lichtschranke mindestens 1,5 m und die zweite mindestens 2,5 m hinter der Mündung



Bild 3: Die neue 1-N·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung der PTB

befindet, wodurch Fehlauflösungen durch Pulverreste und/oder Teile der Munition weitestgehend vermieden werden.

In der Arbeitsgruppe *Stoßdynamik* im Fachbereich *Kinematik* werden Kalibrierverfahren und die zugehörigen Einrichtungen für Kraftaufnehmer unter dynamischer – insbesondere stoßförmiger – Belastung entwickelt. Für die Auswertung der Signale wird in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe *Messdatenanalyse und Messunsicherheit* eine Charakterisierung der Aufnehmer durch modellbasierte Parameter angestrebt. Dieses Konzept wird an der bereits im Einsatz befindlichen 20-kN-Kraftstoß-Normal-Messeinrichtung getestet und soll auch für die im Aufbau befindliche 250-kN-Kraftstoß-Normal-Messeinrichtung (Bild 4) verwendet werden. Auf diese Weise soll zukünftig eine Weitergabe der Einheit Newton für hochdynamische Anwendungen angeboten werden.

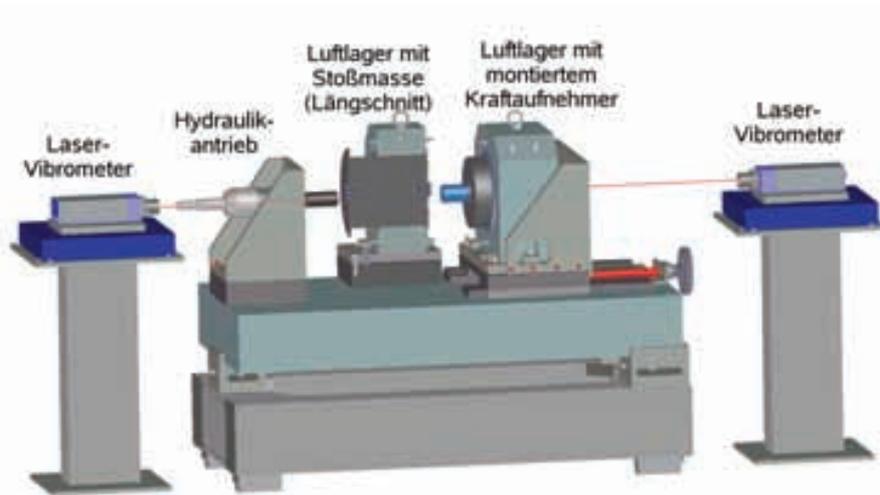


Bild 4: CAD-Darstellung der im Aufbau befindlichen 250 kN-Kraftstoß-Normal-Messeinrichtung.

## 1.2 Durchfluss

Auf der Basis des Einheitengesetzes befassen sich die Fachbereiche 1.4 *Gase* und 1.5 *Flüssigkeiten* mit der Darstellung und Weitergabe der Einheiten für die Strömungsmessgrößen Menge, Durchfluss und Strömungsgeschwindigkeit von Gasen und Flüssigkeiten. Hierzu werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit dem Ziel durchgeführt, sowohl den Darstellungsbereich als auch die erreichte Messunsicherheit an die steigenden Anforderungen von Industrie und Wissenschaft anzupassen. Aus dem Eichgesetz ergeben sich darüber hinaus vielfältige Aufgaben zur Sicherung der Einheitlichkeit und Richtigkeit der Durchflussmessungen im gesetzlich geregelten Bereich.

Im Zusammenhang mit der Durchflussmessung spielen häufig auch weitere metrologisch relevante Parameter, wie Dichte, Viskosität, kalorische und Explosionsschutz-Parameter sowie thermische Energie, eine wichtige Rolle. Daher besteht traditionell eine gute, abteilungsübergreifende Zusammenarbeit mit den Fachbereichen 3.2 *Analytische Messtechnik und Druck*, 3.3 *Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften* in der Abteilung 3 *Chemische Physik und Explosionsschutz* sowie mit dem Fachbereich 7.6 *Wärme* in der Abteilung 7 *Temperatur und Synchrotronstrahlung*. Um die PTB-interne Zusammenarbeit weiter zu stärken und zukünftigen Herausforderungen, insbesondere im Rahmen der verstärkten europäischen Kooperation, noch besser begegnen zu können, wird im Rahmen des PTB-Konzeptes 2016 eine Konzeption für das

Bild 5: Teilnehmer des 235. PTB-Seminars „Zukunft der Metrologie strömender Medien“ am 3./4. September 2007 im Institut Berlin der PTB.



Querschnittsthema *Durchfluss* erarbeitet, das u. a. große Durchflüsse von Flüssigkeiten (bis 2100 m<sup>3</sup>/h), Mikrovolumina und kleinste Durchflüsse von Gasen und Flüssigkeiten, berührungslose Strömungsmessverfahren sowie messtechnische Aspekte im Zusammenhang mit alternativen Energiequellen, wie Biogas und Biokraftstoffen, berücksichtigt wird. So fand im Rahmen der verstärkten Zusammenarbeit am 3. und 4. September 2007 das 235. PTB-Seminar zum Thema „Zukunft der Metrologie strömender Medien“ statt (Bild 5). Angesichts der herausragenden wirtschaftlichen Bedeutung der Versorgung mit Gas, Wasser, Mineralöl, Wärme und neuerdings auch Kälte und angesichts der politischen Diskussionen um Energieeffizienz, Energie- und Kosteneinsparung, Zukunft der Energieversorgung und alternative Energiequellen ist eine genaue und zuverlässige Messtechnik strömender Medien von zentraler Bedeutung. Mit 80 Teilnehmern aus Deutschland, Österreich, der Schweiz, den Niederlanden und Frankreich fand das Seminar sehr gute Resonanz. Vertreter von wichtigen Energieversorgern, Herstellern von Durchflussmesstechnik, Eichbehörden, Prüfstellen und von Universitäten diskutierten mit den Teilnehmern aus allen betroffenen Fachbereichen der PTB neue Entwicklungen und Trends auf den Arbeitsgebieten Messung thermischer Energie, Mengen- und Durchflussmessung von Flüssigkeiten und Gasen, Mikrofluidik, optische bzw. berührungslose Strömungsmessung und -diagnose, alternative Brennstoffe, gasförmige Energieträger, Verbrauchsmessung für Gas, Wasser und Wärme.

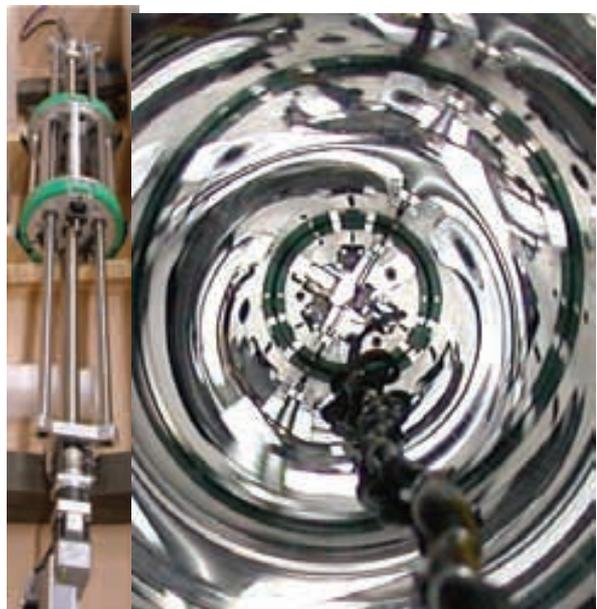
Nachdem im Jahr 2006 im Fachbereich *Gase* die Kalibrierketten für Hochdruck-Erdgas und atmosphärische Luft erstmals direkt und mit geringer relativer Messunsicherheit (0,05 %) verglichen worden waren, wurde nun auch die vollständige Äquivalenz der Referenzwerte aus den CIPM-Schlüsselvergleichen CCM.FF-KC5a (Hochdruck-Erdgas) und -KC5b (komprimierte Luft/

Bild 6: Messung des Referenzvolumens im Primärnormal für Hochdruck-Erdgas. Links: Messeinrichtung für Innendurchmesser mit drehbarem Tastarm am oberen Ende; rechts: Blick auf Tastarm in Aktion im Referenzvolumen der Rohrprüfstrecke.

Stickstoff) nachgewiesen. Basis für diesen Nachweis war ein detailliertes analytisches Modell für das Messverhalten von Turbinenradgaszählern und eine sorgfältige Analyse von Korrelationen innerhalb der Messdatensätze. Diese beinhalteten auch Messungen mit atmosphärischer Luft, so dass der Nachweis einen vollständigen Anschluss der Einheitenrealisierung für atmosphärische Luft an Gase unter Hochdruck umfasst.

Für die Rückführung von Messungen außerhalb des Arbeitsbereiches von Primärnormalen konnte ein neuartiges Staffelfverfahren für das Volumen bzw. die Masse strömender Gase entwickelt und erfolgreich eingeführt werden. Es nutzt die besondere Eigenschaft kritisch betriebener Lavaldüsen, die entsprechend ihrer Geometrie und der Gasbeschaffenheit einen bestimmten Durchfluss vorgeben. Über Vergleichsmessungen mit Hilfe von zwei nahezu gleich großen Düsen und einem Transfermessgerät mit guter Reproduzierbarkeit (Turbinen- oder Drehkolbengaszähler) wird dabei der Kalibrierwert von großen zu kleinen Durchflüssen übertragen.

Die für das Jahr 2007 vorgesehene, turnusgemäße Rekalibrierung der gesamten Messkette für Hochdruck-Erdgas startete pünktlich zum Jahreswechsel 2006/2007 mit der vollständigen Neuvermessung des Referenzvolumens im volumetrischen Primärnormal für Hochdruck-Erdgas (so genannte Rohrprüfstrecke). Zu diesem Zweck wurden zwei vollständig



neue Messeinrichtungen (mechanisch und interferometrisch) für den Durchmesser des maßgebenden Zylinders und der Kolbenposition konzipiert und aufgebaut (Bild 6). Mit diesen Einrichtungen konnte einerseits die relative Messunsicherheit für das Referenzvolumen von 0,02 % auf 0,007 % gesenkt und andererseits eine sehr gute Langzeitstabilität der Rohrprüfstrecke nachgewiesen werden.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten am Optischen Durchflussnormal für Erdgas unter Hochdruckbedingungen war der Einsatz neuer Laser-Doppler-Profilsensoren zur präzisen Messung von Strömungsgrenzschichten bei der Bestimmung des Volumendurchflusses. In Kooperation mit der Technischen Universität Dresden konnte die Ortsauflösung für die Strömungsprofilmessung unter den gegebenen Randbedingungen um eine Größenordnung auf 25 µm verbessert werden.

Im Bereich bildgebender Messverfahren zur Untersuchung komplexer Strömungsgeschwindigkeitsfelder wurde ein neues Verfahren zur schnellen Laserfrequenzumtastung der Laserlichtschnitte entwickelt, das in der Doppler-Global-Velozimetrie (DGV) – einem spektroskopischen Geschwindigkeitsfeldmessverfahren – eine Eigenkalibrierung des Gesamtsystems bei der Auswertung der Dopplerverschiebungen des gestreuten Laserlichts erlaubt. Hierdurch lassen sich wesentliche Unsicherheitsbeiträge in konventionellen DGV-Systemen deutlich reduzieren.

Im Bereich der Laser-Doppler-Anemometer-(LDA)-Entwicklung konnte durch den Einsatz von hochintegrierten, fasergekoppelten, abstimmbaren Laserdiodenmodulen aus dem Telekommunikationsbereich ein kompaktes Zwei-Komponenten-LDA-System realisiert werden, das sich durch eine hohe Modularität und Flexibilität auszeichnet und sich aufgrund der messtechnischen Konzeption sowohl für die mehrkomponentige Strömungsgeschwindigkeitsmessung als auch für die hochauflösende Strömungsgeschwindigkeitsprofilmessung einsetzen lässt.

Der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Aktivitäten des Fachbereichs *Flüssigkeiten* liegt weiterhin beim Hydrodynamischen Prüffeld (HDP) und der Entwicklung von

geeigneten TransfERNormalen mit dem Ziel, das HDP als Durchfluss-Primärnormal für alle Flüssigkeiten und entsprechende Prüfstände in Deutschland zu etablieren. Vergleichsmessungen zwischen dem mit Wasser betriebenen HDP (erweiterte, relative Messunsicherheit  $\leq 0,02\%$ ) und dem mit Testbenzin betriebenen Mineralölzählerprüfstand der PTB (erweiterte, relative Messunsicherheit  $\leq 0,05\%$ ) mit Hilfe von Coriolis-Durchflussmessgeräten brachten bereits sehr gute Übereinstimmungen im Rahmen der Messunsicherheiten der beiden Prüfstände. Neben den konventionellen Messverfahren mittels Coriolis- oder Turbinendurchflussmessgeräten werden auch alternative, neuartige Methoden hinsichtlich ihrer Eignung als weitgehend medienunabhängige Vergleichsnormale untersucht, so z. B. auf der Basis der Messung des Impulsflusses der Strömung (Bild 7).

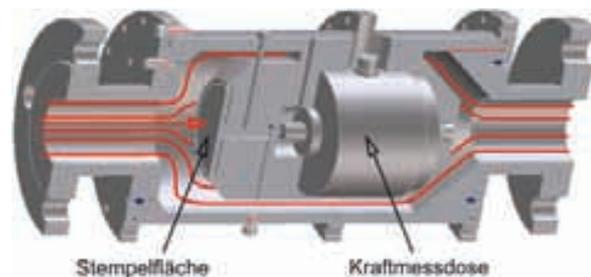


Bild 7: CAD-Darstellung eines Durchflussmessgerätes auf der Basis der Messung des Impulsflusses der Strömung.

Die größten Beiträge im Messunsicherheitsbudget des HDP resultieren zur Zeit aus dem Betrieb der Durchfluss-Umschalteneinrichtung (Diverter). Ziel der laufenden Forschungsaktivitäten ist es daher, die dynamischen Durchflussvorgänge besser zu verstehen und bei der laufenden Messung so zu berücksichtigen, dass die Gesamtmessunsicherheit des HDP über dessen gesamten Durchflussbereich bis 2100 m<sup>3</sup>/h deutlich verringert werden kann. Hierzu konnte erstmals ein theoretisches Modell der Strömungsvorgänge innerhalb des Diverter entwickelt werden, das numerische Simulationsrechnungen ermöglicht, wobei alle relevanten Strömungs- und Einflussgrößen, d.h. die kinematischen Bewegungsgrößen der Diverterbewegung und die Strömungskenngrößen, explizit erfasst werden und bei der Bauteilopti-

mierung quantitativ berücksichtigt werden können.

Weiterhin wurde die bisher überwiegend bei Gasen eingesetzte LDA-Technik erfolgreich zur Diagnose von Einlaufstörungen und deren Auswirkungen auf die Fehlerkurve von Durchflussmessgeräten eingesetzt. Unter anderem konnte nachgewiesen werden, dass Standardstörkörper, wie sie in internationalen Normen und Vorschriften vorgegeben sind, nicht geeignet sind, um reale Einlaufstörungen, z. B. durch einen doppelt gekrümmten Raumkrümmer, zu simulieren. Diese Erkenntnisse sind hilfreich, um die betreffenden Normen demnächst zu revidieren und besser an praxisnahe Bedingungen anzupassen.

Ein weiterer Schwerpunkt im Fachbereich *Flüssigkeiten* ist die Produktzertifizierung von Wasserzählern, von Messanlagen für Flüssigkeiten außer Wasser und von Messgeräten zur Mengenmessung ruhender Flüssigkeiten. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei die seit dem 30. Oktober 2006 in Kraft getretene europäische Messgeräte-richtlinie (MID) dar, deren Anhänge MI-001 (Wasserzähler) und MI-005 (Messanlagen für die kontinuierliche und dynamische Messung von Mengen von Flüssigkeiten außer Wasser) in den Verantwortungsbereich des Fachbereichs *Flüssigkeiten* fallen. In enger Zusammenarbeit mit den Herstellern der betreffenden Messgeräte und Messanlagen ist es gelungen, im Berichtszeitraum bereits 40 europäische Zulassungen, so genannte „Entwurfsprüfbescheinigungen“ und „Baumusterprüfbescheinigungen“, auszustellen. Darüber hinaus erfolgte eine intensive Beratungstätigkeit im Hinblick auf die durch die Einführung der MID gestiegenen messtechnischen Anforderungen sowie die neuen Methoden des Inverkehrbringens von Messgeräten.

Im Rahmen der europäischen Zusammenarbeit auf dem Gebiet des gesetzlichen Messwesens, WELMEC, war der Fachbereich *Flüssigkeiten* wesentlich an der Ausarbeitung europäisch abgestimmter Prüfprozeduren für Wasserzähler, Mineralölzähler und andere Messsysteme für Flüssigkeiten außer Wasser beteiligt. Zudem stellt der Fachbereich – zusammen mit dem NIST (USA) – das Sekretariat des OIML-Arbeitsausschusses TC8/SC3, der die fachliche Koordination der

Revision der international wichtigen OIML-Empfehlung R117 (Messsysteme für Flüssigkeiten außer Wasser) zur Aufgabe hat. Die kürzlich fertiggestellte Revision der R117 hat schon im Vorfeld große Zustimmung erfahren und ist mittlerweile vom Internationalen Komitee für gesetzliches Messwesen (CIPM) verabschiedet worden. Im Jahr 2007 wurden ca. 20 OIML-Zertifikate bzw. OIML-Prüfberichte nach R117 (Ausgabe 1995) erstellt, was deutschen Herstellern einen leichteren Zugang zu weltweiten Märkten ermöglicht.

### 1.3 Akustik, Ultraschall und Beschleunigung

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

Im Rahmen des PTB-Konzepts 2016 wurden für diesen Themenbereich die dynamische Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern sowie Arbeiten zur Charakterisierung von fokussierten Hochintensitäts-Ultraschall-(HIFU-)Feldern als relevante Schwerpunktthemen mit Ausbaupotential bestimmt.

Schwerpunkt der Arbeitsgruppe *Darstellung Beschleunigung* im Fachbereich *Kinematik* sind neuartige, in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe *Messdatenanalyse und Messunsicherheit* der Abteilung 8 *Medizinphysik und Messdatenanalyse* entwickelte Verfahren zur modellgestützten Charakterisierung von Beschleunigungsaufnehmern bei stoßförmiger Anregung. Auf diesem Gebiet wird derzeit in einer Industriekooperation das Verfahren in eine industrielle Nutzung überführt und auf seine Anwendbarkeit im Umfeld der industriellen Kalibrierung geprüft.

Zur Verringerung der relativen Messunsicherheit bei der interferometrischen Stoßkalibrierung in der PTB und bei der Stoßkalibrierung in DKD-Laboratorien wurden verschiedene Störeinflüsse untersucht. Dazu zählen insbesondere die Beschleunigungsverteilung auf der Oberfläche des Hopkinson-Stabes und auf der Deckelfläche von Beschleunigungsaufnehmern (back-to-back-Bauweise), die Querrichtungsempfindlichkeit der Beschleunigungsaufnehmer bei stoßförmiger Anregung sowie der Einfluss der Befestigung der Bezugsnormale (an der Basis- oder der Deckelfläche) und der Richtung der Krafteinleitung in das Bezugsnormal.

Zur Verbesserung der Verkehrssicherheit und der dazu erforderlichen Verkehrsüberwachung hat die Industrie entsprechend dem Bedarf der Polizei zunehmend mehrzweckfähige Geräte entwickelt, die auch im dichten Verkehr effektiv einsetzbar sind. Für die Prüfung derartiger Geräte bei der Bauartzulassung wurde im Fachbereich *Kinematik* ein völlig neues Referenzgerät mit einer relativen Messunsicherheit von weniger als 0,3 % entwickelt, das auf 4 in die jeweilige Fahrspur eingelassenen piezoelektrischen Drucksensoren basiert. Die Signale werden vollständig digitalisiert und mit einer LABVIEW-

Software ausgewertet; die Messergebnisse werden gemeinsam mit denen des Prüflings gespeichert und in eine Videodokumentation der zugehörigen Verkehrssituation eingebunden.

Mit weltweit über 4000 Raketenstarts ist neben der Nutzlast (Satelliten) auch eine Menge Müll in den erdnahen Weltraum gelangt, vor allem in Form von kleinsten Partikeln, z. B. Schlackerückstände von Raketenmotoren oder bei Treibstoffexplosionen erzeugte Fragmente. Wegen der meist hohen Relativgeschwindigkeiten im Falle einer Kollision können selbst Teilchen von Mikrometergröße Schäden hervorrufen. Um diese Schäden besser abschätzen zu können, ist in der PTB im Rahmen eines AiF-Forschungsprojektes der Prototyp eines laseroptischen Messaufbaus entwickelt worden, der die Geschwindigkeit solcher Teilchen mit Hilfe von Laser-Lichtvorhängen ermittelt. (Bild 8). Das Verfahren ist auch dazu geeignet, die Geschwindigkeiten von Geschossen (z. B. Schrotkugeln) genau zu messen. Der Messaufbau wurde in der Arbeitsgruppe *Dynamische Druckmessung* im Fachbereich *Kinematik* und beim Projektpartner EMI in Freiburg mit Hochgeschwindigkeitsprojektilen (Geschwindigkeit max. 5,7 km/s,

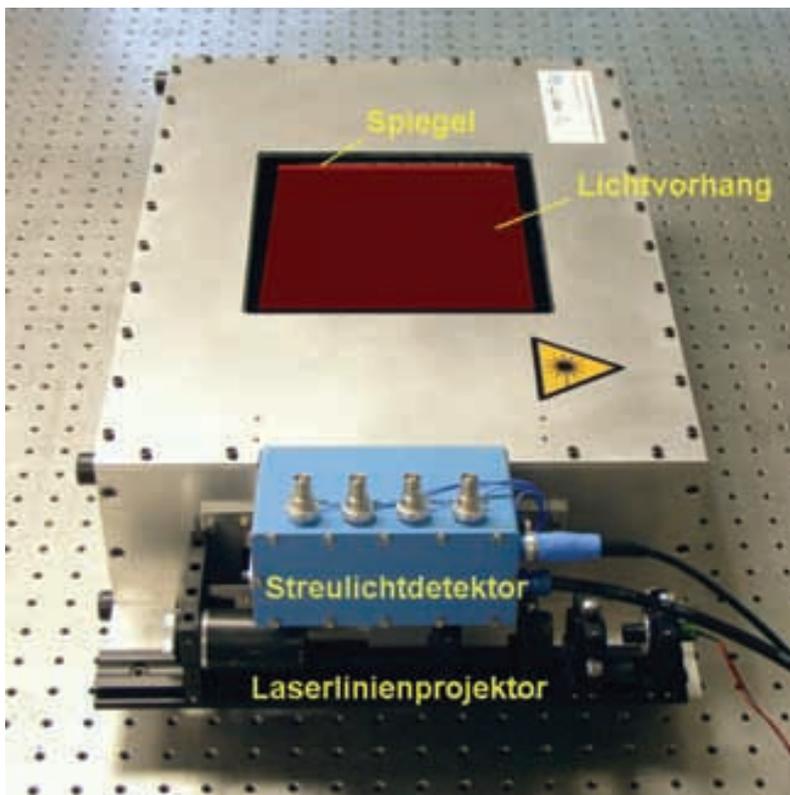
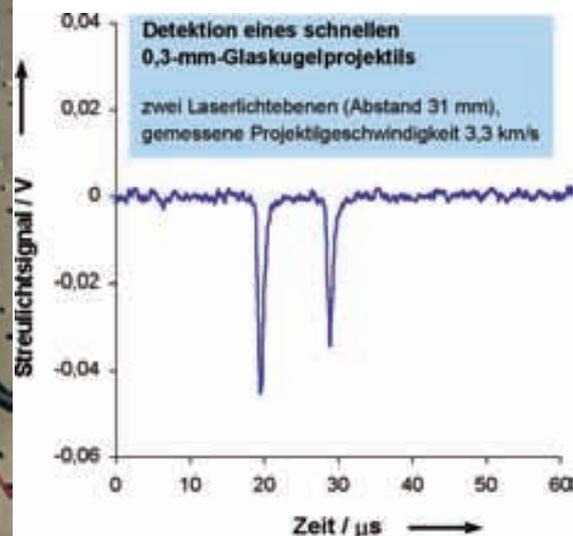


Bild 8. Detektor für die Geschwindigkeit von kleinen schnellen Weltraumpartikeln und Signale bei einem Funktionstest mit Glaskugelprojektilen.



kleinste Größe ca. 0,05 mm) erfolgreich getestet.

Im Dienste der Patientensicherheit werden Audiometer einmal im Jahr gewartet und darauf überprüft, ob sie Werte liefern, die eine korrekte Beurteilung des Hörvermögens gewährleisten. Die dafür notwendigen Normale, so genannte Ohrsimulatoren, werden im Fachbereich *Schall* geprüft bzw. kalibriert, der dafür eine entsprechende Referenz vorhält. Letztere wird durch drei zuverlässige Prototypen dargestellt, deren Konstanz bisher aus vielen Vergleichsmessungen hergeleitet wurde. Um eine objektive Rückführung zu ermöglichen, wurde ein neues Kalibrierverfahren entwickelt, dessen Funktionsfähigkeit, Verlässlichkeit und Genauigkeit in einem internationalen Projekt (Teilnehmer aus Dänemark, Frankreich, Großbritannien und Polen) getestet wurde. Seine Ergebnisse haben maßgeblich zum Fortschritt in der internationalen Normung von Ohrsimulatoren beigetragen.

Im Fachbereich *Schall* wurde im Rahmen einer Kooperation mit der Firma Hella Fahrzeugkomponenten GmbH, Bremen, ein Messaufbau zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in einem großen Temperaturbereich von 8 °C bis 153 °C entwickelt und aufgebaut, um neuentwickelte Ölstandssensoren für Automotoren prüfen zu können. Bei jeder Messtemperatur wurden Ultraschalllaufzeiten bestimmt, indem zwei Echos von einem Reflektor aufgezeichnet wurden, der zwischen diesen Aufzeichnungen um eine genau vorgegebene Strecke verfahren wurde. Die Schallgeschwindigkeit wurde für 10 Motorölproben mit unterschiedlichen Viskositätsspezifikationen, von verschiedenen Herstellern und unterschiedlichen Gebrauchsalters einschließlich unbenutzter Proben ermittelt. Letztlich werden die Ergebnisse für die Verbesserung der im Ölfüllstandssensor integrierten Temperaturabhängigkeitskompensation Verwendung finden.

Aus praktischen Gründen ist es wichtig zu wissen, wie lokal begrenzt das Ergebnis einer Schallfeldmessung in kavittierenden Medien ist. Mit Hilfe einer neu entwickelten Methode war es möglich, den Empfangsbereich einer Schallfeldmessung zu bestimmen. Dazu wurde das Schallfeld mit zwei kalibrierten,

baugleichen Hydrophonen gemessen, die sich vis-a-vis in der Kavitationswolke gegenüberstanden. Aus der Veränderung der Korrelation der beiden gemessenen Signale bei einer Variation des Abstands der beiden Hydrophone konnte der Empfangsbereich einer Schallfeldmessung mit typisch 1 mm bis 3 mm bestimmt werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass mit Schallfeldmessungen lokale Vorgänge dargestellt und z. B. für Optimierungsvorgänge eingesetzt werden können.

Als Schwerpunkt führt die Arbeitsgruppe *Bauakustik* im Fachbereich *Angewandte Akustik* Grundlagenuntersuchungen zur messtechnischen Erfassung akustischer Luft- und Körperschallfelder durch. Die Arbeiten im letzten Jahr waren dabei geprägt von der verstärkten Anwendung der Modellmesstechnik, mit deren Hilfe der Einfluss von Geometrieparametern auf die Luftschalldämmung systematisch untersucht werden konnte. Die Ergebnisse finden ihre Anwendung unter anderem in einer Klarstellung der Definition der Luftschalldämmung, einer zentralen bauakustischen Kenngröße. Turnusgemäß fanden außerdem die Vergleichsmessungen der Prüfstellen zur Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Prüfzeugnisse in der PTB statt. Dazu kamen 10 Messteams in die PTB, um Luft- und Trittschalldämmungen zu ermitteln. Die Ergebnisse aller Teilnehmer lagen innerhalb der vorgegebenen Toleranzen, so dass die Qualität bauakustischer Messergebnisse in Deutschland weiterhin als hoch angesehen werden kann.

Schwerpunkt in der Arbeitsgruppe *Geräuschmesstechnik* im Fachbereich *Angewandte Akustik* sind Bauartzulassungen von Schallpegelmessgeräten, den wichtigsten Messgeräten zur Messung von Lärm. Für die akustische und elektrische Prüfung von Schallpegelmessgeräten sind zwei neue Messplätze entwickelt und fertiggestellt worden. Mithilfe dieser beiden neuen Messplätze ist es nun möglich, Bauartprüfungen unter Berücksichtigung der Schallpegelmessgerätenorm DIN EN 61672 durchzuführen. Damit gehört die PTB zu den wenigen Stellen weltweit, wo Schallpegelmessgeräte gemäß der Norm DIN EN 61672 geprüft werden können. Ein weiteres wichtiges Ar-

---

beitsfeld ist die Kalibrierung von Labor-  
normalmikrofonen im Freifeld.

In der Verfahrenstechnik gelten Nano-  
flüssigkeiten als potentielle Kandidaten für  
Arbeitsfluide mit verbesserter Wärme-  
leitfähigkeit. Zusammen mit der Helmut-  
Schmidt-Universität, Hamburg, wurden in  
der Arbeitsgruppe *Wärmeleitfähigkeit* un-  
terschiedliche Suspensionen metallischer  
Nanoteilchen untersucht. Die Ergebnisse  
haben indes die hohen Erwartungen noch  
nicht erfüllt. In der Energietechnik gilt Diesel-  
öl als möglicher alternativer Treibstoff für  
Brennstoffzellen. Als Beitrag zu dessen Quali-  
fizierung wurde die Wärmeleitfähigkeit  
verschiedener Dieselöle präzise gemessen. Im  
Rahmen einer Forschungs Kooperation mit  
dem Fraunhofer-Institut für Holzforschung,  
Braunschweig, konnten mit einem neu ent-  
wickelten, mittlerweile patentierten  
Messverfahren erstmals die Wärme-  
leitfähigkeiten bestimmter nachwachsender  
Rohstoffe präzise ermittelt und der Nachweis  
ihrer Eignung zur Wärmedämmung von  
Gebäuden erbracht werden.

# In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

## Grundlagen der Metrologie

### 235. PTB-Seminar „Zukunft der Metrologie strömender Medien“

Am 3. und 4. September 2007 fand auf dem PTB-Campus in Berlin-Charlottenburg das 235. PTB-Seminar „Zukunft der Metrologie strömender Medien“ mit 80 Teilnehmern u. a. aus Deutschland, Österreich und der Schweiz statt (R. Schwartz, Abt. 1, [roman.schwartz@ptb.de](mailto:roman.schwartz@ptb.de))

### Verbesserte Stabilität des 1-kg-Vakuum-Massekomparators Sartorius CCL1007 gegenüber kurzzeitigen Temperaturschwankungen

Durch eine zusätzliche thermische Isolierung des 1-kg-Vakuum-Massekomparators Sartorius CCL1007 konnte die Stabilität des Systems in Luft deutlich verbessert werden. Massebestimmungen sind in Luft nun mit Standardabweichungen im Bereich  $< 0,1 \mu\text{g}$  möglich. Vergleichbare Werte wurden bislang nur unter Vakuumbedingungen erreicht. (M. Borys, FB 1.1, [michael.borys@ptb.de](mailto:michael.borys@ptb.de))

### Justierung der Hebelarmlängen an der 20-kN · m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung

Die 20-kN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung der PTB gehört zu den besten Einrichtungen ihrer Art in der Welt. Um diese Spitzenstellung auch weiterhin sicherzustellen, werden regelmäßig Untersuchungen und Vergleiche durchgeführt. Dabei zeigte sich in den letzten Jahren eine kleine Unsymmetrie in den Armlängen des Hebels (der rechte Arm war ca.  $10 \mu\text{m}$  zu kurz, der linke um etwa den selben Betrag zu lang), die jetzt trickreich behoben wurde. (D. Röske, FB 1.2, [dirk.roeske@ptb.de](mailto:dirk.roeske@ptb.de))

### Optimierung der Ionenstrahl-Apparatur zu maximaler Transmission

Beim Experiment Ionenakkumulation wird die Masse akkumulierter Ionen und damit auch die Messunsicherheit von der Höhe des Ionenstroms am Kollektor bestimmt. Um mit der bestehenden Apparatur den maximalen Ionenstrom zu erzielen, wurden Simulationen und Messungen durchgeführt, mit denen die Parameter Gasdruck und Extraktionsspannung in der Ionenquelle sowie die Transmission des Dipolmagneten optimiert wurden. (Ch. Schlegel, FB 1.2, [christian.schlegel@ptb.de](mailto:christian.schlegel@ptb.de))

### Aufbau einer neuartigen Kraft-Normalmesseinrichtung für den Bereich 1 mN bis 2 N

Die Kraft-Normalmesseinrichtungen der PTB dienen zur Darstellung der Einheit Newton von bisher 16,5 MN bis 0,5 N. Um diesen Messbereich zu kleineren Kräften hin zu erweitern, wurde eine neue Einrichtung in Betrieb genommen. Zur Rückführung werden statt herkömmlicher Belastungskörper moderne elektromagnetisch kompensierte Wägezellen verwendet. So können Kraftaufnehmer im Bereich von 1 mN bis 2 N mit bekannter Messunsicherheit kalibriert werden. (J. Illeemann, FB 1.2, [jens.illeemann@ptb.de](mailto:jens.illeemann@ptb.de))

### Messung der Geschwindigkeit von kleinen Hochgeschwindigkeitspartikeln

Zur Geschwindigkeitsmessung von kleinen Weltraumpartikeln wurde ein Messaufbau entwickelt, der den beim Durchflug durch eine Laserlichtebene entstehenden Lichtblitz detektiert. Erste Funktionstests mit schnellen Miniaturgeschossen wurden erfolgreich absolviert. Der Messaufbau ermöglicht durch Detektion und Auswertung einzelner Lichtblitze auch die Untersuchung von Geschossgarben. (M. Kobusch, FB 1.3, [michael.kobusch@ptb.de](mailto:michael.kobusch@ptb.de))

### **Neuerungen für spektroskopische Geschwindigkeitsfeldmessungen**

Das entwickelte Verfahren zur Eigenkalibrierung während eines Messvorgangs erlaubt präzise spektroskopische Geschwindigkeitsfeldmessungen ohne die sonst notwendige Vorabkalibrierung und Stabilisierung der Absorptionszellenparameter. (H. Müller, FB 1.4, harald.mueller@ptb.de)

### **Abstimmbare Lasermodule aus dem Telekommunikationsbereich für die Strömungsmessung**

Hochintegrierte fasergekoppelte und abstimmbare Laserdiodenmodule aus dem Telekommunikationsbereich erlauben die Realisierung miniaturisierter Laser-Doppler-Anemometer, die durch ihre messtechnische Konzeption eine hohe Modularität für mehrkomponentige Strömungsgeschwindigkeits- und hochauflösende Geschwindigkeitsprofilmessungen aufweisen. (H. Müller, FB 1.4, harald.mueller@ptb.de)

### **Dynamische Flüssigkeitsmessungen mit dem Hydrodynamischen Prüffeld**

Erstmals wurde ein modellbasiertes Konzept zur Darstellung des Momentandurchflusses einer strömenden Flüssigkeit entwickelt und mit ersten Untersuchungsergebnissen auf dem Hydrodynamischen Prüffeld belegt. Im Gegensatz zur sonst üblichen Durchflussmessung, bei der der mittlere Durchfluss über den Gesamtzeitraum einer Messung ermittelt wird, ermöglicht das neue, dynamische Verfahren erstmals die differentielle Messung des Momentandurchflusses mit Rückführung auf ein Primärnormal. (J. Aguilera, FB 1.5, jesus.aguilera@ptb.de)

### **Bauakustik en miniature**

Bauakustische Problemstellungen können sehr gut in kleinen Miniaturmodellen untersucht werden. Sie sind flexibler, weniger aufwendig und günstiger als die üblichen Messungen in großen, genormten Prüfständen, sowie zuverlässiger und umfassender als die meisten Computersimulationen. Gemäß Ähnlichkeitstheoretischen Gesichtspunkten wurde ein 1:10-Modell eines bauakustischen Wandprüfstandes entworfen und validiert. (C. Kling, FB 1.7, christoph.kling@ptb.de)

### **Charakterisierung viskoelastischer Materialien mit Hilfe von N-Parameter-Modellen**

Für eine Reihe experimenteller und numerischer Untersuchungen an bauakustischen Modellprüfständen wurden detaillierte Daten über die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Materialien benötigt. Zur Ermittlung solcher Materialeigenschaften, wie dem Elastizitätsmodul oder der Materialdämpfung, gibt es eine Reihe von etablierten – teils genormten – Messverfahren. Diese liefern jedoch üblicherweise nur Einzahlwerte bei fester Frequenz. Viele Materialien können mit einem linearen viskoelastischen Werkstoffmodell beschrieben werden. In einer Kombination aus Messung und numerischer Analyse lassen sich die viskoelastischen Parameter eines Stoffes identifizieren. Dann können die komplexen mechanischen Eigenschaften mit einer handvoll reeller Zahlen in einem weiten Frequenzbereich beschrieben werden. Die Parameter von Silikon, Acrylglas und Aluminium wurden identifiziert. (C. Kling, FB 1.7, christoph.kling@PTB.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Entwicklung eines Wägezellen-Federkörpers aus einkristallinem Silizium für den Einsatz in der Präzisionswägetechnik**

Die ideal elastischen Materialeigenschaften von einkristallinem Silizium machen dieses Material interessant für den Einsatz in Präzisionswaagen. Ein erster Wägezellen-Federkörper aus einkristallinem Silizium mit einer Nennlast von 6 kg wurde in der PTB entwickelt und gefertigt. Hierbei stellen das spröde Materialverhalten von Silizium und die zu realisierenden, 1 mm dicken Dünnschichten eine besondere fertigungstechnische Herausforderung dar. In nachfolgenden Entwicklungsschritten werden mit dem Dünnschichtverfahren der Sputterdeposition Dehnungsmessstreifen an ausgewählten Positionen auf dem Federkörper appliziert und erste experimentelle Untersuchungen durchgeführt.

(S. Mäuselein, FB 1.1, sascha.maeuselein@ptb.de)

### **Das neue Schwere-Informationssystem (SIS)**

Mit dem Schwere-Informationssystem ist auf den Webseiten der PTB eine neue Auskunftsplattform eingerichtet worden, auf der sich Anwender aus der Metrologie über die lokale Intensität des Schwerfeldes der Erde bezogen auf den Anwendungsort informieren können. Als Datengrundlage dient ein vierstufiges Schweredatenmodell, das sich hauptsächlich aus frei verfügbaren, sekundären, d.h. abgeleiteten, Schwerfeldgrößen zusammensetzt. (A. Lindau, FB 1.1, andreas.lindau@ptb.de)

### **Kalibrierung von Kraft-Vektoraufnehmern mit geringsten Unsicherheiten**

Mit bisherigen Präzisionskraftaufnehmern wird die Kraft in einer durch die Aufnehmerbauform vorgegebenen Achse gemessen. In den letzten Jahren stieg jedoch die Nachfrage nach Kraftaufnehmern, die in allen räumlichen Achsen mit ähnlicher Präzision arbeiten (Kraft-Vektoraufnehmer). Zusätzlich sollen Drehmomente in den verschiedenen Achsen gemessen werden. In einem Forschungsvorhaben mit einem Industriepartner sollen nun entsprechende Aufnehmer und – in der PTB – entsprechende Kalibrierverfahren entwickelt werden. (S. Lietz, FB 1.2, sara.lietz@ptb.de, F. Tegtmeier, FB 1.2, falk.tegtmeier@ptb.de)

### **Technologietransfer dynamischer Messverfahren**

Im Juni startet das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderte Projekt „Modellgestützte Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern“, das die PTB gemeinsam mit „SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH Dresden“ durchführt. Die Förderung erfolgt im Rahmen des MNPQ-Transfer Programms des BMWi, mit dem der Technologietransfer von innovativen Messverfahren in kleinere und mittlere Unternehmen unterstützt wird. (T. Bruns, FB 1.3, thomas.bruns@ptb.de, A. Link, FB 8.4, alfred.link@ptb.de, C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Je heißer das Motoröl, desto langsamer der Ultraschall**

Im Auftrag der Hella Fahrzeugkomponenten GmbH, Bremen wurden Messungen der Ultraschallausbreitungsgeschwindigkeit in Motorölen als Funktion der Temperatur im Bereich von 8 °C bis 153 °C durchgeführt. Die erhaltenen Daten sind wichtig für die Einschätzung der Unsicherheit bei der kürzlich entwickelten ultraschallgestützten Ölfüllstandsmessung in Automotoren. (V. Wilkens, FB 1.6, volker.wilkens@ptb.de)

### **Empfangsbereich einer Schallfeldmessung in kavitierenden Medien**

Der Empfangsbereich einer Schallfeldmessung in einer Blasenwolke wurde bestimmt, um Schallfeldmessungen in Zukunft noch besser für die Optimierung von Kavitationsanwendungen einsetzen zu können. (C. Koch, FB 1.6, ultrasonics@ptb.de)

### **Erste komplexwertige Hydrophonkalibrierung im Kundenauftrag**

Im Vorgriff auf die demnächst erscheinende Norm IEC 62127-1 wurde von einem großen europäischen Hersteller für medizinische Ultraschalldiagnostikgeräte die komplexwertige Kalibrierung eines seiner im internen Prüflabor eingesetzten Hydrophone angefordert und von der PTB erfolgreich durchgeführt. (V. Wilkens, FB 1.6, volker.wilkens@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Start der Arbeitsgruppe 1.13 „Dynamisches Wägen“ in das Zeitalter der MID**

Ausgehend vom Inkrafttreten der neuen Messgeräte Richtlinie 2004/22/EG (MID) am 31.03.2004 hat sich die Arbeitsgruppe 1.13 der PTB bereits lange vor der geplanten EU-weiten Umsetzung zum 30.10.2006 auf die neue Entwicklung eingestellt. Anfang des Jahres 2005 wurden ca. 100 Waagenhersteller angeschrieben, auf das Datum 30.10.2006 aufmerksam gemacht und gebeten, rechtzeitig Anträge zu stellen. Insgesamt wurden 63 Anträge vor dem 30.10.2006 gestellt, einige wurden später zurückgezogen, andere mussten abgelehnt werden. Über zwanzig Baumusterprüfbescheinigungen konnten pünktlich zum 30.10.2006 oder im Laufe des Folgemonats ausgestellt werden. (C. Schulz, FB 1.1, carsten.schulz@ptb.de)

### **Mikrofonkalibrierung für den Luft-Ultraschall**

Mittels Freifeld-Reziprozitätskalibrierung von Viertelzoll-Messmikrofonen wurde die Grundlage für die Darstellung der Schalldruckeinheit für Frequenzen bis 160 kHz geschaffen. (T. Fedtke, FB 1.6, thomas.fedtke@ptb.de)

### **Diagnostische Sicherheit durch verbesserte Ausbildung**

Ausbildungsmaterial über die physikalischen und technischen Grundlagen der Sonographie dient der Verbesserung der Ausbildungsqualität von Ärzten und damit der diagnostischen Sicherheit. (K.-V. Jenderka, FB 1.6, klaus-vitold.jenderka@ptb.de)

### **Im Prüfstand ermittelte Schalldämmungen werden am Bau nicht erreicht**

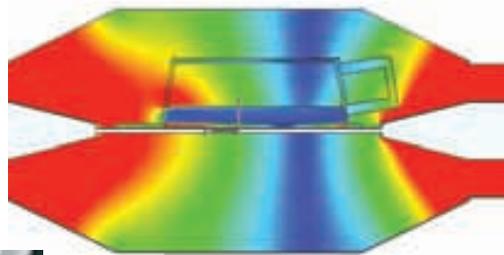
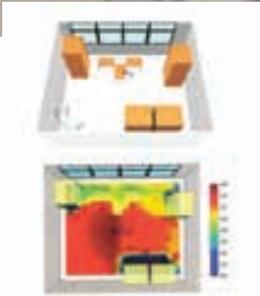
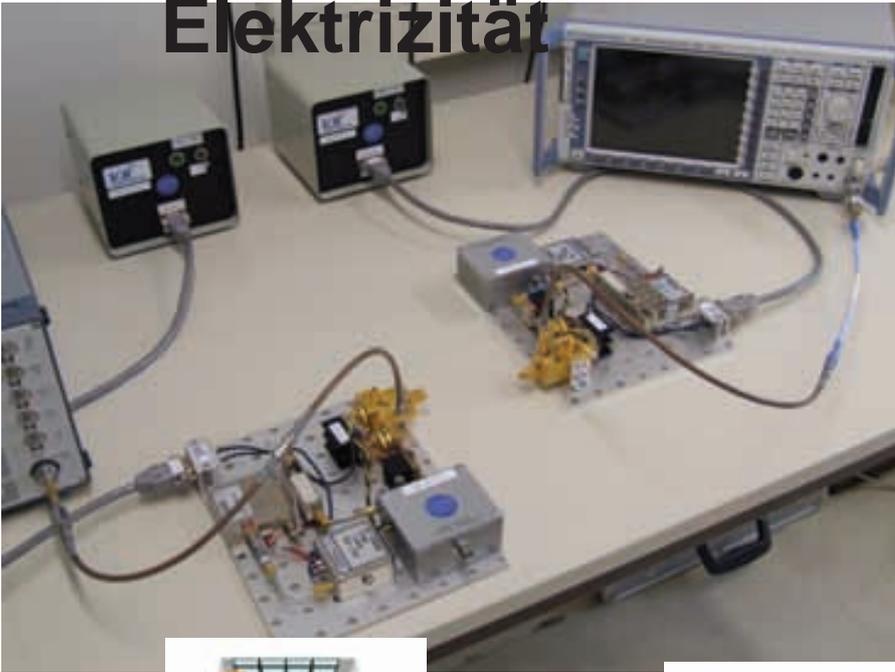
Durch Modellmessungen wurde gezeigt, dass homogene Bauteile im Prüfstand eine höhere Schalldämmung als am Bau aufweisen. Der Effekt ist breitbandig, nimmt mit der Frequenz ab und beträgt bis zu 5 dB bei tiefen Frequenzen. (V. Wittstock, FB 1.7, volker.wittstock@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

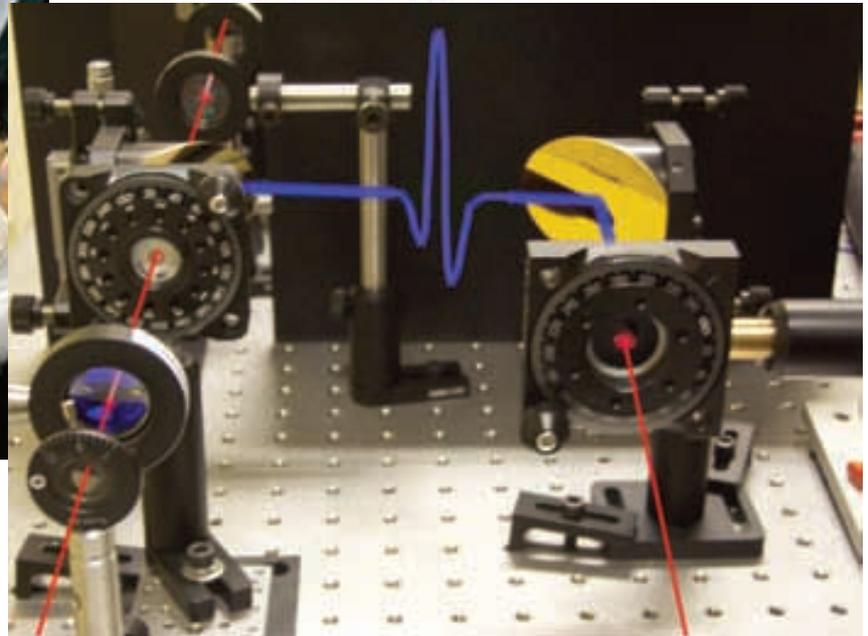
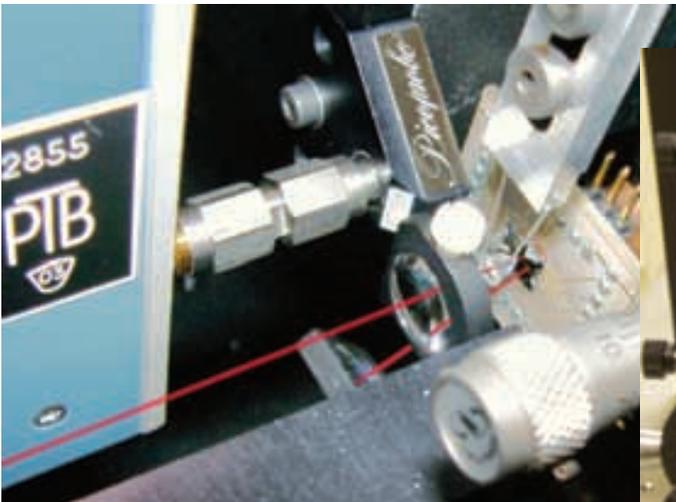
#### **Erweiterung des bilateralen Abkommens mit Japan zur Anerkennung von Prüfergebnissen von nichtselbsttätigen Waagen**

Seit 1999 existiert ein deutsch-japanisches Abkommen über die gegenseitige Anerkennung der Prüfergebnisse von nichtselbsttätigen Waagen. Der rasante messtechnische Fortschritt der letzten Jahre auf dem Gebiet der Wägetechnik machte eine Revision dringend erforderlich. Daher wurde am 5. Juni 2007 eine umfassende Erweiterung zwischen der PTB und dem National Metrology Institute of Japan unterzeichnet. (R. Schwartz, Abt. 1, roman.schwartz@ptb.de, P. Zervos, FB 1.1, panagiotis.zervos@ptb.de)

Elektrizität



Berichte der Abteilungen



Abteilung



# Elektrizität

Die Abteilung *Elektrizität* hat sich im Rahmen des Konzepts PTB 2016 einer umfassenden Aufgabenkritik unterzogen, die praktisch alle Aufgabenbereiche der Abteilung einbezogen hat. Ziel dieses Konzepts war es, wichtige zukünftige Aufgabenbereiche rechtzeitig zu erkennen und die erforderlichen Ressourcen für ihren Ausbau bereitzustellen. Dies ließ sich nur durch Rationalisierungsmaßnahmen bei den Kalibrieraufgaben im Gebiet Gleichstrom und Niederfrequenz sowie eine Reduzierung von nicht mehr im Vordergrund stehenden Forschungs- und Entwicklungsaufgaben bewerkstelligen. Die Abteilung hat einen großen Teil dieser Maßnahmen bereits umgesetzt und glaubt, damit für die Zukunft gut aufgestellt zu sein. Nachfolgend werden die wichtigsten Forschungsergebnisse der Abteilung vorgestellt, geordnet nach den Geschäftsbereichen der PTB.

## Grundlagen der Metrologie

Josephson-Arrays mit SNS-Kontakten zeichnen sich durch eine einfache, robuste Technologie aus, besaßen aber bisher den Nachteil, dass sie nur bei niedrigeren Treiberfrequenzen (20 GHz) betrieben werden konnten und damit bei gleicher Kontaktzahl auch deutlich geringere Ausgangsspannungen lieferten. In Kooperation mit dem NIST ist es jetzt erstmalig gelungen, eine am NIST entwickelte Technologie zur Herstellung von SNS-Kontakten, die bei höheren Frequenzen betrieben werden können, mit dem in der PTB entwickelten

### Titelbild

Collage aus den Forschungsgebieten der Abteilung im Querschnittsprojekt THz-Metrologie (von links oben nach rechts unten)

- Demonstrator für eine Datenübertragung mit GBit/s bei 300 GHz
- Ausbreitung von THz-Signalen in Innenräumen
- Gentoxische Untersuchungen von THz-Strahlung
- PTB-Normal für die Anstiegszeitmessung
- Versuchsaufbau zur rein optischen Generierung von Stromimpulsen

Schaltungsdesign zu kombinieren und damit Arrays für den Einsatz bei höheren Frequenzen (75 GHz) zu entwickeln. Ein erster Prototyp für ein 1-V-Array wurde bereits erfolgreich getestet und kann in Zukunft die sehr viel aufwendigeren SINIS-Arrays ersetzen.

SNS-Kontakte eignen sich auch sehr gut für pulsgetriebene Josephson-Spannungsnormale zur Erzeugung beliebiger Wellenformen bei höheren Frequenzen. Voraussetzung dafür ist die Herstellung kompakter Reihenschaltungen mit einer möglichst hohen Anzahl von Kontakten auf kleinster Fläche. Das in der PTB entwickelte Design mit mäanderförmiger Anordnung der Kontakte erfüllt diese Forderungen (Bild 1). Mit mehr als 10 000 Kontakten auf einer Grundfläche von weniger als 0,1 mm<sup>2</sup> konnte eine sinusförmige Spannung von über 200 mV bei einer Frequenz von 2,5 kHz erzeugt werden. Ein weiteres Merkmal für pulsgetriebene Josephson-Schaltungen ist die Spektralreinheit. In Zusammenarbeit mit dem NMi-VSL, Niederlande, konnte die Unterdrückung unerwünschter Oberschwingungen etwa um einen Faktor 2 auf mehr als – 80 dBc verbessert werden.

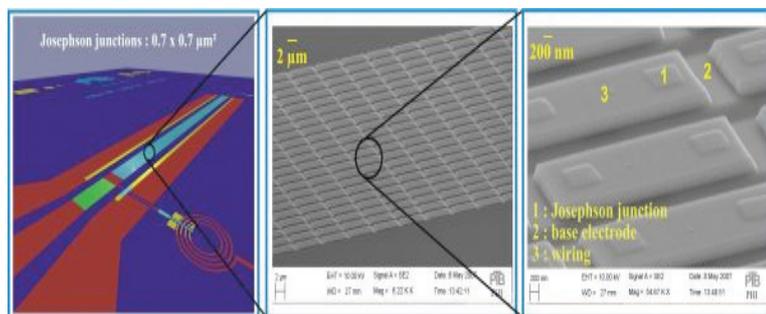


Bild 1: Schema und Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen einer mäanderförmigen SNS-Schaltung

Mit dem Nachweis, dass Quanten-Hall-Widerstände mit geringer Unsicherheit auch bei Wechselstrom zu verwenden sind, lässt sich die Messkette zur bewahrten Kapazitätseinheit deutlich vereinfachen. Das Herzstück



Bild 2: Doppelprobenhalter für zwei Quanten-Hall-Widerstände zum Einsatz in einer Quadraturbrücke

bildet eine Quadraturbrücke, in der zwei Quanten-Hall-Widerstände (12,9 k $\Omega$ ) direkt mit zwei Kondensatoren (10 nF) verglichen werden können (Bild 2). Dieses verkürzte Verfahren bietet eine ganze Reihe von

Vorteilen: Reduzierung des thermischen Rauschens durch Messung bei Helium-Temperaturen, Umgehung berechenbarer AC/DC-Transferwiderstände, keine Spannungssprünge in der Kette, d.h., kein Einfluss der Spannungsabhängigkeit der Kapazitätsnormale.

Für den kontrollierten Transfer einzelner Elektronen wurde eine Quantenschaltung auf der Basis einer niedrigdimensionalen Halbleiterstruktur entwickelt, in der einzelne Elektronen mit nur einer Modulationsspannung gepumpt werden können. Dabei wird ein neuer, nicht-adiabatischer Pumpmechanismus ausgenutzt. Theoretische Betrachtungen sagen voraus, dass mit diesem Konzept metrologisch relevante Unsicherheiten erzielt werden können. Da nur eine Modulationsspannung zum Betrieb der Einzelelektronenpumpe erforderlich ist, wird die Beschaltung der Pumpe erheblich vereinfacht. Dies soll in Zukunft ausgenutzt werden, um mehrere Pumpen in einer komplexeren Quantenschaltung parallel zu betreiben und dadurch die Stromstärke weiter zu erhöhen (s. a. Nachricht des Jahres).

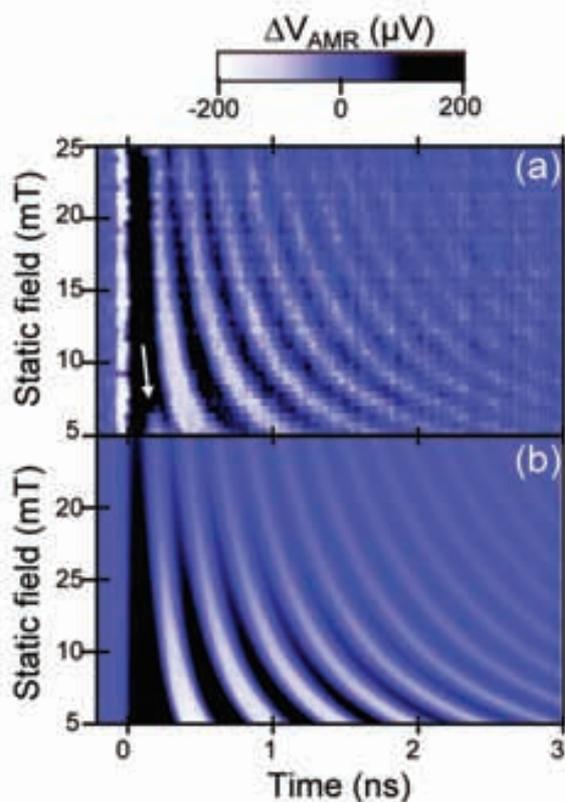
Mit dem Projekt Electron Counting Capacitance Standard (ECCS) leistet die Abteilung ihren Beitrag zur Redefinition der Basiseinheit Ampere. Bei diesem Experiment wird ein Kondensator mit einer bekannten Anzahl von Elektronen geladen und die dabei entstehen-

de Spannung mit einem Josephson-Spannungsnormale gemessen (Bild 3). Durch Rückführung der Kapazität auf die von Klitzing-Konstante kann die Konsistenz der drei fundamentalen elektrischen Quanteneffekte (Quanten-Hall-, Josephson- sowie Einzelelektronen-Effekt) überprüft und schließlich das „Elektrische Quantendreieck“ realisiert werden. Dies gilt als wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu einem modifizierten Einheitensystem, das sich weitgehend auf Quanteneffekte und Fundamentalkonstanten abstützen wird. Im Berichtsjahr wurden gute Fortschritte erzielt: Mit einer in der PTB hergestellten fünfstufigen Einzelelektronenpumpe konnte bei einer Taktfrequenz von 2 MHz eine quantisierte Stromstärke von 320 fA realisiert werden. Der in der PTB entwickelte kryogene Kondensator zeigt bei Temperaturzyklen zwischen Raumtemperatur und Tieftemperatur nur sehr geringe Änderungen seines Wertes, er wird gegenwärtig auf einen dekadischen Wert von 1 pF abgeglichen. Ein erstes komplettes Ladeexperiment soll in Kürze durchgeführt werden.



Bild 3: Tieftemperatur-Messeinheit des ECCS-Experiments

Magnetische Speicher und Sensoren begegnen uns in den verschiedensten Bereichen des täglichen Lebens. Wie überall in der Informationstechnologie werden solche Magnetspeicher und -sensoren in Zukunft immer schneller arbeiten müssen. Damit steigen auch die Anforderungen an die Messtechnik etwa zur Untersuchung der Schreibgeschwindigkeit von Magnetspeichern oder zur Ansprechzeit magnetischer Sensoren. In der PTB wurde dafür ein Verfahren entwickelt, mit dem die Magnetisierungsdynamik in



magnetischen Nanostrukturen durch eine einfache elektrische Messung des anisotropen Magnetowiderstands detektiert werden kann (Bild 4), mit dessen Hilfe die Präzessionsbewegung der Magnetisierung in eine Änderung des elektrischen Widerstandes der Struktur umgesetzt wird.

Die PTB entwickelt gemeinsam mit der Universität Göttingen ein Verfahren, um die Magnetisierung und das Magnetfeld kleinster Strukturen quantitativ und rückgeführt zu bestimmen. Dabei werden Magnetooptik und Magnetkraftmikroskopie kombiniert, wobei die Magnetooptik bei moderater Auflösung die rückgeführte Messung magnetischer Felder erlaubt und die Magnetkraftmikroskopie die hohe Auflösung ermöglicht. Mit einer neu entwickelten mathematischen Methode wird aus den magnetooptisch gemessenen Streufeldverteilungen auf die diesen zugrunde liegende Magnetisierung rückgeschlossen. Diese Information erlaubt dann die Charakterisierung von Kalibrierproben für die Magnetkraftmikroskopie, was erstmals rückgeführte magnetische Messungen auch mit dieser extrem hoch auflösenden Methode ermöglichen wird.

Bild 4: Elektrische Messung der Präzession in einer magnetischen Nanostruktur. Der obere Teil der Abbildung zeigt die gemessenen Daten, der untere Teil eine Simulation

### Querschnittsthema „Terahertzmetrologie“

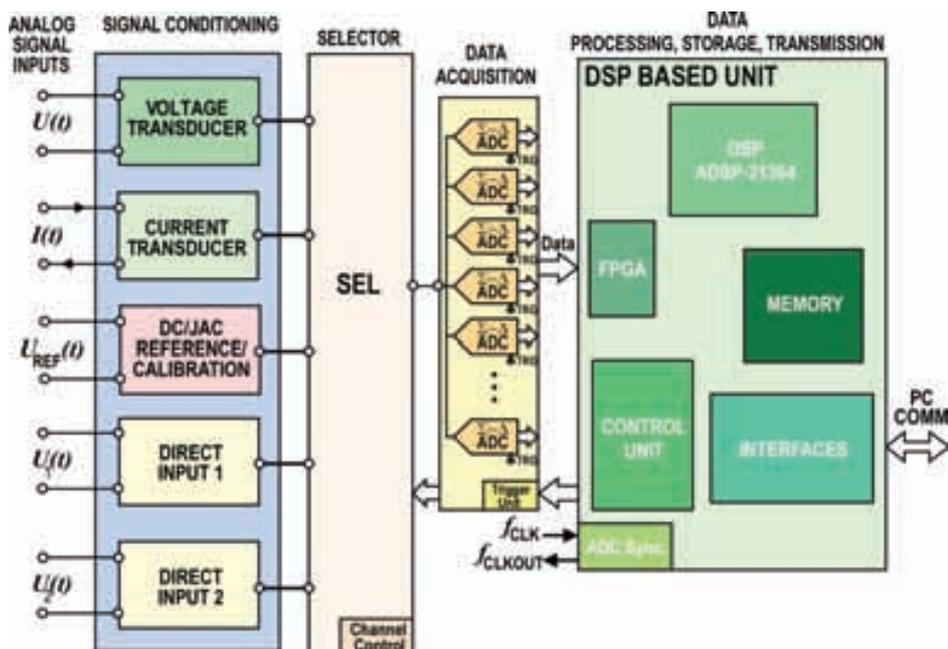
An dem im Rahmen des Konzepts PTB 2016 geschaffenen Querschnittsthema *Terahertz-Metrologie* sind die Abteilungen *Temperatur und Synchrotronstrahlung* sowie die Abteilung *Elektrizität* mit insgesamt 6 Fachbereichen beteiligt. Die THz-Metrologie soll die Lücke zwischen der Mikrowellentechnik und der optischen Messtechnik im fernen Infrarot schließen und damit rückführbare Messungen für Leistung und Feldgrößen für so wichtige Anwendungsbereiche wie Sicherheitstechnik, Kommunikationstechnik, Materialprüfung, Biotechnologie und medizinische Bildgebung liefern.

Die Forschungsaktivitäten der Abteilung (s. a. Titelbild) konzentrieren sich zur Zeit auf

- die Leistungsmessung im mm- und sub-mm-Wellenbereich in Hohlleitern sowie im Freifeld
- die Entwicklung von Sende- und Empfangssystemen sowie die Untersuchung der Ausbreitung von THz-Wellen in Räumen
- die Untersuchung gentoxischer Effekte von THz-Strahlung im Rahmen eines BfS-Vorhabens in Zusammenarbeit mit Universitäten und Forschungseinrichtungen
- die Entwicklung rückgeführter optoelektronischer Messmethoden für die Übertragungseigenschaften elektronischer Bauteile und Geräte bis 110 GHz sowie
- die Erzeugung rein optisch erzeugter Stromimpulse für maßgeschneiderte Testsignale im THz-Bereich.

In einer aktuellen Studie des „Terahertz Communication Lab“, einer Zusammenarbeit dreier Institute der TU Braunschweig und der PTB, wurden die Reflexionseigenschaften von rauhen Innenwandmaterialien bei THz-Frequenzen untersucht und mathematisch modelliert, um die Übertragungseigenschaften für zukünftige Kommunikationssysteme berechnen zu können. Aufgrund des zunehmenden Bedarfs an freier Bandbreite

Bild 5: Blockschaltbild des Transfernormals mit Signalaufbereitung, Messstellenumschalter, Datenerfassung und -verarbeitung



nimmt die Bedeutung kurzreichweitiger Kommunikationssysteme im Frequenzbereich oberhalb von 300 GHz ständig zu. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der Ausbreitungs- und Empfangseigenschaften dieser Wellen in Innenräumen.

Unter Ausnutzung nichtlinearer optischer Effekte in GaAs-basierten Nanostrukturen ist es möglich, durch rein optische Anregung mit einem Femtosekundenlaser ultrakurze elektrische Stromimpulse zu erzeugen, die zur Abstrahlung elektromagnetischer Wellen mit Frequenzen im THz-Bereich führen. Diese Ströme entstehen durch die Symmetriebrechung in den Halbleiterstrukturen und zeigen eine starke Erhöhung an speziellen Resonanzen, die von der Coulomb-Wechselwirkung zwischen Elektronen und Löchern herrühren. Die induzierten Stromimpulse wurden indirekt durch Detektion der gleichzeitig emittierten Terahertz-Strahlung nachgewiesen.

**Metrologie für die Wirtschaft**

Ein in Zusammenarbeit mit dem NPL entwickelter Josephson Waveform-Synthesizer wurde benutzt, um eine „in-situ“-Kalibrierung des Abtast-Voltmeters im PTB-Primärnormal für die elektrische Leistung durchzuführen. Damit wird nicht nur die Unsicherheit der Messungen reduziert, sondern auch die Rückführbarkeit der im Normal vorgenommenen Spannungsmessungen gewährleistet.

Im Rahmen eines vom BMWi geförderten MNPQ-Vorhabens wird in Zusammenarbeit zweier mittelständischer Unternehmen und der PTB ein universelles Leistungs-Transfernormal entwickelt. Das System verfügt über mehrere synchron arbeitende Analog-Digital-Wandler, kompakte Transduktoren sowie eine schnelle Datenerfassung und -aufbereitung (Bild 5). Es wird über einen Rechner gesteuert und erlaubt eine automatische Kalibrierung gegen ein Bezugsnormale. Ein solches Transfernormal ist zur Zeit noch nicht kommerziell erhältlich und ist wegen seiner hohen Genauigkeit und vielseitigen Funktionalität von erheblichem Interesse für die Wechselstrommesstechnik. Das Gerät erlaubt auch einen direkten Vergleich mit einem Josephson Waveform Synthesizer für eine Rückführung der Einheiten kW und kWh auf Naturkonstanten.

Für die Kalibrierung von Stromstärkemessgeräten für kleinste Stromstärken hat sich ein Verfahren durchgesetzt, das auf dem Laden eines Luftkondensators beruht. Dabei wird eine zeitlich linear ansteigende Spannung an einen Kondensator angelegt, und der sich dabei ergebende Ladestrom wird zum Kalibrieren des Prüflings verwendet. Bisher wurde dazu in der PTB ein analoger Spannungsrampengenerator verwendet, der sich durch eine hohe Linearität auszeichnet jedoch den Nachteil besitzt, dass er vor dem Start einer Messung eine mehrminütige Vorbereitungszeit benötigt und damit dyna-

mische Messungen verbietet. Dies ermöglicht jetzt ein neuartiger, digitaler Rampengenerator mit doppeltem Digital-Analog-Wandler (DAC), wobei der zweite DAC die Nichtlinearität des ersten ausgleicht. Die verbleibende Nichtlinearität ist vergleichbar oder sogar besser als die des bisher verwendeten in Analogtechnik gebauten Rampengenerators. Das Verfahren ist zum Patent angemeldet und soll im Rahmen eines Technologietransfers an ein mittelständisches Unternehmen weitergegeben werden.

Mit einem neuen Messverfahren können die Induktivität und die Güte einer Spule aus dem Wirkwiderstand und der Zeitkonstante eines Wechselstromwiderstandes bestimmt werden. Das Verfahren kombiniert Elemente der klassischen Brückentechnik (Wagner-Erdung) mit der digitalen Synthese von Signalen und ihrer Abtastung unter Anwendung der diskreten Fourier-Transformation (DFT). Zur Erprobung wurde die Induktivität einer 100-mH-Spule bei der Messfrequenz 1 kHz mit einer abgeschätzten Standardmessunsicherheit ( $k = 1$ ) von  $2 \cdot 10^{-6}$  aus einem 1-kW-Wechselstromwiderstand abgeleitet.

Rogowski-Spulen eignen sich sehr gut zur nahezu leistungslosen und rückwirkungsfreien Messung hoher Wechsel- und Stoßströme. Sie haben auf Grund ihres nichtmagnetischen Wickelkerns eine meist vernachlässigbar kleine Nichtlinearität und können daher auch bei kleinen Stromstärken zuverlässig kalibriert werden. Von Nachteil ist ihr zu tiefen Frequenzen hin begrenztes Übertragungsverhalten. Sie werden daher nur selten zur Messung von Kurzschlussströmen mit überlagertem Gleichanteil eingesetzt. In der PTB wurde jetzt ein numerisches Integrationsverfahren entwickelt, das das Übertragungsverhalten dieser Spulen bei tiefen Frequenzen deutlich verbessert. Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass der Integrationsfehler für die Amplitude und den Effektivwert einer Sinusschwingung weniger als 0,1 % beträgt. Messungen an einer Rogowski-Spule haben die Ergebnisse der Simulationsrechnung bestätigt.

Nach erfolgter Kalibrierung eines vektoriiellen Netzwerkanalysators mit kommerziellen Kalibrierkits konnte die Qualität der Kalibrierung und die daraus resultierende

Messgenauigkeit bislang nur abgeschätzt oder durch stichprobenartige Vergleichsmessungen bei einzelnen Frequenzpunkten verifiziert werden. Ein neuartiges Verfahren, das auf einer einzigen Luftleitungsmessung über einen weiten Frequenzbereich basiert, erlaubt jetzt für den Fall der Eintormessung eine ebenso breitbandige Bestimmung der komplexen Restfehlerterme. Letztere ermöglichen anschließend eine sekundäre Fehlerkorrektur des Analysators. Umgekehrt ermöglicht das Verfahren auch die Funktionsprüfung mechanischer Kalibrierkits und elektronischer Kalibriereinheiten. Zur Zeit wird im Rahmen eines Industrievorhabens an einer Erweiterung der Methode auf Zweitormessungen gearbeitet.

### **Metrologie für die Gesellschaft**

Die Quellen hochfrequenter elektromagnetischer Felder (EMF) und damit die Exposition der Bevölkerung haben sich innerhalb der letzten 15 Jahre zunehmend verändert. Während früher hauptsächlich weit entfernt stehende Rundfunk- und Fernsehsender die elektromagnetische Umwelt der Bevölkerung dominierten, sind es heute Geräte der mobilen Kommunikation, die trotz der Begrenzung der Sendeleistung bedingt durch die geringe Distanz zum Benutzer zu deutlich höheren Feldstärken als die stationären Antennen führen. Während man die thermischen Wirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern kennt und z.B. in der Mikrowelle auch technisch nutzt, bleibt die Frage nach athermischen Wirkungen auf biologische Systeme bisher unbeantwortet. Die PTB unterstützt daher die Forschungsarbeiten von Biologen und Medizinern im Bereich Dosimetrie und Rückführung der Feldgrößen zur Klärung der Frage, ob athermische Wirkungen existieren (Bild 6). So wurde unter Federführung der PTB ein umfangreiches europäisches Forschungsprojekt zur Dosimetrie und Messtechnik für EMF beantragt. Außerdem wurde ein dreijähriges Forschungsprojekt vom Bundesamt für Strahlenschutz eingeworben, in dem die Wirkungen von EMF oberhalb von 300 GHz auf biologische Systeme untersucht werden sollen. Bislang existieren oberhalb von 300 GHz keinerlei Grenzwerte, weder national noch international.

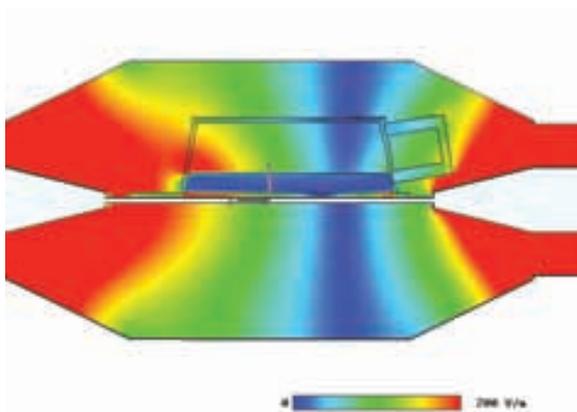


Bild 6: Berechnete Verteilung des elektrischen Feldes einer  $\mu$ TEM-Zelle mit eingebautem Probenbehälter zur Ermittlung dosimetrischer Größen in Fluiden

### Internationale Angelegenheiten

Für das Europäische Forschungsprogramm für Metrologie (EMRP) gab es einen ersten Aufruf zur Einreichung von Forschungsprojekten, die im Rahmen einer „ERANET Plus“-Aktion zu einem Drittel durch die EU und zu zwei Dritteln durch die beteiligten Institute finanziert werden. Dieser Aufruf umfasste die Programme *Health, SI and Fundamentals*, *Dimensional Metrology* und *Electricity and Magnetism*. Im Programm *Electricity and Magnetism* koordiniert die Abteilung zwei von insgesamt fünf bewilligten Forschungsprojekten und im Programm *SI and Fundamentals* ein Forschungsprojekt zur Redefinition der SI-Basiseinheit Ampere. Die Projekte erstrecken sich über nahezu alle Arbeitsgebiete der Abteilung und werden die Zusammenarbeit mit den anderen europäischen Metrologieinstituten deutlich verstärken.

Darüber hinaus war die Abteilung im Berichtsjahr auch auf dem Gebiet internationaler Vergleiche aktiv. Im vergangenen Jahr wurden 8 internationale Vergleiche abgeschlossen, an denen sich die Abteilung beteiligt hat, für 5 Vergleiche fungierte die PTB als Pilotlabor. 22 Vergleiche, an denen die Abteilung beteiligt ist, laufen zur Zeit noch im Rahmen von CCEM, EURAMET, APMP und COOMET. Vergleichsmessungen mit Normalmess-einrichtungen anderer Institute erfordern hochstabile und genaue TransfERNormale. Für zukünftige Vergleiche der elektrischen Leistung wurde auf der Grundlage des PTB-Primärnormals ein neues, kompaktes TransfERNormal entwickelt. Es ist für die Spannungen 60 V und 120 V bei Stromstärken von 5 A und 1 A ausgelegt. Verfahrensbedingt wird eine Stabilität von wenigen  $\mu$ W/VA

erwartet. Diese Annahme soll mit einem kürzlich fertiggestellten Prototypen verifiziert werden.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Erste 1-V-SNS-Josephson-Schaltung für den Einsatz bei 75 GHz in Kooperation mit dem NIST

Als Ergebnis einer Kooperation zwischen PTB und NIST (USA) wurde erstmals eine 1-Volt-SNS-Reihenschaltung für das programmierbare Josephson-Spannungsnormale hergestellt und bei 75 GHz erfolgreich betrieben. (F. Müller, FB 2.4, [franz.mueller@ptb.de](mailto:franz.mueller@ptb.de))

#### Präzisere Erzeugung von Wechselspannungen mit dem Josephson-Synthesizer

Bei gemeinsamen Messungen mit Wissenschaftlern vom NMi-VSL (Niederlande) an der PTB konnte die spektrale Reinheit der erzeugten Wechselspannung weiter verbessert werden. (J. Kohlmann, FB 2.4, [johannes.kohlmann@ptb.de](mailto:johannes.kohlmann@ptb.de))

#### Pulsbetriebene SNS-Schaltungen für ein Quantennormale für Wechselspannungen beliebiger Wellenform

Mit kompakten Schaltungen aus mehr als 10000 Josephson-Kontakten konnten spektral reine Wechselspannungen mit Spitzenamplituden von über 200 mV erzeugt werden. (O. Kieler, FB 2.4, [oliver.kieler@ptb.de](mailto:oliver.kieler@ptb.de))

#### DC-SQUID als Phasen-Quantenbit in Niob-Technologie

Im Rahmen eines EU-Projekts als Phasen-Quantenbits hergestellte DC-SQUIDs haben ihre Eignung als supraleitende Qubits gezeigt. (R. Dolata, FB 2.4, [ralf.dolata@ptb.de](mailto:ralf.dolata@ptb.de))

#### Betrieb von RSFQ-Schaltungen mit Josephson-Elementen mit verteilten RC-Leitungs-shunts

Schnelle Flussquanten-Schaltungen mit Josephson-Elementen, deren Shunts aus Segmenten von RC-Leitungen bestehen, ermöglichen die Kontrolle von angekoppelten Josephson-Qubits. Die korrekte Funktionalität solcher Schaltungen wurde demonstriert. (M. Khabipov, FB 2.4, [marat.khabipov@ptb.de](mailto:marat.khabipov@ptb.de))

#### Kompakte SFQ-Schaltungen mit aktiven Elementen in supraleitenden Schleifen

Die korrekte Funktionalität einer Einzelflussquanten-Schaltung, in der große Induktivitäten durch kurze Arrays von Josephson-Elementen realisiert sind, wurde demonstriert. (M. Khabipov, FB 2.4, [marat.khabipov@ptb.de](mailto:marat.khabipov@ptb.de))

#### Breitbandige akusto-elektrische Chirp-Filter

Gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung wurden breitbandige SAW Chirp-Filter als wesentliche Komponenten eines weltraum-basierten Spektrometers entwickelt und hergestellt. (X. Li, FB 2.4, [xianyi.li@ptb.de](mailto:xianyi.li@ptb.de))

#### Herstellung, sowie physikalische und chemische Eigenschaften von „Nanoblättern“

In einem durch die VW-Stiftung geförderten Vorhaben sollen die Herstellung, die physikalischen und chemischen Eigenschaften und mögliche Anwendungen von frei aufgehängten, unimolekularen „Nanoblättern“ untersucht werden. (T. Weimann, FB 2.4, [thomas.weimann@ptb.de](mailto:thomas.weimann@ptb.de))

#### Neues Rasterelektronenmikroskop im Reinraumzentrum der PTB

Im Reinraum-Zentrum der PTB ist ein neues hochauflösendes Rasterelektronenmikroskop im Einsatz. (T. Weimann, FB 2.4, [thomas.weimann@ptb.de](mailto:thomas.weimann@ptb.de))

#### Simulation von Einzelelektronen-Transport in ungeordneten granularen Cr-Filmen

Das Verhalten von miniaturisierten granularen metallischen Filmen wird modelliert durch ein zwei-dimensionales Array von metallischen Inseln, die durch Tunnelkontakte miteinander gekoppelt sind. Es zeigt sich, in Übereinstimmung mit den experimentellen Untersuchungen, dass die (I,V)-Kennlinie eines solchen Systems hysteretisches Verhalten aufweisen kann. (A. Zorin, FB 2.4, [alexander.zorin@ptb.de](mailto:alexander.zorin@ptb.de))

### **Einzelelektronenpumpe mit nur einer Modulationsspannung**

Erstmals wurde eine Einzelelektronenpumpe realisiert, die mit nur einer Modulationsspannung betrieben wird. Dadurch wird die Beschaltung der Einzelelektronenpumpe stark vereinfacht, was eine zukünftige parallele Verschaltung mehrerer Pumpen zu einem Quantenstromnormal mit hoher Stromstärke erleichtert. (B. Kästner, FB 2.5, bernd.kaestner@ptb.de)

### **Neuartiges elektrisches Messverfahren für die magnetische Präzession**

Ein in der PTB neu entwickeltes Messverfahren ermöglicht die Detektion der ultraschnellen Magnetisierungsdynamik magnetischer Nanostrukturen durch eine einfache Messung des elektrischen Widerstandes. (H. Schumacher, FB 2.5, hans.w.schumacher@ptb.de)

### **Neuartige ultrakurze Stromimpulse durch Symmetriebrechung in Halbleiter-Nanostrukturen**

In GaAs-basierten Nanostrukturen wurde durch rein optische Anregung mit einem Femtosekundenlaser ein neuartiger Typ von ultrakurzen Stromimpulsen nachgewiesen, die zur Abstrahlung elektromagnetischer Wellen mit Frequenzen im THz Bereich führen. Eine genaue Analyse ermöglichte Aussagen über die Dynamik dieser rein optisch erzeugten Stromimpulse. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

### **Magnetische Felder von Mikro- und Nanostrukturen**

In Kooperation mit der Universität Göttingen wurde ein Verfahren entwickelt, das Magnetooptik und Magnetkraftmikroskopie kombiniert, um erstmals rückgeführte magnetische Messungen mit der Magnetkraftmikroskopie zu ermöglichen. (S. Sievers, FB 2.5, sibylle.sievers@pbt.de)

### **Neuartiges Kalibrierverfahren für die vektorielle Netzwerkanalyse**

Ein neuartiges Kalibrierverfahren, das rückgeführte HF-Streuparametermessungen mit geringsten Messunsicherheiten ermöglicht, wurde in der AG 2.22 implementiert und verifiziert. (R. Judaschke, FB 2.2, rolf.judaschke@ptb.de)

### **Fortschritte beim Aufbau des Quantenkapazitätsnormals auf Basis des Einzelelektronen-Effekts**

Der Aufbau eines Kapazitätsnormals, welches auf dem Abzählen einzelner Elektronen mit Einzelelektronen(SET)-Schaltungen beruht, schreitet voran. Im zurückliegenden Jahr wurden die Millikelvin-Messeinrichtung weiter aufgebaut und verbessert sowie Schlüsselemente des Experiments charakterisiert und optimiert. (H. Scherer, FB 2.6, hansjoerg.scherer@ptb.de)

### **Verkürzte Messkette von zwei AC-Quanten-Hall-Widerständen zur Kapazität**

Ein neuer Doppelprobenhalter ermöglicht den Betrieb zweier unabhängiger AC-Quanten-Hall-Widerstände und damit eine Verkürzung der Messkette zur Kalibrierung von 10-pF-Kapazitätsnormalen. (J. Schurr, FB 2.6, juergen.schurr@ptb.de)

### **Monte-Carlo-Analyse der breitbandigen elektromagnetischen Eigenschaften koplanarer Wellenleiter**

Mit Hilfe einer Monte-Carlo-Analyse wurden der Einfluss technologiebedingter Fertigungsungenauigkeiten sowie die Auswirkung von Unsicherheiten in der Kenntnis der dielektrischen Materialparameter auf die frequenzabhängigen Wellenausbreitungseigenschaften koplanarer Wellenleiter untersucht. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Ableitung der Induktivität aus einem Wechselstromwiderstand mittels Abtastverfahren**

Mit einem neuen Messverfahren können die Induktivität und die Güte einer Spule aus dem Wirkwiderstand und der Zeitkonstante eines Wechselstromwiderstandes bestimmt werden. (G. Ramm, FB 2.1, guenther.ramm@ptb.de)

#### **Ausbreitung von THz-Wellen in Innenräumen**

In einer aktuellen Studie wurden die Reflexionseigenschaften von rauen Innenwandmaterialien bei THz-Frequenzen untersucht und mathematisch modelliert, um die Übertragungskanaleigenschaften für zukünftige Kommunikationssysteme berechnen zu können. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

### **Transfornormal für Wechselgrößen**

Im Fachbereich *Energiemesstechnik* wird ein neues Transfornormal für Wechselgrößen im Rahmen eines BMWi-Programms und unter Beteiligung von Geräteherstellern entwickelt. (G.Kürten-Ihlenfeld, FB 2.3, guilherme.ihlenfeld@ptb.de)

### **Rogowski-Spule mit numerischer Integration der Messdaten**

Rogowski-Spulen werden üblicherweise mit einem aktiven Integrationsverstärker für Hochstrommessungen verwendet. Als vorteilhafte Alternative wurde ein numerisches Integrationsverfahren für unterschiedliche Stromverläufe untersucht. (K. Schon, FB 2.3, klaus.schon@ptb.de)

### **Thermischer Multiplizierer mit planaren Thermokonvertern zur Leistungsmessung im Audiofrequenzbereich**

Zur Erweiterung des Frequenzbereiches in der elektrischen Leistungsmesstechnik wurde ein hochgenauer, auf thermischer Basis arbeitender Multiplizierer aufgebaut. (E. Mohns, FB 2.3, enrico.mohns@ptb.de)

### **Hochlinearer digitaler Spannungsrampengenerator für die rückführbare Erzeugung kleiner Stromstärken im Bereich von 1 fA bis 100 pA**

Es wurde ein neuartiger digitaler Spannungsrampengenerator entwickelt, der erstmals auch präzise dynamische Messungen an Pikoamperemetern erlaubt. (G.Willenberg, FB 2.6, gerd-dietmar.willenberg@ptb.de)

### **Quantennormale messen elektrische Leistung**

Ein in Zusammenarbeit mit dem NPL (UK) entwickelter Josephson Waveform-Synthesizer wurde benutzt, um eine „in-situ“ Kalibrierung des Abtast-Voltmeters im PTB-Primärnormal für die elektrische Leistung durchzuführen. (L. Palafox Gamir, FB 2.6, luis.palafox@ptb.de)

## **Metrologie für die Gesellschaft**

### **Ein QM-Handbuch-Entwurf für elektrische Prüfstellen**

Ein neues Handbuch soll die Prüfstellen für Elektrizitätszähler und Messwandler bei der Dokumentation ihres Qualitätsmanagementsystems unterstützen. (H.-G. Latzel, FB 2.3, hans-georg.latzel@ptb.de)

### **Dosimetrie und Messtechnik für Größen elektromagnetischer Felder zum Schutz der Bevölkerung vor nichtionisierender Strahlung**

Die Europäische Kommission hat eine Richtlinie („Physical Agents Directive“ 2004/40/EC) zum Personenschutz gegenüber nichtionisierender Strahlung verabschiedet. Diese folgt in den Grenzwerten den Empfehlungen der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP). Die praktische Umsetzung der Direktive in nationales Recht scheitert derzeit an den mangelnden messtechnischen Möglichkeiten zur Umsetzung. Die PTB hat ein europäisches Forschungsprojekt koordiniert und beantragt, um eine geeignete Messtechnik zu entwickeln und die europaweite Einführung der Richtlinie zu unterstützen. (Th. Schrader, FB 2.2, thorsten.schrader@ptb.de)

## **Internationale Angelegenheiten**

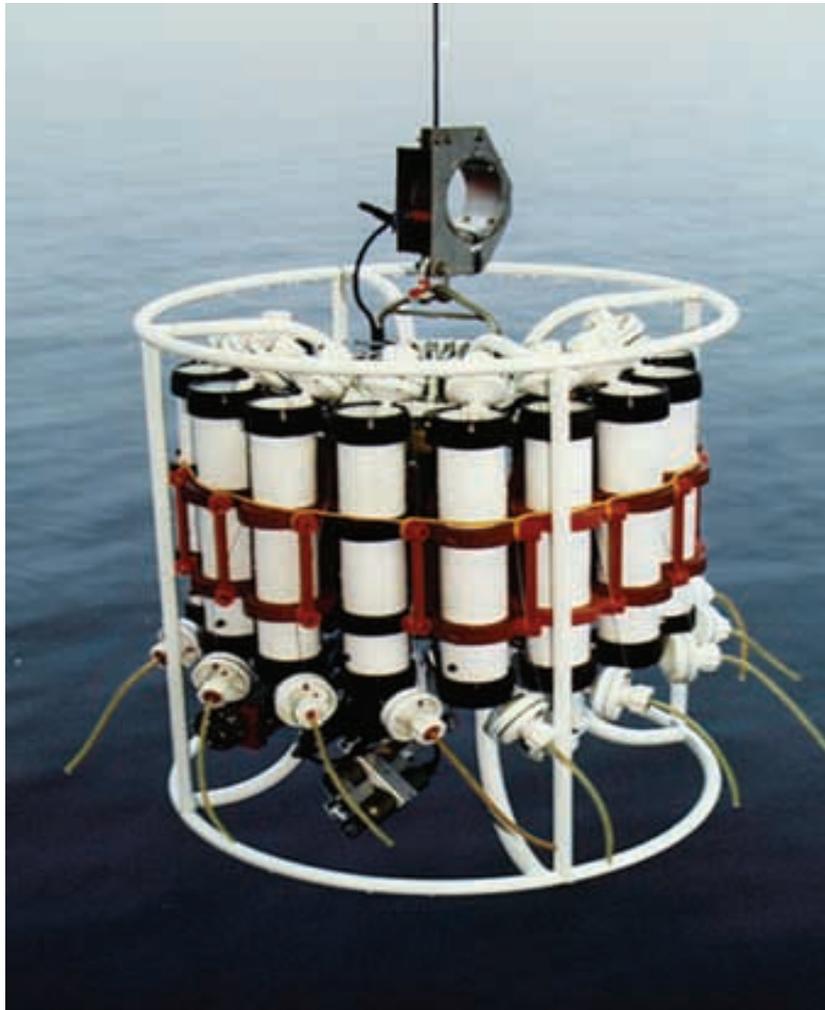
### **Wechselspannungs-Vergleichsmessungen sichern die Rückführbarkeit im neuen EU-Mitgliedsstaat Bulgarien**

Mit einem bilateralen Vergleich zwischen der PTB und dem NMC in Bulgarien wurde die Rückführbarkeit der dortigen Wechselspannungsnormale sichergestellt. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

### **Stabiles Transfornormal für internationale Vergleiche der elektrischen Wechselleistung**

Für zukünftige internationale Vergleiche der elektrischen Wechselleistung wurde ein neues, kompaktes Transfornormal als miniaturisierte Version des PTB-Primärnormals entwickelt. (G. Ramm, FB 2.1, guenther.ramm@ptb.de)

# Chemische Physik und Explosionsschutz



Berichte der Abteilungen

Abteilung

3

# Chemische Explosionss

Die Abteilung 3 „*Chemische Physik und Explosionsschutz*“ vereint die Expertise der PTB auf den Gebieten Metrologie in der Chemie, analytische Messtechnik, Messung des thermodynamischen Zustandsverhaltens von Fluiden, chemisch-physikalische Stoffeigenschaften sowie physikalische Sicherheitstechnik und Explosionsschutz.

Die erstgenannten Gebiete bilden im Arbeits- und Forschungsprogramm der PTB den Themenbereich „Metrologie in der Chemie und Stoffeigenschaften“.

Ihre Forschungs- und Entwicklungstätigkeit hat die Abteilung 3 im Jahr 2007 weiter auf zukunftsorientierte Bereiche wie Umwelt- und thermische Energiemessung, Messungen für die Klimaforschung, Messungen im Gesundheitswesen und im Nahrungsmittelsektor sowie Sicherheitstechnik fokussiert. Zugleich wird die koordinierte Vernetzung der Forschung innerhalb der PTB und darüber hinaus vorangetrieben. Teile der Kompetenz der Abteilung werden in die PTB-Querschnittsprojekte „Durchfluss“ (siehe Abteilung 1), „Avogadrokonstante“ (siehe Abteilung 4) und „Boltzmannkonstante“ (siehe Abteilung 7) eingebracht.

#### Titelbild

Die Salinität der Ozeane ist eine der wesentlichen Klimavariablen. Sie wird mit Conductivity-Temperature-Depth (CTD, Leitfähigkeits-Temperatur-Tiefe)-Sonden erfasst. Die PTB sorgt mit primären Leitfähigkeitsmessungen für den Anschluss der Salinität an das SI-System und damit für die Vergleichbarkeit der Messwerte über sehr lange Zeiträume.

Das Bild aus dem Leibniz-Institut für Ostseeforschung (IOW) Warnemünde zeigt eine Sonde bei einer Messkampagne.

#### Entwicklungen in der chemischen Physik

Unter dem Begriff „Chemische Physik“ sind die Aktivitäten der drei Fachbereiche 3.1 „*Metrologie in der Chemie*“, 3.2 „*Analytische Messtechnik und Druck*“ sowie 3.3 „*Chemisch-Physikalische Stoffeigenschaften*“ zusammengefasst (s. o.). Darüber hinaus koordiniert und leitet die PTB das nationale Netzwerk „Metrologie in der Chemie“, dem neben der PTB weitere Bundesbehörden mit eigener Forschungs- und Entwicklungstätigkeit angehören. Das jüngste Mitglied in diesem Netzwerk ist das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL). Das BVL bearbeitet die Rückstandsanalytik in Lebensmitteln und stellt somit eine wichtige Ergänzung der Kompetenz des Netzwerkes dar. Nach zunächst erfolgreich durchgeführten bilateralen Vergleichsmessungen mit der PTB wurde begonnen, das BVL in der internationalen Metrologie zu verankern. Dazu gehören die Initiierung und Teilnahme an den ersten Pilotstudien des Consultative Committee for Amount of Substance – Metrology in Chemistry (CCQM) im Bereich der Rückstandsanalytik, wobei das BVL und die PTB für die Messgröße Chloramphenicol auch als Pilotlabor verantwortlich waren. Auf diese Weise wurde es möglich, das Thema der Rückstandsanalytik neu in die Meterkonvention einzubringen und somit in eine global akzeptierte Infrastruktur zu integrieren.

Die Ergebnisse bestätigen nicht nur die Qualität der Messungen von PTB und BVL, sondern zeigen auch die Verwendbarkeit solcher Ergebnisse als Referenzwerte für Vergleichsmessungen der Prüflaboratorien in diesem Bereich auf.

# Physik und Schutz

In Ergänzung zur zunehmenden nationalen Vernetzung spielt die von der EU erstmals auch finanziell geförderte europäische Vernetzung der metrologischen Forschung eine immer größer werdende Rolle (iMERA-Plus-Programm). Im jetzt ausgeschriebenen Bereich „Gesundheit“ wurden mehrere Projekte der klinischen Chemie zur Förderung empfohlen. Sie zeigen den Stellenwert der Arbeiten und den Grad der internationalen Vernetzung der PTB in der Chemie an. Hier kann auf die bestehenden Kooperationen u. a. mit dem National Physical Laboratory (NPL) und dem Laboratory of the Government Chemist (LGC) in Großbritannien zurückgegriffen werden. Herausragende Themen sind die Entwicklung von Primärverfahren für diagnostische Marker (z. B. Protein- und Speziesanalytik) und die Entwicklung von grundlegend neuen optischen Primärverfahren für die klinische Chemie und Atemgasanalytik.

Neben den Themen aus dem Bereich der Analytik gibt es auch neue Entwicklungen im Bereich der Ermittlung von speziellen Stoffeigenschaften. So wurden z. B. für die Neubestimmung der Avogadrozahl die Verfahren der hydrostatischen Wägung und der Druckflotation verbessert. Dadurch konnte die Dichte einer ersten Probe aus isotopenreinem Silizium-28 mit einer Standard-Messunsicherheit von 0,2 ppm bestimmt werden. Weitere Verbesserungen beim Dichtevergleich mit Hilfe der Druckflotation erlauben nun, je nach Probengröße, Dichtedifferenzen mit einer Unsicherheit von  $1 \cdot 10^{-8} \rho_{\text{Si}}$  zu bestimmen, was eine Messung der Dichte der Oxidschicht auf Silizium-Proben ermöglicht. In Analogie zur Verringerung der Messunsicherheit bei Präzisionsdichtemessungen wird auch an einer weiteren Verringerung der Messunsicherheit für Druckmessungen im Rahmen der Neubestimmung der Boltz-

mannkonstante gearbeitet. Es besteht das Ziel, eine Standard-Messunsicherheit von besser als 1 ppm bis zu Drücken von 7 MPa zu erreichen, was weltweit bislang noch nicht möglich ist.

In Ergänzung zu den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden PTB-Seminare zum Wissenstransfer in Praxis und Gesellschaft abgehalten, die zukunftsorientierte Themen behandelten: Erdgasanalyse mit Gaschromatographie, Schaffung von Rückführbarkeit in der spektrometrischen Gasanalytik, Leitfähigkeitsmessung und Salinität, u. a. für die Ozeanologie und Klimaforschung.

## **Metrologie für biogene Kraftstoffe**

In Umsetzung einer EU-Richtlinie ist zum 01.01.2007 das Biokraftstoffquotengesetz in Kraft getreten, wonach fossilen Kraftstoffen für den Straßenverkehr definierte Mengen an Biokraftstoffen zugesetzt werden müssen. Die zugesetzte Menge ist über den Energiegehalt der fossilen und der Biokraftstoffe definiert und soll bis 2015 auf 8 Prozent steigen. Die durch die Zumischung veränderten Stoffeigenschaften der Kraftstoffe besitzen signifikante Auswirkungen auf die Messtechnik, die beim Verkauf von Kraftstoffen eingesetzt wird. Dies ist sowohl für Hersteller und Überwachungsbehörden als auch für Verbraucher bedeutsam. Neben dem Heizwert (Energiegehalt) betrifft dies insbesondere die Viskosität und die Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur, da diese Größen direkt die Mengenmessung beeinflussen. Die PTB hat ein Programm gestartet, in dem diese Stoffeigenschaften in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Kraftstoffgemische untersucht werden, mit dem Ziel, geeignete Verfahren zu entwickeln, um die erforderli-

chen Stoffeigenschaften u. a. aus bereits bekannten Daten zu ermitteln.

### Biogas

Durch die Liberalisierung des Gasnetzes in Deutschland mit der Verordnung über den Zugang zu Gasversorgungsnetzen (GasNZV) und die staatliche Förderung erneuerbarer Energien (Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien, EEG) gewinnt die Einspeisung von aufbereitetem Biogas in die öffentlichen Gasversorgungsnetze zunehmend an Bedeutung.

Die Messtechnik zur Abrechnung der Handelsware „Biogas“ unterliegt dabei, wie im geschäftlichen Verkehr üblich, dem Eichrecht. Energieinhalt (Brennwert) und Menge sind mit zugelassenen Geräten zu messen.

Da Biogas neben seinen Hauptkomponenten Methan und Kohlenstoffdioxid ebenfalls Sauerstoff und Wasserstoff enthalten kann, ist die für Erdgas zugelassene und derzeit genutzte Messtechnik (Gaschromatographen und korrelative Messgeräte) zur Bestimmung von Brennwerten nicht ohne Einschränkung

Bild 1: PTB-Messplatz für die gaschromatographische Analyse von Erd- und Biogasen sowie Chromatogrammbeispiele.



gen für Gase aus regenerativen Quellen einsetzbar.

Die PTB hat daher experimentelle Studien und Modellrechnungen zur Messung von Biogasen mit Gaschromatographen durchgeführt und daraufhin ein Positionspapier zum Thema „Einspeisung von Biogas“ erarbeitet, in dem Randbedingungen vorgeschlagen werden, unter denen Biogase mit zugelassenen 11-Komponenten-Gaschromatographen gemessen werden können. Unter anderem werden obere Grenzwerte für den Sauerstoffanteil von 1 % und für den Wasserstoffanteil von 0,2 % und deren messtechnische Überwachung gefordert.

Im Dezember 2006 wurde das Positionspapier im Workshop „Biogas im Erdgasnetz“ mit Vertretern der Eichbehörden der Länder und der Bundesnetzagentur diskutiert. Daneben wurde umfangreich über Biogasherstellung, -aufbereitung und -messung informiert.

Aus den Anforderungen des Positionspapiers wurde inzwischen im Einvernehmen mit den Eichbehörden eine nach dem Eichgesetz anerkannte Technische Richtlinie, TR-G14,

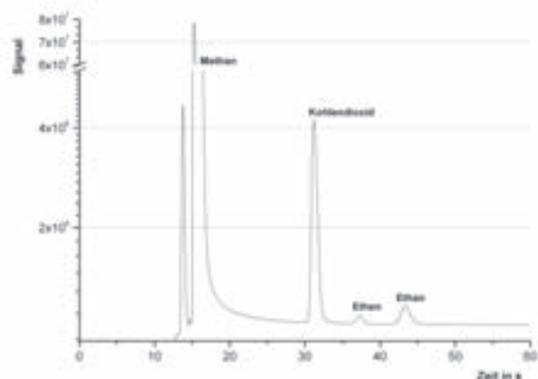
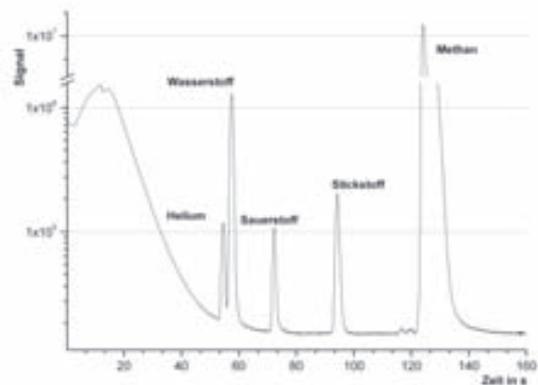


Bild 2: Zerlegte Messzelle mit den beiden Senkkörpern und der Wechseleinrichtung.

erstellt, die von der Vollversammlung für das Eichwesen im November 2007 verabschiedet wurde.

Außerdem konnten im Laufe des Jahres 5 Gaschromatographen mit o. a. Auflagern explizit für die Messung von Gas aus regenerativen Quellen zugelassen werden.

Eines dieser Geräte realisiert auch die Messung von Sauerstoff mit Stoffmengenanteilen bis 3 %, hier ist im eichpflichtigen Betrieb für Biogase nur noch eine Überwachung des Wasserstoffanteils notwendig.

### Entwicklung einer Präzisionsgasdichtemesseinrichtung

Präzisionsmessungen von Gasdichten haben ihre Bedeutung insbesondere für die Messung brennbarer Gase. Die wirtschaftliche Bedeutung wird deutlich an der großen Menge Erdgas, die in Deutschland etwa 25 Prozent der verbrauchten Primärenergie ausmacht, also etwa 1000 Milliarden Kilowattstunden pro Jahr.

Die Normdichte (Gasdichte bei der Temperatur 0 °C und dem Druck 0,101325 MPa) ist deshalb eine eichpflichtige Größe bei der Abrechnung thermischer Energie im geschäftlichen Verkehr (Eichfehlergrenze: 0,5 Prozent vom Messwert). In der PTB wurde in diesem Kontext ein Referenzgaskalorimeter neu entwickelt. Das Ergebnis der kalorischen Messungen ist ein massebezogener Brennwert. Zur Umrechnung in einen volumenbezogenen Brennwert ist die Bestimmung der Normdichte mit möglichst kleiner Messunsicherheit erforderlich.

Darüber ist auch durch die Entwicklungen im Bereich der nachwachsenden Rohstoffe bzw.



Energieträger ein Bedarf für hochgenaue Gasdichtemessungen an Biogasen entstanden. In diesem Zusammenhang werden Gasdichten im Zustandsbereich bis zu Drücken von 5 MPa und in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 60 °C benötigt.

Bei der entwickelten Präzisionsmesseinrichtung werden zwei Senkkörper unterschiedlichen Volumens (518 cm<sup>3</sup> bzw. 13 cm<sup>3</sup>), aber gleicher Masse und Oberfläche im Gas gewogen. Der Wechsel der Senkkörper geschieht von außen, so dass die Messungen automatisiert durchgeführt werden können.

Die Senkkörper sind über eine magnetische Schwebekupplung mit einer hochauflösenden Komparatorwaage verbunden. So können die Senkkörper Drücken und Temperaturen ausgesetzt werden, die weit außerhalb des Einsatzbereichs der empfindlichen Waage liegen.

Besonders vorteilhaft bei diesem Verfahren ist, dass Adsorptionseffekte auf den Senkkörpern aufgrund der gleichen Größe der Oberfläche bei identischer Güte der Oberfläche gleich groß sind und sich weitgehend kompensieren. Die Präzisionsgasdichtemesseinrichtung verfügt über eine sehr stabile Thermostatisierung und sehr genaue Temperatur- und Druckmesseinrichtungen, die in Bild 2 zu sehen sind, da die Gasdichte von Druck und Temperatur abhängt.



Bild 3: Ansicht der erweiterten Normdichteapparat mit Komparatorwaage, Bedienfront und Messelektronik.

### **Metrologische Infrastruktur für die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WFD)**

Das zentrale Ziel der EU-Wasserrahmenrichtlinie ist es, bis zum Jahr 2015 in Europa für alle Oberflächen- und Küstengewässer sowie für das Grundwasser den Zustand „guter Wasserqualität“ zu erreichen und zu bewahren.

Erstmalig werden in dieser Richtlinie unabhängig von nationalen Grenzen Wassereinzugsgebiete als Grundlage für die Qualitätsbewertung des Wassers verwendet. Zur Umsetzung dieser Forderung müssen deshalb umfangreiche grenzüberschreitende Messprogramme durchgeführt werden, die nur auf der Basis vergleichbarer und damit auf das SI rückgeführter Messergebnisse zu verlässlichen Aussagen über die Wasserqualität führen. Die Metrologieinstitute sind daher aufgerufen, die entsprechende metrologische Infrastruktur zum Anschluss der Messergebnisse von Überwachungs-laboratorien zu entwickeln und bereitzustellen. Im Rahmen des EURAMET-Projekts 924, das von der PTB koordiniert und in Zusammenarbeit mit der BAM, dem französischen Metrologieinstitut, LNE, und dem europäi-

schen Referenzinstitut, IRMM, organisiert wird, soll ein entsprechendes Rückführungs- und Weitergabesystem am Beispiel der vier prioritären anorganischen Stoffe Nickel, Cadmium, Blei und Quecksilber aufgebaut und erprobt werden.

Die „gute Wasserqualität“ wird hinsichtlich chemischer Schadstoffe anhand von maximal zulässigen Konzentrationen, den so genannten Umweltqualitätsnormen (UQN), für 33 besonders gefährliche (prioritäre) Stoffe definiert. Zu diesen gehören auch die im Projekt behandelten Schwermetalle und deren Verbindungen. Die UQN dieser Stoffe sind zum Teil extrem niedrig, wie z. B. die 50 pg/l für Quecksilber, und stellen damit eine besondere Herausforderung für die chemische Analytik dar.

Das vorgeschlagene Rückführungs- und Weitergabesystem soll auf bestehenden nationalen Qualitätssicherungsstrukturen aufbauen und die vorteilhafte Multiplikatorfunktion von Kalibrierlaboratorien nutzen. Als potenzielle Kalibrierlaboratorien (PKL) kommen staatliche und kommerzielle Organisationen nationaler „Eignungstests“ für die Überwachungs-laboratorien in Frage. In Deutschland sind dies beispielsweise die

Umweltlaboratorien der Länder. Sie sollen im Rahmen des Projektes in die Lage versetzt werden, auf der Basis der Kooperation mit den nationalen Metrologieinstituten (NMI) selbst rückgeführte Referenzwerte liefern zu können.

Zur Sicherstellung der Rückführung werden diese Laboratorien, falls erforderlich, mit Kalibrierlösungen versorgt, die an das von der PTB und der BAM gehaltene „System nationaler Normale für die Elementanalytik“ angeschlossen sind. Das Projekt soll bis Mitte 2009 abgeschlossen sein.

Aufgrund des weltweiten Interesses insbesondere an der Quecksilbermessung wird eine zum Anschluss der PKL an die NMIs geplante Vergleichsmessung parallel zum Euramet-Projekt auch als CCQM Studie (CCQM P100) durchgeführt. Insgesamt nehmen 32 Institute (12 NMIs und 20 potenzielle Kalibrierlaboratorien) aus 19 Ländern teil.

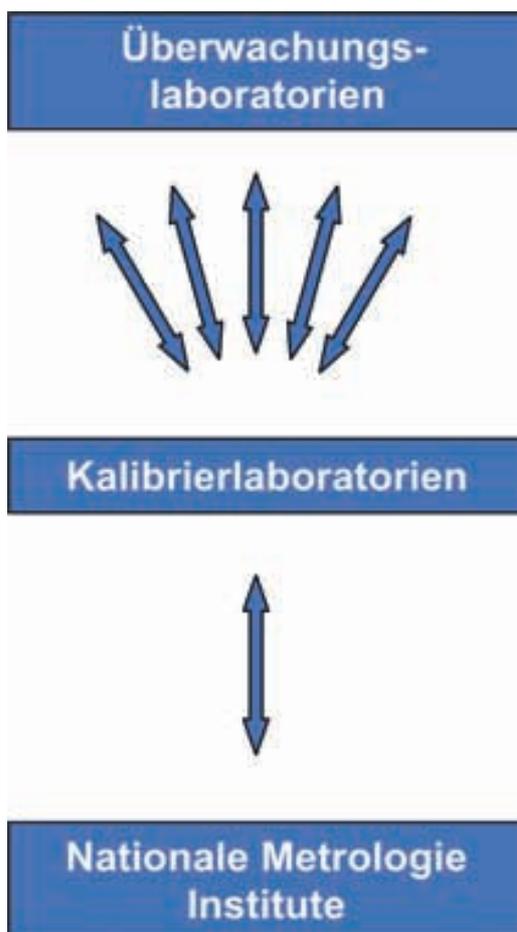


Bild 4: Rückführungs- und Weitergabesystem für die Wasseranalytik.

## Spurenfeuchte-Generierung durch Permeation und deren Rückführung

Die Bedeutung zuverlässiger, d. h. auf ein Primärnormal rückgeführter Messungen von Wasserdampf-Konzentrationen im Spurenbereich (Volumenanteile vom  $\mu\text{l/l}$ -Bereich bis in den  $\text{nl/l}$ -Bereich) hat in den letzten Jahren stetig zugenommen. Zwei Gebiete sind besonders hervorzuheben: Zum einen die Restwasserdampfgehalte in Reinstgasen für die Halbleiter-Industrie und zum anderen die Wasserdampfkonzentrationen in der Stratosphäre, da Wasserdampf das dominanteste Treibhausgas in der Erdatmosphäre und deshalb ein Schwerpunkt der meteorologischen Forschung ist. Die in der messtechnischen Praxis eingesetzten Hygrometer arbeiten nicht fundamental, müssen deshalb kalibriert, d. h. mittels eines Referenzgases rückgeführt werden. Referenzgase mit definierten stabilen Spurenfeuchte-Gehalten lassen sich aber nicht statisch in Druckgasflaschen weitergeben. Daher werden für die Kalibrierung dynamisch arbeitende ortsfeste Feuchte-Generatoren verwendet, an die die Hygrometer direkt angeschlossen werden, oder an denen mobile Transfer-Normale eingemessen werden, mit denen dann die Hygrometer in der Praxis verglichen werden.

Bisher kommen als Transfer-Normale meist Tauspiegel-Hygrometer zum Einsatz. Die Entwicklung geht aber auch zu mobil einsetzbaren Permeations-Generatoren als Wasserdampfquellen. Mit diesen erfolgt die Bereitstellung eines definierten Wasserdampfgehaltes technisch relativ einfach durch eine Polymermembran, die mit einer bekannten stabilen Permeationsrate definierte Mengen Wasserdampf in einen trockenen Gasstrom abgibt. Nachteil dieses Generatortyps ist, dass er nicht fundamental arbeitet und daher als ein Sekundärnormal kalibriert werden muss.

Zur Kalibrierung solcher Permeations-Sekundärnormale müssen Permeationsrate und Temperatur einer gegebenen Membran sowie der Massestrom des Trägergases bzw. dessen Volumenstrom, Temperatur und Druck bestimmt und die sich daraus ergebende Wasserdampfkonzentration mit einem Referenzgas aus einem Primärnormal verglichen werden.

Dafür wurde in der AG 3.21 ein spezieller Messplatz aufgebaut, mit dem solche Permeations-Generatoren auf das nationale Spurenfeuchte-Normal rückgeführt werden können.

Des Weiteren sind durch Untersuchungen verschiedenster Membranmaterialien umfangreiche Erfahrungen zu deren Eignung für den Einsatz in Permeations-Generatoren gesammelt worden, so dass solche Generatoren im Bereich von etwa 10 nl/l bis etwa 100 µl/l Volumenanteil Wasserdampf selbst gebaut werden können, mit verschiedenen Membranen, Gasflüssen bis 10 l/min und Temperaturen von 20 °C bis 60 °C.

Auf diese Weise ist die Rückführung der Messung von Wasserdampf im Spurenbereich in vielen Fällen nun einfacher und sicherer geworden.

### **Metrologie für die Industrie**

Die Arbeiten zur Unterstützung der Industrie erfolgen weitestgehend im Rahmen der Rückführung von Normalen für DKD-Laboratorien. Bei den Messgrößen Druck (57 Laboratorien) und Feuchte (12) ist eine weitere Zunahme der DKD-Kalibrierlaboratorien zu verzeichnen. Darüber hinaus wird die Rückführung für die Messgrößen Stoffmengenkonzentration (6), Dichte (6), pH-Wert (3), elektrolytische Leitfähigkeit (3), kleine Volumina (3), katalytische Aktivitätskonzentration (1) und Viskosität (1) gesichert. Für die Messgröße Feuchte wurden auf das nationale Normal rückgeführte, mobile Spurenfeuchtequellen auf Permeationsbasis entwickelt, mit denen ein neuer, effizienter Weg für die Rückführung dieser Messgröße eröffnet wird.

### **Unterstützung der Eichbehörden**

Durch die Einführung der europäischen Richtlinie für Messgeräte im November 2006 ist es zu zahlreichen Veränderungen im gesetzlichen Messwesen gekommen. So wurde z. B. das Inverkehrbringen von Abgasmessgeräten für Motoren mit Fremdzündung (z. B. Benzinmotoren) europäisch harmonisiert. Diese Veränderungen führen insbesondere in der derzeitigen Einführungsphase zu einem großen Informationsbedarf, sowohl seitens der Eichbehörden als auch der Hersteller von entsprechenden Messgeräten. Die PTB nimmt Teil am europäischen Informationsaustausch und berät die beteiligten Parteien.

Aufgrund der Entwicklungen auf dem Energiemarkt und hier insbesondere bei der Gasversorgung spielt auch die Abrechnung von thermischer Energie eine immer größer werdende Rolle. Hierbei unterstützt die PTB die Eichbehörden durch enge Einbindung in den Zulassungsprozess von Brennwertrekonstruktionssystemen zur Erleichterung der eichtechnischen Prüfungen und Überwachung. Darüber hinaus arbeitet die PTB in zahlreichen Arbeitsausschüssen des gesetzlichen Messwesens mit den Eichbehörden zusammen, um in der Eichpraxis auftretende Probleme zu lösen, und organisiert Ringvergleiche, um die Einheitlichkeit des gesetzlichen Messwesens zu sichern.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Auf dem Weg zu 7 MPa-Absolutdrucknormalen für die Neubestimmung der Boltzmann-Konstante

Bei der Neubestimmung der Boltzmann-Konstante mit Hilfe der Dielectric-Constant-Gas-Thermometry müssen Absolutdrücke in Helium bis 7 MPa mit einer relativen Standardunsicherheit von  $1 \cdot 10^{-6}$  gemessen werden. Die Untersuchung zeigt die Machbarkeit solcher hochpräzisen Druckmessungen bei der Verwendung von speziellen Kolbenmanometern und Erfüllung weiterer Voraussetzungen: Verbesserung der dimensionellen Messtechniken und der Druckvergleichsverfahren sowie Entwicklung neuer Theorien zur Berechnung der wirksamen Querschnittsfläche von Kolben-Zylinder-Systemen. (W. Sabuga, FB 3.2, [wladimir.sabuga@ptb.de](mailto:wladimir.sabuga@ptb.de))

#### Adiabatisches Kalorimeter zur Bestimmung thermodynamischer Stoffparameter und zur kryoskopischen Reinheitsbestimmung

Ein Prototyp eines adiabatischen Kalorimeters zur Bestimmung absoluter thermodynamischer Stoffdaten (Schmelztemperaturen, Schmelzenthalpien und Wärmekapazitäten) von Festkörpern und Flüssigkeiten wurde entwickelt und ist an Indium und Gallium erfolgreich getestet worden. Derzeitiges Einsatzgebiet ist die kryoskopische Reinheitsanalyse, die insbesondere zur Charakterisierung von Temperaturfixpunktmaterialien von Bedeutung ist. (A. Pramann, FB 3.3, [axel.pramann@ptb.de](mailto:axel.pramann@ptb.de))

#### Dichte von isotopenreinem Silizium

Für eine neue Bestimmung der Avogadro-Konstanten wurde die Dichte einer kleinen Silizium-Probe gemessen, die zu 99,98 % aus dem Isotop  $^{28}\text{Si}$  besteht. Mit Hilfe einer speziell angefertigten großen Hohlkugel aus natürlichem Silizium konnte die Dichte der kleinen Probe mit einer relativen Standard-Unsicherheit von  $1,7 \cdot 10^{-7}$  bestimmt werden. Die Dichte einer zweiten, noch kleineren Probe mit 99,99 %  $^{28}\text{Si}$  wurde mit einer Standard-Unsicherheit von  $2,8 \cdot 10^{-7}$  bestimmt. (H. Bettin, FB 3.3, [horst.bettin@ptb.de](mailto:horst.bettin@ptb.de))

#### Verringerung der Messunsicherheit bei der Volumenbestimmung von Auftriebskörpern zur experimentellen Luftdichtebestimmung

Für Massebestimmungen hoher Genauigkeit wird durch die experimentelle Bestimmung der Luftdichte mit Hilfe von Auftriebskörpern unterschiedlicher Dichte eine geringere Messunsicherheit erzielt als durch Anwendung einer Zustandsgleichung. Durch Verbesserungen der hydrostatischen Wägeapparatur der PTB wurde die Messunsicherheit für das Volumen der Auftriebskörper verringert und die Unsicherheit der Volumenbestimmung um den Faktor 2 verkleinert. (H. Toth, AG 3.33, [hans.toth@ptb.de](mailto:hans.toth@ptb.de))

### Metrologie für die Gesellschaft

#### Neuer Weg für metrologisch rückgeführte Referenzwerte bei Trinkwasservergleichsmessungen

Aufgrund zunehmender Forderungen nach internationaler Vergleichbarkeit von Messresultaten gewinnen metrologisch rückgeführte Referenzwerte für Vergleichsmessungen ständig an Bedeutung gegenüber den in Ringvergleichen ermittelten und heute überwiegend verwendeten Konsenswerten. Im Rahmen einer Studie konnte gezeigt werden, dass auf der Basis gravimetrisch oder volumetrisch hergestellter Proben für die Vergleichsmessungen und mit Hilfe der Ergebnisse der Teilnehmer rückgeführte Referenzwerte ermittelt werden können. Der hier aufgezeigte Weg ist insbesondere für das NMI sehr rationell und daher ein Ansatz, den großen Rückführungsbedarf, der im Bereich Nahrungsmittel- und Umweltanalytik besteht, zu bewältigen. (D. Schiel, FB 3.1, [detlef.schiel@ptb.de](mailto:detlef.schiel@ptb.de))

### **Neue Gerätenorm für die Zündschutzart Eigensicherheit veröffentlicht**

Die neue Ausgabe der Norm für die Zündschutzart Eigensicherheit wurde 2007 als EN 60079-11 sowie als VDE 0170-7 veröffentlicht, wobei wesentliche Ergänzungen, die den Einsatz modernerer Elektronik erlauben, auf Arbeiten der PTB in Zusammenarbeit mit namhaften deutschen Industriepartnern basieren. Die genannten Normen sind auch gleich lautend mit der internationalen IEC 60079-11, die z.B. für das weltweite Prüf- und Zertifizierungsschema IECEx angewandt wird. (U. Johannsmeyer, FB 3.6, ulrich.johannsmeyer@ptb.de)

### **Leistungsgrenze für die Zündschutzart Eigensicherheit auf das Vierfache angehoben**

Durch Anwendung eines neu entwickelten Schutzkonzeptes kann die verfügbare Ausgangsleistung eigensicherer Quellen mit geringem Zusatzaufwand erheblich gesteigert werden. Die nutzbaren Ausgangswerte entsprechen dabei etwa der Leerlaufspannung und dem Kurzschlussstrom linearer Quellen, wobei bei diesen bekanntlich praktisch nur ein Viertel des sich aus dem Produkt von Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom ergebenden Leistungswertes genutzt werden kann (PLS = Pseudo Linear Source). (U. Gerlach, FB 3.6, udo.gerlach@ptb.de)

### **Nachrüstung von Frequenzumrichtern – Energieeinsparungspotentiale beim Antrieb von Strömungsmaschinen in der chemischen Industrie**

In der chemischen Industrie wird die überwiegende Zahl der eingesetzten Motoren zum Antrieb von Strömungsmaschinen verwendet. Als Strömungsmaschinen werden hier Maschinen bezeichnet, die zur Förderung von Gasen oder Flüssigkeiten eingesetzt werden, wobei das zu fördernde Medium über ein Schaufelrad in Bewegung gesetzt wird und deren Drehmomentbedarf quadratisch mit der Antriebsdrehzahl ansteigt. Dieses ist bei Lüftern und Kreiselpumpen der Fall. Zur optimalen Prozessführung ist es erforderlich, die Förderleistung der Strömungsmaschinen verändern zu können und den aktuellen Anforderungen anzupassen. (C. Lehrmann, FB 3.7, christian.lehrmann@ptb.de)

### **Zündung von Wasserstoff/Luftgemischen durch elektrische Entladungen bei hochfrequenter Wechselfeldspannung**

Elektrische Entladungen (Vor-/Teilentladungen) können brennbare Gas/Luft-Gemische entzünden und müssen daher beim Explosionsschutz elektrischer Geräte berücksichtigt werden. Diesbezüglich wurde an der Spitze-Platte-Anordnung (stark inhomogenes Feld) durch eine Wechselfeldspannung ( $f = 630 \text{ kHz}$ ) die Zündfähigkeit eines Wasserstoff/Luft-Gemisches durch Vorentladungen untersucht, indem die Anzahl der Schwingungen und damit die Pulsdauer variiert wurde. (F. Lienesch, FB 3.7, frank.lienesch@ptb.de)

### **Berechnung der Läuferstillstandserwärmung von Asynchronmaschinen zur Bestimmung der Auslösezeit $t_e$ für die Zündschutzart „e“**

Die PTB prüft und zertifiziert seit Jahrzehnten elektrische Maschinen bis hin zu Leistungen von einigen Megawatt. Abhängig von der Netzkonstellation des Prüffeldes ist es bei großen Maschinen sehr aufwendig oder nicht mehr möglich, die Einschaltung bei blockiertem Läufer durchzuführen, da der Anzugsstrom ein Vielfaches des Bemessungsstromes beträgt. Wenn eine Prüfung nicht mehr durchgeführt werden kann oder die möglichen Prüfbedingungen zu stark von den Bemessungsdaten abweichen, muss die Ermittlung der Erwärmung auf eine andere Art und Weise, z.B. durch Berechnung, erfolgen. (U. Dreger, FB 3.7, uwe.dreger@ptb.de)

### **Temperaturverteilungen über heißen Oberflächen und in Reibstellen**

Die Berechnung der Temperaturverteilung über einer heißen, ruhenden Oberfläche und in einer Reibstelle bei freier Konvektion sowie die Validierung der CFD-Simulationsrechnungen waren 2007 die Themenschwerpunkte im Projekt „Simulation mechanisch erzeugter Zündquellen“. Die Validierung erfordert verlässliche experimentelle Daten, damit die Simulationsrechnungen auch bei experimentell nicht zugänglichen Anordnungen angewendet werden können. (T. Ott, FB 3.7, toni.ott@ptb.de)

### **Prüfverfahren für triboelektrische Sprüheinrichtungen**

Triboelektrische Sprüheinrichtungen werden in der Lackiertechnik verwendet, um Pulverlacke durch Reibung an einem Kunststoffrohr aufzuladen. Die dabei entstehenden elektrostatischen Aufladungen sind potenziell zündfähig und müssen begrenzt werden. Es wurde ein Prüfaufbau und ein Verfahren für die EG-Baumusterprüfung auf Grundlage der DIN EN 50050:2007 „Elektrische Betriebsmittel für explosionsgefährdete Bereiche – Elektrostatische Handsprüheinrichtungen“ entwickelt. (D. Möckel, FB 3.7, dieter.moeckel@ptb.de)

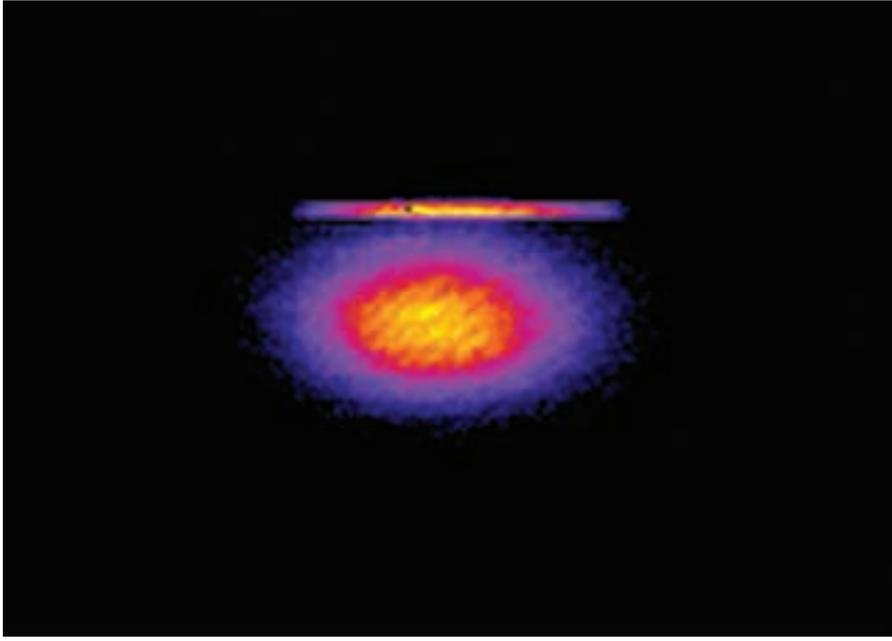
### **Internationale Angelegenheiten**

#### **Salzgehalt von Meerwasser zuverlässig messen**

Die Rückführbarkeit der Salinitätsbestimmung wurde jetzt in einer ersten EUROMET-Studie untersucht. (P. Spitzer, FB 3.1, petra.spitzer@ptb.de)



# Optik



**Berichte der Abteilungen**

# Optik

Die Abteilung *Optik* der PTB organisiert ihre Arbeit in den fünf Fachbereichen *Photometrie und angewandte Radiometrie, Bild- und Wellenoptik, Längeneinheit und Quantenoptik, Zeit und Frequenz* und *Optische Technologien*.

Ein besonderes Highlight in diesem Jahr mit großen Chancen und Rückwirkungen auf die zukünftige Entwicklung von drei Fachbereichen der Abteilung *Optik* war zweifellos die Einrichtung des Exzellenzclusters QUEST (Centre for Quantum Engineering and Space Time Research) an der Leibniz-Universität Hannover (Bild 1). An diesem Cluster sind zusätzlich das Laserzentrum Hannover, das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) sowie das Zentrum für Angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation beteiligt. QUEST soll schwerpunktmäßig die Forschung zum Quanten-Engineering sowie zur Raumzeit vorantreiben, die zugrunde liegende Physik erforschen und innovative Methoden für neue Anwendungen erschließen. Die Quantenmetrologie soll für Tests fundamentaler physikalischer Gesetze, für bisher beispiellose Präzisionsmessungen von Raum und Zeit, für bahnbrechende quantentechnologiebasierte Anwendungen in globaler Geodäsie, bei Inertialmessungen, in der Navigation und laserbasierten Messungen von großen Abständen eingesetzt werden. Im Rahmen von QUEST wird auf dem Gelände der PTB in unmittelbarer Nachbarschaft der Fachberei-

che *Zeit und Frequenz* und *Längeneinheit und Quantenoptik* ein gemeinsames Institut mit der Leibniz-Universität entstehen, in dem eine neue Professur *Experimentelle Quantenmetrologie* und eine Nachwuchsforschergruppe *Materiewelleninterferometrie und Fundamentalkonstanten* eingerichtet wird. QUEST ergänzt und unterstützt dabei in hohem Maße die Aufgaben der PTB und profitiert gleichzeitig von deren Expertise und Kompetenz.

Im Folgenden werden darüber hinaus weitere wichtige Ergebnisse und besondere Entwicklungen des Jahres 2007 aus den fünf Fachbereichen der Abteilung *Optik* vorgestellt.

## **Photometrie und angewandte Radiometrie**

Der Fachbereich *Photometrie und angewandte Radiometrie* realisiert neben der photometrischen Basiseinheit „Candela“ unterschiedliche optische Einheiten und Messgrößen der verschiedenen untereinander verknüpften radiometrischen und photometrischen Einheiten im Wellenlängenbereich oberhalb von 200 nm und gibt sie mit angemessen kleiner Unsicherheit weiter. Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte im vergangenen Jahr lagen bei der Messtechnik für neuartige Lichtquellen und die Photovoltaik.

Deutschland ist weltweit führend im Bereich Photovoltaik, wo photovoltaische Module zur direkten Umwandlung von optischer Strahlungsenergie in elektrische Energie eingesetzt werden. Für die Qualitätssicherung bei Herstellung und Erwerb von Photovoltaikbauelementen und für die Kontrolle von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen werden als Normale kalibrierte Referenz-Solarzellen benötigt. Bei Untersuchungen der Referenzsolarzellen in der PTB, die im Rahmen der weltweiten Photovoltaikskala eingesetzt werden, stellte sich heraus, dass sich deren Empfindlichkeit bei einer Bestrahlung mit ultravioletter Strahlung, die einem fünf-

### **Titelbild:**

Falschfarbendarstellung der Dichte von etwa 100 000 Strontiumatomen einer Temperatur von wenigen Mikrokkelvin, die in einem optischen eindimensionalen Gitter (Linie) gefangen sind. Die nicht eingefangenen Strontiumatome fallen als Wolke im Schwerfeld der Erde. Die im optischen Gitter gefangenen Atome stellen das Herzstück einer optischen Atomuhr dar.



Bild 1: Die Mitglieder des QUEST-Teams nach der erfolgreichen Präsentation ihres Exzellenzclusters vor den internationalen Gutachtern am 23.07.2007 in Bonn.

monatigem Feldeinsatz entspricht, um mehrere Promille verändern kann. Nachdem die UV-Empfindlichkeit des Gehäuses als Ursache identifiziert wurde, wird jetzt in Zusammenarbeit mit dem Hersteller eine neue Verkapselung entwickelt.

Weiterhin wurden bei der Untersuchung verschiedener Solarzellen aus kristallinem Silizium UV-induzierte Nichtlinearitäten festgestellt, die schon bei sehr geringen Bestrahlungsstärken auftreten können. Die auftretenden Effekte konnten durch ein mikroskopisches Modell erklärt werden (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Die besonderen Messmöglichkeiten der PTB (s. z. B. Bild 2) sind auch gefordert, wenn es darum geht, besonders aufwendige Kalibrierungen durchzuführen oder neue Messverfahren zu entwickeln. So wurde z. B. im Berichtszeitraum das Spektroradiometer SOLSPEC kalibriert, das auf der Internationalen Raumstation die spektrale Bestrahlungsstärke der Sonne vom ultravioletten bis in den nahen infraroten

Spektralbereich über einen längeren Zeitraum messen soll. Ein besonderes Charakteristikum liegt bei solchen radiometrischen – aber in noch viel stärkerem Maße bei photometrischen Messungen – darin, dass die benötigte Genauigkeit so hoch ist, dass sie auch nur mit Mühe von den primären Normalen erreicht werden kann. Daher ist die Reduzierung aller relevanten Unsicherheitsbeiträge auf dem Weg zum oder beim Kunden eine wichtige Aufgabe der PTB. Im vergangenen Jahr ist bei der Messung von Lichtströmen in integrierenden Kugeln, die in der Industrie wegen ihrer Einfachheit vorrangig eingesetzt werden, ein Durchbruch gelungen. Durch die Neuentwicklung eines Kugelscanners, der Inhomogenitäten der integrierenden Kugel direkt misst, ist es für die Lampen- und

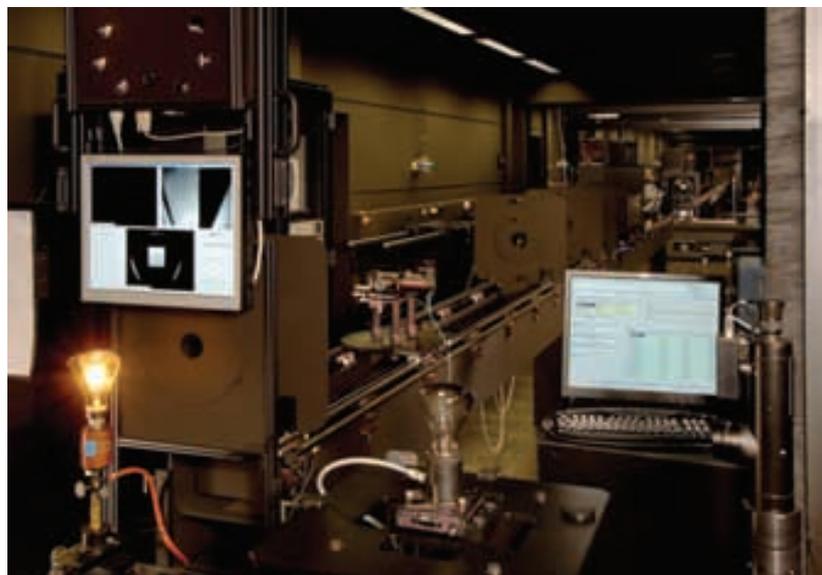


Bild 2: Optisches Photometerbanksystem der PTB

Beleuchtungsindustrie jetzt einfacher möglich, kleinere und belastbare Unsicherheiten für genaue Lichtstrommessungen zu erreichen.

Die Schulung von Ingenieuren und Wissenschaftlern aus der Industrie ist in diesem Sinne ein wichtiges Anliegen der PTB. Auf Grund der ungebrochenen Nachfrage ist das 2004 zum ersten Mal durchgeführte Photometrieseminar jetzt eine permanente Einrichtung geworden, in dem zunächst die Grundlagen der Farb- und photometrischen Messtechnik einschließlich der erforderlichen Messunsicherheitsbetrachtungen für die unterschiedlichsten Lampen und Leuchten vermittelt werden. Ein Schwerpunkt liegt bei den Leuchtdioden, die gegenüber klassischen Leuchten eine ganz neuartige Messtechnik erfordern. Im zweiten Teil des Seminars haben die Teilnehmer Gelegenheit, sich in kleinen Arbeitsgruppen an praktischen Beispielen der optischen Messtechnik zu üben, wozu Messungen in gerichteter Photometrie, des Lichtstroms mit Hilfe von Ulbrichtkugeln und Farbmessstechnik gehören (Bild 3).



Bild 3: Seminarteilnehmer bei photometrischen Messungen mit der großen Ulbricht-Kugel

### Bild- und Wellenoptik

Im Fachbereich *Bild- und Wellenoptik* werden schwerpunktmäßig die optische Formmessung und die höchstauflösende Mikroskopie bearbeitet. Neben den verschiedensten Kalibrieraufgaben (siehe z.B. Bild 4) werden Grundlagenuntersuchungen zur Entwicklung von Messverfahren und industrienahen Umsetzungen insbesondere dort durchge-

führt, wo eine rasche Weitergabe der neuen Entwicklungen benötigt wird oder wo eine Rückführung auf das internationale Einheitensystem (SI) erforderlich ist.

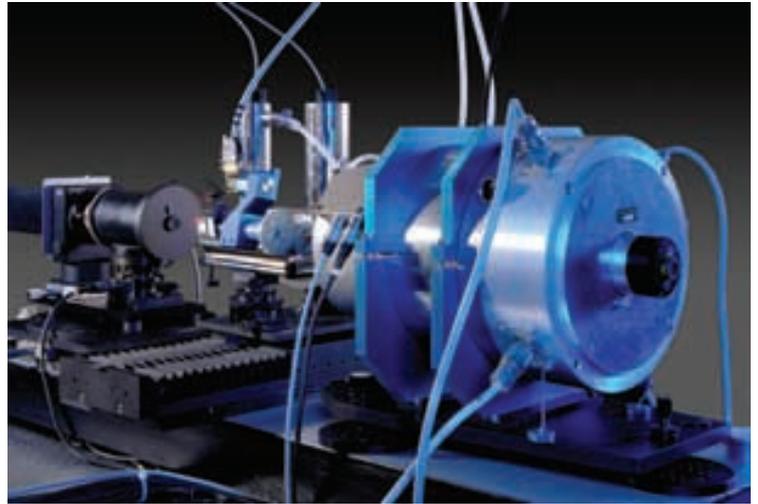


Bild 4: Messeinrichtung zur Messung der Polarisationsdrehung von Quarzreferenzplatten

Die seit Jahrzehnten andauernde kontinuierliche Verringerung der Strukturbreiten moderner integrierter Schaltungen war beispielsweise die Vorbedingung für die atemberaubende Zunahme der Fähigkeiten moderner Computer. Für die quantitative Messtechnik führte diese Verringerung zu großen Herausforderungen, denen nur mit dem gleichzeitigen Einsatz optischer Mikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie und der Scatterometrie begegnet werden kann. Da die heutigen Strukturbreiten wesentlich geringer als die Wellenlänge des Lichtes sind, ist im optischen Mikroskop eine quantitative Bestimmung der Strukturbreiten mit hoher Genauigkeit immer nur durch den Vergleich der aufgenommenen Mikroskopbilder mit Modellrechnungen möglich. Dabei kommt insbesondere der richtigen Fokuseinstellung bei Modellrechnung und Aufnahme höchste Bedeutung zu, da sonst systematische Abweichungen zwischen ermittelten und wahren Strukturbreiten auftreten. In der PTB wurde ein neues Fokuskriterium entwickelt, das nicht nur für Transmissionsmasken, sondern auch für neuartige phasenschiebende Masken verbesserte Ergebnisse hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Genauigkeit liefert.

Nach heutigem Kenntnisstand werden zukünftige Belichtungstechniken für die Halbleiterlithographie auf Wellenlängen im erwei-

terten ultravioletten (EUV-) Spektralbereich zurückgreifen, für die dann keine Transmissionsmasken mehr zur Verfügung stehen. Um für die entsprechende Messtechnik gerüstet zu sein, hat die PTB ein so genanntes Deep UV (DUV)-Scatterometer entwickelt. Dabei wird die von der Maskenstruktur zurückgestreute Strahlung analysiert, die durch Interferenz winkelahängige Strukturen enthält, die für die Abmessungen der Strukturen auf der Maske charakteristisch sind. Im Berichtszeitraum konnte gezeigt werden, dass sich die DUV-Scatterometrie als metrologisches Verfahren für die Charakterisierung der Maskenstrukturen eignet. Auf Grund der längeren Wellenlänge kann ein Scatterometer im DUV z. B. bei Vielschichtsystemen besser geeignet sein als ein Scatterometer im EUV, da dabei Inhomogenitäten der Dicken der Einzelschichten besser unterdrückt werden (s. Nachrichten aus der Abteilung).

### Quantenoptik und Längeneinheit

Der Fachbereich *Quantenoptik und Längeneinheit* stellt ausgesuchte Wellenlängen- und Frequenznormale vom optischen bis in den röntgenoptischen Bereich bereit, die die Rückführung auf die Einheit Meter im Internationalen Einheitensystem erlauben. Im Fachbereich werden neuartige Methoden der Längenmessung und -weitergabe und optische Frequenznormale entwickelt, die zukünftig auch als optische Uhren eine weiter verbesserte Zeit- und Frequenzdarstellung erlauben. Daher werden optische Frequenznormale gemeinsam mit dem Fachbereich *Zeit und Frequenz* bearbeitet.

Auf Grund ihrer hohen optischen Frequenz, die um etwa fünf Größenordnungen über den heute für die Zeiterzeugung und Zeitverteilung benutzten Frequenzen im Mikrowellenbereich liegen, sind optische Uhren hinsichtlich ihrer Stabilität den besten Mikrowellenuhren um Größenordnungen überlegen. Sollen optische Uhren für die Zeitverteilung eingesetzt werden, verlieren sie diesen Vorteil, da die bisherige Zeit- und Frequenzverteilung über Satelliten oder Funk ebenfalls nur im Radio- oder Mikrowellenfrequenzbereich arbeitet. Die PTB untersucht daher, inwieweit und mit welcher Genauigkeit die Weitergabe optischer Frequenzen über die optischen Lichtleiterfasern der Telekommunikationsnetze möglich ist. Kommerzielle

Fasernetze sind meistens für Wellenlängen um  $1,55 \mu\text{m}$  ausgelegt, da die Glasfasern hier kleine Verluste haben und es dafür einfache optische Verstärker gibt. Damit ist eine direkte Übertragung beliebiger optischer Frequenzen nicht möglich. Allerdings kann mit Hilfe eines optischen Femtosekundenfrequenzkammgenerators jede beliebige optische Frequenz phasenkohärent an eine beliebige andere optische Frequenz angeschlossen werden. In einer Zusammenarbeit mit dem französischen Staatsinstitut SYRTE wurde im Berichtszeitraum mit diesem Konzept die Übertragung einer optischen Frequenz in einem Fasernetz im Großraum Paris untersucht. Über eine Entfernung von 86 km, die mit Hilfe von externen Faserstrecken auf über 200 km verlängert werden konnte, wurde gezeigt, dass innerhalb einer Mittelungszeit von wenigen Stunden die Frequenz mit einer relativen Unsicherheit von etwa  $3 \cdot 10^{-18}$  übertragen werden konnte. Dies unterschreitet die erreichbaren Werte bei den besten Satellitenübertragungen beträchtlich (s. Nachrichten des Jahres).

Bei der Weiterentwicklung optischer Atomuhren werden gegenwärtig zwei unterschiedliche Wege verfolgt, die beide relative Unsicherheiten unter  $10^{-17}$  erwarten lassen. Der eine Entwicklungsstrang nutzt ultraschmale Übergänge in einem einzelnen Ion, das in einer Radiofrequenzfalle für beliebig lange Zeit gespeichert werden kann. Die andere aktuelle Entwicklungsrichtung setzt auf ein Ensemble von Neutralatomen, die in einem optischen Gitter gespeichert werden. Beide Entwicklungen haben ihre Vorteile und es ist bisher nicht abzusehen, welche sich letztendlich durchsetzen wird. In diesem Jahr wurde in der PTB erstmalig eine Apparatur in Betrieb genommen, in der etwa 100 000 Strontiumatome in einem optischen Gitter gefangen und dort für die Abfrage des Uhrenübergangs genutzt werden.

Die bekannte Wellenlänge optischer Frequenznormale bietet die Möglichkeit, „optische Lineale“ für höchstgenaue Längenmessungen herzustellen. Allerdings sind die Wellenlängen im sichtbaren Spektralbereich für manche Anwendungen beispielsweise in der Nanometrologie zu groß. Röntgenstrahlung mit ihrer um Größenordnungen kleineren Wellenlänge und ihrer Fähigkeit

auch Materialien zu durchdringen, die im optischen Spektralbereich undurchsichtig sind, sind dabei oft geeigneter. In der PTB gibt es daher ein Projekt, die Wellenlänge von 0,086 nm der Mößbauerlinie von  $^{57}\text{Fe}$  durch direkten Vergleich mit der Wellenlänge eines optischen Frequenznormals mit bisher kleinster Unsicherheit zu bestimmen. Das geschieht in einem kombinierten Röntgen- und Lichtinterferometer, das einen versetzungs-freien Saphir-Einkristall enthalten soll, der die Röntgenstrahlung reflektiert. Allerdings war es bisher nicht möglich, versetzungs-freie Saphir-Einkristalle zu erhalten. Daher wurde ein Messplatz entwickelt, mit dem die Versetzungen in Kristallproben untersucht werden können. Damit können jetzt aus unterschiedlichen kommerziell verfügbaren Kristallen in kurzer Zeit versetzungs-freie Kristallbereiche identifiziert werden, die dann im Interferometer eingesetzt werden sollen.

Ein idealer Kristall wird auch für ein Projekt benötigt, bei dem die Avogadrokonstante neu bestimmt wird (Bild 5). Nachdem die Genauigkeit dieser Bestimmung mit dem Isotopengemisch von natürlich vorkommenden Silicium nicht mehr gesteigert werden konnte,



wurde jetzt ein Einkristall aus höchst angereichertem 28-Si gezüchtet, mit dem die Messungen durchgeführt werden sollen, die auch für eine Neudefinition der Masseneinheit höchste Bedeutung haben.

### Zeit und Frequenz

Der Fachbereich *Zeit und Frequenz* entwickelt und betreibt die genauesten Atomuhren, mit denen er die gesetzliche Zeit in Deutschland darstellt und europaweit verbreitet. Seit mehreren Dekaden tragen die Uhren der PTB an prominenter Stelle zur internationalen Weltzeit bei (Bild 6).

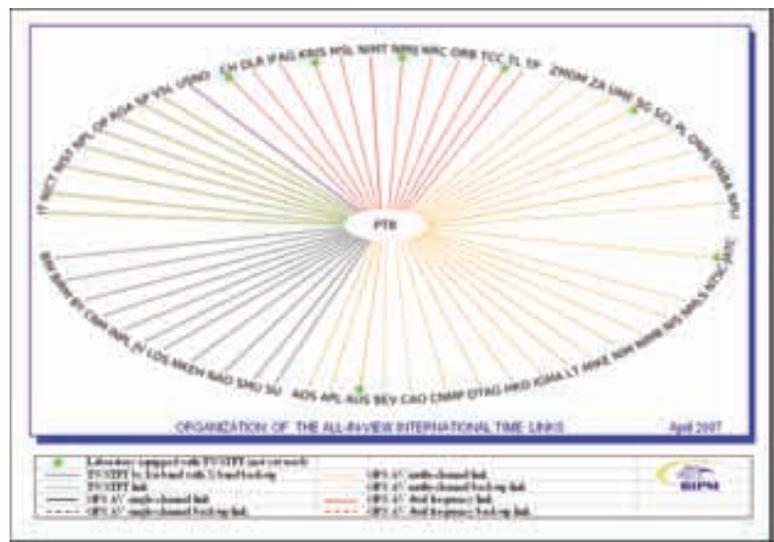


Bild 6: Die gegenwärtige Organisation der internationalen Zeitvergleiche über die Satelliten des Global Positioning Systems (GPS) bezieht sich auf die Zeitskala der PTB (Quelle: Internationales Büro für Maß und Gewicht, BIPM)

Gegenwärtig wird die Zeitskala mit Caesiumatomuhren erzeugt, die in der PTB kontinuierlich weiterentwickelt werden. Obwohl optische Atomuhren heute schon bezüglich Reproduzierbarkeit und Stabilität den Caesiumatomuhren, die im Mikrowellenbereich arbeiten, überlegen sind, werden die Caesiumatomuhren auf absehbare Zeit noch das Rückgrat der Darstellung der Zeitskala und der Zeitverteilung darstellen. Das wird sich auch nicht prinzipiell ändern, solange die

Bild 5: Am hoch angereicherten Si-28-Einkristall in der Zuchtapparatur sind die beiden Bereiche mit größerem Querschnitt zu erkennen, aus denen die Kugeln für das internationale Avogadro-Projekt gefertigt werden.

Definition der Zeiteinheit über den Mikrowellenübergang im Caesiumatom definiert ist. Generell konnte die Genauigkeit der weltweit besten primären Caesiumuhren um etwa eine Größenordnung pro Dekade gesteigert werden. Dennoch trägt beispielsweise die zweite primäre Caesiumatomuhr CS2 der PTB, die einen thermischen Caesiumatomstrahl nutzt, nach etwa dreißigjährigen Dauerbetrieb immer noch wesentlich zur internationalen Atomzeit bei. Die jüngste Generation der Caesiumatomuhren sind die Fontänenuhren, in denen die Abfrage des Uhrenübergangs mit lasergekühlten Caesiumatomen eine etwa zwanzigfach reduzierte Unsicherheit erlaubt. In diesem Jahr wurde die elektronische Mikrowellenerzeugung für die Atomfontänen neu konzipiert und aufgebaut, die die Strahlung zur Abfrage der Caesiumatome liefert. Dabei ist es jetzt z. B. möglich, die überlegene Kurzzeitstabilität optischer Frequenznormale auch für die Caesiumfontänen zu nutzen, wobei deren in den Radiofrequenzbereich heruntergeteilte Frequenz genutzt wird.

Der Langwellensender DCF 77 ist für die PTB in Deutschland weiterhin eines der wichtigsten Medien, die gesetzliche Zeit in Deutschland zu verbreiten (Bild 7). Um den Service auch in Zukunft verlässlich zur Verfügung stellen zu können, wurde am Senderstandort in Mainflingen von der PTB kürzlich eine neue Steuereinrichtung aufgebaut und in Betrieb genommen. Mit der neuen Steuereinrichtung können jetzt auch zusätzliche Daten-

inhalte übertragen werden, wie z. B. Wetterdaten oder zukünftig möglicherweise auch Gefahrenwarnhinweise (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Die Kompetenz der PTB für Zeit- und Frequenzmessungen wird gerne von unterschiedlichsten Nutzern in Wissenschaft und Raumfahrt genutzt. Im Jahr 2007 war die PTB beispielsweise führend eingebunden in die Erstellung verschiedener Studien. Mehrere Vorschläge betrafen die Nutzung optischer Atomuhren (Bild 8) für Grundlagenexperimente im Weltraum. Eine andere Studie, die im Auftrag der Europäischen Weltraumorganisation ESA durchgeführt worden war, untersuchte die Realisierung optischer Atomuhren in den Basisstationen der ESA für die genaue Kursbestimmung von Raumsonden im Weltraum. Die Studie, die gemeinsam mit dem englischen NPL, dem deutschen DLR und der deutschen Firma Timetech durchgeführt wurde, zeigte die Bedingungen und die Konzeption, unter denen optische Atomuhren vorteilhaft eingesetzt werden können. Die PTB ist auch maßgeblich beteiligt an der Konzeption und dem Aufbau des Zeitsystems für das künftige europäische Satellitennavigationssystem „Galileo“, wo sie gegenwärtig beispielsweise Subsysteme für die „Precise Timing Facility“ aufbaut und validiert.



Bild 7: Neue Steuereinrichtung für die Erzeugung und Aussendung des DCF 77-Langwellenzeitsignals

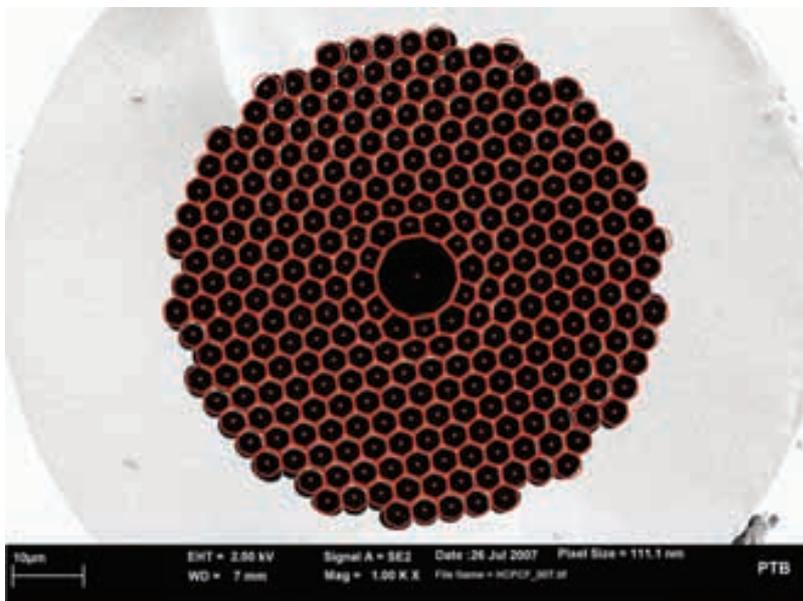


Bild 8: Die Ytterbium-Einzelionenuhr der PTB, die im vergangenen Jahr vom Internationalen Komitee für Maß und Gewicht als sekundäres Normal für die Sekunde empfohlen wurde, wird für den Dauerbetrieb weiterentwickelt.

### Optische Technologien

Der Fachbereich *Optische Technologien* greift neben seinen Aufgaben im Bereich der Messtechnik zur Reflexion und Transmission neue Aufgaben in der mikrooptischen Messtechnik auf. Dabei werden neue höchstempfindliche Messmethoden entwickelt, die zukünftig für die Charakterisierung neuartiger photonischer Komponenten eingesetzt werden.

Ein Schwerpunkt liegt dabei in der Untersuchung von neuartigen mikrostrukturierten optischen Fasern. Dabei kann beispielsweise eine höhere Laserleistung durch die Faser transportiert werden, die einen hohlen Kern enthält, in dem das Licht geführt wird und



der von mikrostrukturierten Kanälen umgeben ist (Bild 9). In diesen Fasern ist die so genannte Brillouinstreuung d.h. die Streuung des Lichtes an akustischen Wellen, wesentlich reduziert. Um deren Einfluss, der auch zu zusätzlichem Rauschen bei der optischen Signalübertragung führt, dennoch untersuchen zu können, wurde ein neuartiges phasenempfindliche Messverfahren eingesetzt (s. Jahresbericht 2006). Die Untersuchung des Brillouinspektrums ergab gegenüber dem einer Standardfaser ein deutlich komplexeres Spektrum, das auf Anregungen von akustischen Moden in der Mikrostruktur hinweist.

Die Erzeugung von Weißlicht aus optischen Femtosekundenimpulsen stellt in den letzten Jahren in der Metrologie einen eigenen Forschungsbereich dar, da diese „neue Sorte Licht“ besondere Eigenschaften hat, die es gestatten, neuartige Messtechniken zu entwickeln. Insbesondere die starre Phasenbeziehung zwischen den einzelnen Spektrallinien, aus denen dieses Weißlichtspektrum aufgebaut ist, hat hohe Bedeutung z.B. bei der Messung optischer Frequenzen oder bei der in der PTB entwickelten neuen Heterodyn-CARS Mikroskopie (s. Jahresbericht 2006) erlangt. Zur Erzeugung eines extrem breiten Spektrums mit hoher zeitlicher Stabilität der einzelnen Spektralkomponenten wurden verschiedene Mechanismen der Weißlichterzeugung untersucht. Es zeigt sich, dass das Rauschen der Spektralkomponenten unterschiedlich ist, aber in jedem Fall deutlich über dem der Pumplaserimpulse liegt. Die Verwendung mikrostrukturierter Fasern kann mit speziellen Anregungsverfahren auch hier dieses Rauschen für den Einsatz im Vielkanal-Heterodyn-CARS-Mikroskop reduzieren.

Bild 9: Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Hohlkernfaser und Modellstruktur (rot), die für die Berechnung der Spektrums der Brillouinstreuung herangezogen wird

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Ein hochgenauer Blick auf die Sonne

Kurz vor den Startvorbereitungen zum Space-Shuttle-Flug zur internationalen Raumstation ISS machte das Solar-Spektroradiometer SOLSPEC Station in der PTB in Braunschweig, um an der Hochtemperatur-Hohlraumstrahler-Messeinrichtung auf das Genaueste kalibriert zu werden. (P. Sperfeld, S. Pape, FB 4.1, [peter.sperfeld@ptb.de](mailto:peter.sperfeld@ptb.de))

#### Linearitätsmessung von Photodioden

Die Linearität der spektralen Empfindlichkeit bzgl. einfallender Strahlungsleistung von Photodioden für die optische Nachrichtentechnik wurde mittels der Differential-Spectral-Responsivity- (DSR-) Methode bestimmt. Die Methode ist vollständig faserbasiert, der konstante Strahlungsanteil und die modulierte Strahlung werden in einem Faserkoppler kombiniert. Diese faseroptische DSR-Methode erlaubt prinzipiell die Bestimmung der Linearität von Photodioden bis zu Leistungen im Watt-Bereich. (S. Kück, FB 4.1, [stefan.kueck@ptb.de](mailto:stefan.kueck@ptb.de))

#### Modellierung von Halbleiterdioden für den infraroten Spektralbereich

Der spektrale Reflexionsgrad und die spektrale Empfindlichkeit von Ge- und InGaAs-Photodioden im nahen infraroten Spektralbereich wurden unter nahezu senkrechtem und unter 45° Einfallswinkel gemessen. Mittels einer Matrixmethode für Dünnschichtsysteme konnten die Messergebnisse modelliert werden. Eine Charakterisierung dieser Photodioden bzgl. Reflexionsgrad und Empfindlichkeit ist nun prinzipiell für jeden beliebigen Einfallswinkel möglich und erlaubt die Modellierung von Trap-Empfängern. (S. Kück, FB 4.1, [stefan.kueck@ptb.de](mailto:stefan.kueck@ptb.de))

#### Langzeitstabilität von Referenzsolarzellen

Bei systematischen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die weit verbreiteten Referenzsolarzellen im WPVS-Design (World Photovoltaic Scale) bei einer UV-A-Bestrahlung, deren Dosis einer ca. 5-monatigen Anwendung im Außenbereich entspricht, zwischen 0,4 % und 0,9 % altern. Als Ursache dafür stellte sich die Alterung der Verkapselung der Referenzsolarzellen heraus. Der Effekt ist nicht reversibel. (S. Winter, FB 4.1, [stefan.winter@ptb.de](mailto:stefan.winter@ptb.de))

#### UV-induziertes reversibles Front-Surface-Field bei Solarzellen

Mit Hilfe einer Methode zur Bestimmung der differentiellen spektralen Empfindlichkeit, des DSR-Verfahrens, wurden UV-induzierte Nichtlinearitäten von Solarzellen aus kristallinem Silizium untersucht. Dabei wurden auch bei sehr niedrigen Bestrahlungsstärken – wie sie z. B. bei Monochromator-Messungen auftreten – bei einigen Solarzellen sehr deutlich ausgeprägte Hysterese-Effekte gefunden. Diese können mit einem bei UV-Bestrahlung entstehenden Front-Surface-Field (FSF) in Analogie zu dem bekannten Back-Surface-Field (BSF) erklärt werden. Solarzellen, die diesen Effekt zeigen, dürfen daher bei Kalibrierungen im UV-Bereich nicht als spektrale Referenz verwendet werden. (S. Winter, FB 4.1, [stefan.winter@ptb.de](mailto:stefan.winter@ptb.de))

#### Erweitertes Traceable Multi Sensor-Verfahren zur Topographievermessung optischer Oberflächen

Zur Messung der Topographie von nicht ebenen optischen Oberflächen wurde in der PTB das Traceable Multi Sensor (TMS)-Verfahren entwickelt. Der bisherige Algorithmus des TMS-Systems setzt eine exakte Positionierung des Messkopfes voraus. Das Verfahren wurde nun so erweitert, dass die Position des Messkopfes nicht mehr exakt angefahren werden muss, sondern nur bekannt sein muss. Dadurch ist die erreichbare laterale Auflösung nicht mehr durch die Positionierungsunsicherheit der Verschiebeeinheit limitiert, sondern lediglich durch die Messunsicherheit der Längenmessung und der lateralen Auflösung des Messkopfes.

(A. Wiegmann, FB 4.2, [axel.wiegmann@ptb.de](mailto:axel.wiegmann@ptb.de))

### Silizium-28 Projekt mit Russland erfolgreich abgeschlossen

Am 29. Mai 2007 wurde am Institut für Kristallzüchtung ein Einkristall aus höchstangereichertem Si-28 mit einer Masse von 4,5 kg dem Avogadroprojekt für die Herstellung von zwei 1-kg-Kugeln übergeben. Damit wurde die seit dem Frühjahr 2004 unter der Leitung der PTB bestehende Kooperation zwischen acht metrologischen Staatsinstituten, internationalen Forschungslaboratorien und russischen Forschungs- und Industrieeinrichtungen über die Lieferung von ca. 5 kg Polysilizium-28 mit einem Anreicherungsgrad von über 99,985% erfolgreich beendet. (P. Becker, FB 4.3, peter.becker@ptb.de)

### Reihenuntersuchung von monokristallinem Saphir für das Röntgen-Fabry-Perot-Interferometer

Im Zusammenhang mit dem Projekt „Röntgen-Fabry-Perot-Interferometrie“ wurde ein Messplatz für großflächige Röntgentopographie an Einkristallen bei hohem Probedurchsatz aufgebaut und in Betrieb genommen. Mit dem Messplatz wurden Versetzungen in Saphireinkristallen bestimmt und Kristalle identifiziert, die für den Einsatz im Röntgen-Fabry-Perot-Interferometer infrage kommen können. (B. Andreas, U. Kuetgens, P. Becker, FB 4.3, birk.andreas@ptb.de)

### Vermessung der Wellenfunktion stoßender Atome

Stöße kalter Atome spielen eine große Rolle bei Präzisionsexperimenten wie z.B. in der Atominterferometrie und bei optischen Atomuhren. Durch genaue Messung der Photoassoziation stoßender kalter Calciumatome konnte ein wesentlicher Parameter der Wechselwirkung, die so genannte Grundzustands-Streulänge, genau bestimmt werden und die theoretische Modellierung kalter Stöße überprüft werden. (U. Sterr, FB 4.3, uwe.sterr@ptb.de)

### Effizienter Einfang ultrakalter Strontium-Atome in ein optisches Gitter

Im Rahmen des Aufbaus einer optischen Gitteruhr mit Strontium wurde das Laden kalter Atome in ein optisches Gitter optimiert, so dass jetzt innerhalb von 150 Millisekunden ca.  $10^5$  Strontiumatome bei einer Temperatur von wenigen Mikrokkelvin in das Gitter geladen werden. Die Atome bleiben dort über eine Sekunde lang gespeichert und stehen für eine Präzisionsmessung der optischen Frequenz zur Verfügung. (U. Sterr, FB 4.3, uwe.sterr@ptb.de)

### Optischer Frequenzkamm erlaubt die Übertragung der Stabilität optischer Frequenznormale auf Mikrowellenoszillatoren

Die Stabilität eines 872 nm (344 THz)-Spektroskopielasers einer optischen Uhr wurde mit einem Frequenzkammgenerator auf einen Mikrowellenoszillator bei 9,4 GHz übertragen. Die Mikrowellenfrequenz wurde mit einem weiteren Frequenzkamm gegen ein zweites, unabhängiges Frequenznormal gemessen und charakterisiert. Das Ergebnis zeigte eine relative Frequenzinstabilität von  $1 \cdot 10^{-14}$  für eine Mittelungszeit von einer Sekunde. (B. Lipphardt, G. Grosche, H. Schnatz, FB 4.3, harald.schnatz@ptb.de)

### Transportabler Frequenzkammgenerator der PTB misst optische Frequenz in Paris

In Zusammenarbeit mit dem LNE-SYRTE in Paris wurde der transportable Frequenzkamm der PTB benutzt, um die Frequenz des Uhrenübergangs von spinpolarisierten  $^{87}\text{Sr}$  Atomen in einer optischen Gitteruhr zu bestimmen. Auf dem Weg zu einer Neudefinition der Sekunde werden unterschiedliche Realisierungen einer solchen Gitteruhr u.a. in Japan, den USA und in der PTB verfolgt. Die Frequenz des  $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$  Uhren-Übergangs wurde nun mit einer relativen Messunsicherheit von  $2,6 \cdot 10^{-15}$  bestimmt und steht in Einklang mit dem kürzlich am JILA (USA) gemessenen Wert. (H. Schnatz, G. Grosche, B. Lipphardt, FB 4.3, harald.schnatz@ptb.de)

### **Frequenz einer optischen Uhr über 200 km per Glasfaser übertragen**

Ein neues Konzept zum Vergleich optischer Uhren über Glasfasern ist in der PTB entwickelt und an einer Glasfaserstrecke, die zwei Forschungsinstitute in Paris miteinander verbindet, erprobt worden. Eine optische Frequenz, die aus einem optischen Frequenzstandard abgeleitet wurde, konnte mit einer relativen Unsicherheit von etwa  $1 \cdot 10^{-17}$  über eine Glasfaserstrecke von insgesamt 211 km Länge übertragen werden. (G. Grosche, H. Schnatz, B. Lipphardt, FB 4.3, gesine.grosche@ptb.de)

### **Strahlformung mit Röntgenkapillaroptiken**

Totalreflexionsoptiken in der Form langgestreckter Kapillaren können harte Röntgenstrahlung für die Mikrodiffraktometrie kollimieren oder fokussieren. Eine Kapillarziehmaschine und ein Raytracing-Programm zur Planung unterschiedlicher Kapillarformen wurden entwickelt. Die damit erfolgreich hergestellten Optiken kommen für das BMBF-Verbundvorhaben „iForceSens“ zum Einsatz. (K. Friedrich, FB 4.3, kathrin.friedrich@ptb.de)

### **Verbesserte Mikrowellenquelle für Fontänenuhren**

Im Zuge der Modernisierung von Hard- und Software der primären Fontänen-Atomuhren der PTB wurde in Zusammenarbeit mit dem National Physical Laboratory in New Delhi/Indien eine neue Mikrowellenquelle entwickelt, die das phasenreine und hochstabile 9-GHz-Signal zur Anregung des Cäsiumübergangs liefert. Durch den Ersatz der bisher verwendeten Quellen der früheren Generation reduzieren sich zum Beispiel die Langzeitdrift und das Phasenrauschen, was sich unmittelbar auf die Langzeitstabilität der Fontänenuhren überträgt. (R. Wynands, FB 4.4, time@ptb.de)

### **200 Messungen des TAI Skalenmaßes mit CS2**

Primäre Atomuhren stellen sicher, dass das Skalenmaß der Internationalen Atomzeit TAI (Temps Atomique International) mit der SI-Sekunde auf Meereshöhe übereinstimmt. Der Messwert der primären Uhr CS2 vom August 2007 ist der zweihundertste in ununterbrochener Folge. Keine andere Atomuhr weltweit hat jemals über einen derartigen Zeitraum hinweg ununterbrochen funktioniert und Messwerte geliefert. (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

### **Optische Uhren für Experimente im Weltraum vorgeschlagen**

Einem Aufruf der ESA folgend, wurden in internationalen Teams erste Studien für wissenschaftliche Anwendungen optischer Uhren im Weltraum erarbeitet. Auf einer Erdumlaufbahn könnte das Gravitationspotential der Erde mit erhöhter Auflösung bestimmt werden. Eine Kombination aus einer optischen Uhr und einem Beschleunigungssensor wäre geeignet, nach Abweichungen von Einsteins Gravitationsgesetz im äußeren Bereich des Sonnensystems zu suchen. (E. Peik, FB 4.4, ekkehard.peik@ptb.de).

### **Messung des Brillouin-Spektrums von Hohlkern-Bandlückenfasern**

Im Rahmen eines von der DFG geförderten Drittmittelprojekts (SFB 407) wurde ein neuartiges Messverfahren entwickelt, mit dem extrem kleine Brillouin-Streuspektren gemessen werden können, wie sie bei „photonic band gap“ Fasern mit Hohlkern vorliegen. Diese neuartigen Fasern sind besonders geeignet zur Übertragung hoher Laserleistung oder rauscharmer Signale. (H. Telle, FB 4.5, harald.telle@ptb.de)

### Weißlicht-Spektralkomponenten als Eingangssignale für optisch-parametrische Verstärker

Gegenwärtig wird ein Vielkanal-Heterodyn-CARS (coherent anti-Stokes Raman scattering)-Mikroskop aufgebaut, das optisch-parametrisch verstärkte Femtosekunden-Weißlichtimpulse zur Anregung verwendet. Die zeitliche Impulsstabilität bei der Weißlichterzeugung wurde in einer Mikrostruktur-faser und in einer Saphirplatte untersucht. Die Schuss-zu-Schuss Fluktuationen waren in der Saphirplatte geringfügig größer als in der Mikrostruktur-faser, bei der außerdem deutlich kleinere Impulsenergien benötigt wurden. (E. Benkler, FB 4.5, erik.benkler@ptb.de)

### Metrologie für die Gesellschaft

#### DCF77 fit für die Zukunft

Der Langwellensender DCF77 ist für die PTB das wichtigste Medium, die gesetzliche Zeit für Deutschland zu verbreiten. Europaweit empfangen Millionen von Funkuhren die auf 77,5 kHz ausgestrahlten Zeitzeichen. DCF77 ist so ein bedeutender Teil der technischen Infrastruktur unseres Landes geworden. Nach Abschluss der Modernisierungsmaßnahmen in den Jahren 2006 und 2007 ist DCF77 für einen Betrieb weit über das Jahr 2013 hinaus gerüstet. (Gegenwärtig ist mit der Firma T-Systems Media Broadcast eine Laufzeit bis Ende 2013 vereinbart.) (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

#### Das Herz von Galileo beginnt zu schlagen

Unter Federführung der Kayser-Threde GmbH, München, wird für das Europäische Satellitennavigationssystem Galileo eine so genannte Precise Timing Facility aufgebaut. Seit Anfang Juli 2007 ticken in der Atomuhrenhalle die für diese PTF bestimmten Caesiumatomuhren, die hier gründlich getestet und für die Integration in das Gesamtsystem vorbereitet werden. Die Überführung der Subsysteme an den Auftraggeber ist für Mitte 2008 vorgesehen (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de).

### Entwicklungen bei der Normung für Augenschutzgeräte

Die Entwicklung internationaler Wirtschaftsbeziehungen wird maßgeblich durch ein einheitliches Regelwerk gefördert. Der Bereich der Normung für Augenschutzgeräte wird auf europäischer und weltweiter Ebene in CEN- und ISO-Arbeitsgruppen durch die PTB mitgestaltet. Die Bearbeitung hat einen Stand erreicht, der es erlaubt, im Verlauf des Jahres 2008 die ersten ISO-Normen für dieses Fachgebiet als abstimmungsfähige Vorlage vorzulegen. (A. Schirmacher, FB 4.5, alfred.schirmacher@ptb.de)

### Metrologie für die Wirtschaft

#### Lichtstrommessungen einfacher und genauer

Wie viel Licht eine Lampe in alle Richtungen zusammen abstrahlt, wird durch ihren Lichtstrom ausgedrückt. Um den Lichtstrom von Lampen schnell zu bestimmen, werden vor allem von der Lampenindustrie so genannte Ulbrichtkugeln eingesetzt. Ein neuartiger besonders einfach einzusetzender Kugelscanner ermöglicht es vielen Firmen, erstmalig die Homogenität Ihrer Ulbrichtkugel zu messen. Zusammen mit den Abstrahlungscharakteristiken der zu vergleichenden Lampentypen kann nun ein wichtiger Korrekturfaktor bestimmt werden. (S. Winter, FB 4.1, stefan.winter@ptb.de)

#### Transfer der „Traceable Multi Sensor“ (TMS)-Technik in die Industrie

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Programms zur Unterstützung kleiner und mittlerer Unternehmen bei der Umsetzung von Innovationen in den Bereichen Messen, Normen, Prüfen und Qualitätssicherung („MNPQ-Transfer“) wird die in der PTB entwickelte TMS-Messtechnik zur hochgenauen Messung der Topographie gekrümmter optischer Oberflächen zum Projektpartner TRIOPTICS GmbH transferiert. Im Rahmen dieser Kooperation werden Prototyp-Apparaturen entwickelt und getestet, die dann als kommerzielle Geräte zur Verfügung stehen werden. (H. Bremer, M. Schulz, FB 4.2, holger.bremer@ptb.de, michael.schulz@ptb.de)

**Breitbandige Entspiegelung von Kunststoffoptiken durch Nanostrukturierung**

Durch eine stochastische Nanostrukturierung der Oberfläche von Kunststoff-Optiken kann eine spektral breitbandige optische Entspiegelung erreicht werden. Eine theoretische Beschreibung dieses Effekts erfordert eine rigorose Modellierung der Wechselwirkung der optischen Strahlung mit den Oberflächenstrukturen. Es wurden Simulationen für stochastische 2D-Oberflächenstrukturen durchgeführt. Diese Rechnungen erlauben ein qualitatives Verständnis des Effekts und geben Hinweise für weitere Optimierungen. (E. Buhr, FB 4.2, [egbert.buhr@ptb.de](mailto:egbert.buhr@ptb.de)).

**Charakterisierung von Photolithographiemasken mit einer Scatterometrie im tiefen ultravioletten Spektralbereich (DUV)**

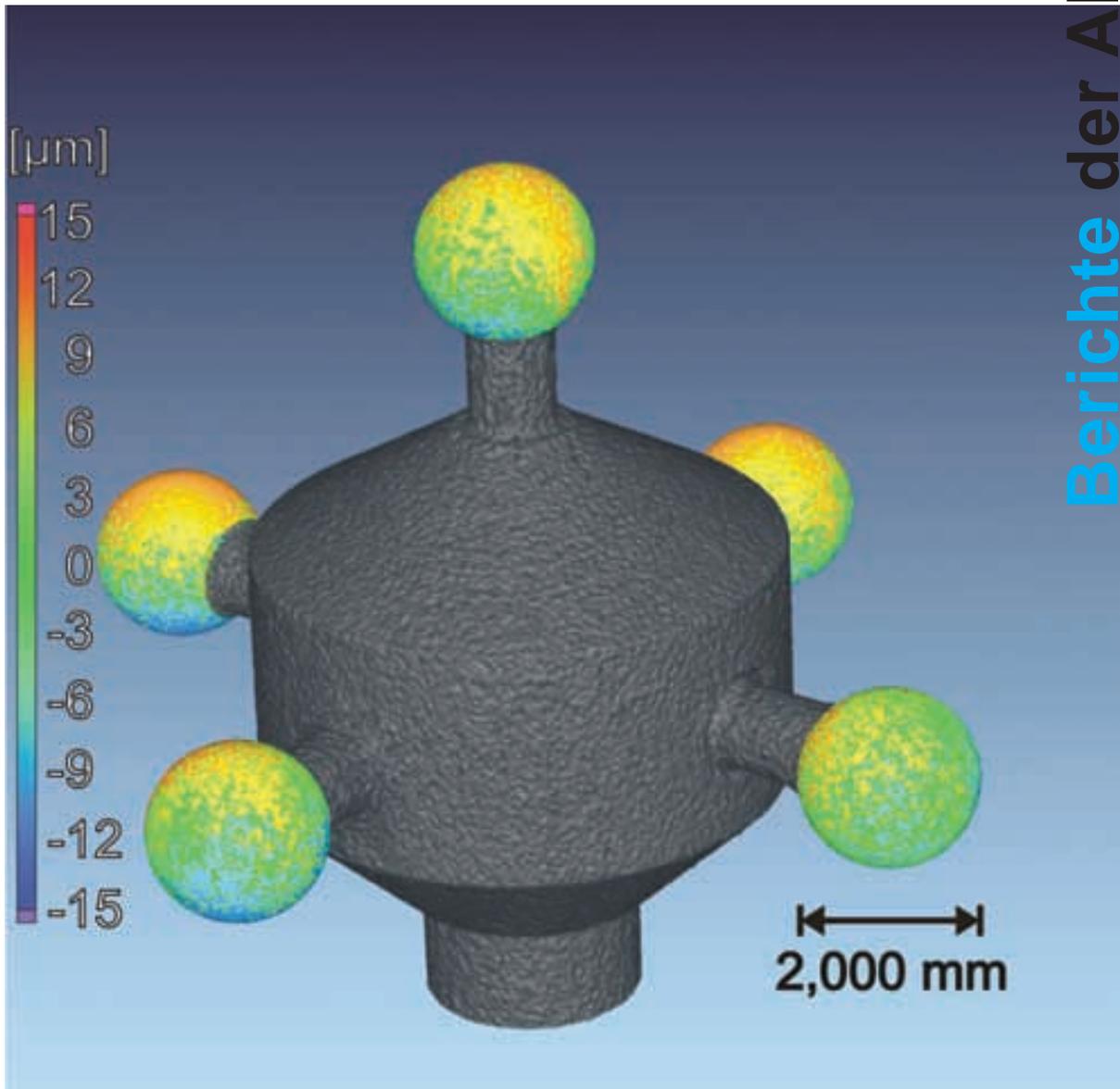
Bei der Auswertung scatterometrischer „at-wavelength“ Messungen an Photolithographiemasken für das extreme Ultraviolett (EUV) stellen Inhomogenitäten des Vielschichtsystems ein großes Problem dar. Dieses Problem lässt sich umgehen durch Verwendung einer Wellenlänge, welche sehr viel größer als die Periode des Vielschichtsystems ist. Anhand numerischer Simulationen konnte gezeigt werden, dass die DUV-Scatterometrie hervorragend geeignet ist, um die Absorberstrukturen von EUV-Masken quantitativ zu charakterisieren. (M. Wurm, FB 4.2, [matthias.wurm@PTB.de](mailto:matthias.wurm@PTB.de))

**Neuartiges Fokuskriterium zur Kantendetektion an Phasenobjekten**

Für mikroskopisch-optische Strukturbreitenbestimmung an Phasenstrukturen wurden verschiedene Fokuskriterien sowohl auf der Basis von rigorosen Simulationen als auch experimentell untersucht. Ein hierbei neu entwickeltes Fokuskriterium, das Peak-Distance-Kriterium, verbessert die Reproduzierbarkeit der Fokussierung und damit auch der Strukturbreitenmessung signifikant und ist nicht nur auf Phasenstrukturen beschränkt. (B. Bodermann, FB 4.2, [bernd.bodermann@ptb.de](mailto:bernd.bodermann@ptb.de))



# Fertigungs- messtechnik



Berichte der Abteilungen

*Abteilung*

5

# Fertigungs

## **Dimensionelle Metrologie in der PTB: Programm und Schwerpunktsetzung**

Die Messtechnik dimensioneller Größen ist für die Qualitätskontrolle in fast allen Bereichen industrieller Produktion von herausragender Bedeutung. Von der im nm-Bereich notwendigen Positions- und Überdeckungs-genauigkeit bei der lithografischen Herstellung von Integrierten Schaltkreisen über die geringen Fertigungstoleranzen mikrosystem-technischer Produkte bis zu den im Automobilbau oder auch im Flugzeugbau präzise zu fertigenden und zu montierenden komplexen Komponenten: in allen Bereichen steigen die Anforderungen an die dimensionelle Messtechnik. Die hiermit verbundenen Herausforderungen sind vielfältig.

Die Verringerung der Messunsicherheiten der zur Prozesskontrolle in der Fertigung verwendeten Messgeräte sowie der zur Rückführung der industriellen Messverfahren notwendigen Normale ist dabei an erster Stelle anzuführen. Dieser Anforderung ist nur durch ein tiefgehendes Verständnis des jeweiligen Messprozesses zu begegnen, die auch dessen weitgehende Modellierung mit einschließt. Für die effektive Lösung von Aufgaben der dimensionellen Messtechnik werden dazu die in verschiedenen Fachabteilungen der PTB vorhandenen Fachkenntnisse herangezogen und gebündelt. Als Beispiele für die abteilungsübergreifend in dem Programmthema

„dimensionelle Metrologie“ bearbeiteten Aufgaben seien hier die Volumenbestimmungen von Silizium-Kugeln im Rahmen des Avogadroprojektes (siehe Jahresbericht 2006) und die vergleichende Charakterisierung von Strukturen auf Masken für die Lithografie genannt. Die in der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* angewandten unterschiedlichen Messverfahren wie z. B. die Kugelinterferometrie, die Ellipsometrie sowie höchstauflösende Mikroskopieverfahren wie die Rasterelektronen- bzw. Rastersondenmikroskopie werden ergänzt durch Röntgenreflektometrie und Scatterometrie im EUV-Bereich im Radiometrielabor der Abteilung Temperatur und Synchrotronstrahlung der PTB bei BESSY in Berlin sowie durch hochauflösende optische Mikroskopie und Scatterometrie im DUV-Bereich in der Abteilung Optik.

Der andere Aspekt einer programmorientierten Vorgehensweise ist die mittel- bis langfristige strategische Ausrichtung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Sie orientiert sich am „European Metrology Research Programme“ einerseits und andererseits an den Schwerpunktsetzungen innerhalb der PTB im Rahmen des sog. „Konzept 2016“. In der dimensionellen Metrologie erfolgt eine Schwerpunktsetzung bei den metrologisch herausfordernden Themenbereichen der präzisen Charakterisierung kleinster Strukturen, komplexer großer Strukturen sowie von Oberflächen.

Im Weiteren wird auf zwei Entwicklungen eingegangen, die vor dem Hintergrund der Schwerpunktsetzung zu sehen sind.

Das erste Beispiel ist der Einsatz von Röntgen-Computertomographie-Messsystemen in der Fertigungsüberwachung. Wesentliches Ziel dieser Aktivitäten ist, die Rückführung solcher Messungen sicher zu stellen.

Titelbild  
Messabweichungen an einem 3D-Prüfkörper für  
die Computertomographie

# messtechnik

Des Weiteren wird über die Weiterentwicklung des eindimensionalen Vakuum-Längenkomparators berichtet (s. Nachricht des Jahres). Hierbei wird angestrebt, die messtechnische Leistungsfähigkeit des Nanometerkomparators zu steigern und diesen zu einem Referenzmessgerät für Position und Geradheit von Strukturteilungen mit angestrebten Messunsicherheiten im Sub-nm-Bereich auszubauen.

## Einsatz von Röntgen-Computertomographie (CT)-Messsystemen in der Fertigungsmesstechnik

Industrielle Computertomographie (CT) mit Röntgenstrahlung ermöglicht die vollständige und zerstörungsfreie Erfassung von inneren und äußeren Oberflächen technischer Objekte mit einer in der Messtechnik bisher unerreicht hohen Messpunktdichte. Der CT ist ein hohes Potenzial als Messtechnik für die Industrie zuzuschreiben; sie ist in der Roadmap „advanced manufacturing“ des europäischen EMRP-Programms enthalten und wurde auch in die mittel- bis langfristige strategische Ausrichtung in der dimensionellen Metrologie der PTB übernommen

CT wird seit längerem in der zerstörungsfreien Prüfung (z. B. bei der Lunkererkennung in Gussteilen) angewendet. Seit einigen Jahren ist bei der Industriellen CT eine starke Entwicklung hin zur dimensionellen Messtechnik festzustellen. Die industrielle CT wird hier als eine Messtechnik zur Geometriebestimmung technischer Bauteile, d. h. als Koordinatenmesstechnik, eingesetzt. Seit ca. zwei Jahren sind CT-Systeme in Kombination mit taktilen oder optischen Sensoren in Multi-sensor-Koordinatenmessgeräten (KMG) kommerziell erhältlich. Auch die Messung normgerechter Zeichnungseinträge kann somit inzwischen mit CT-Systemen durchgeführt werden.

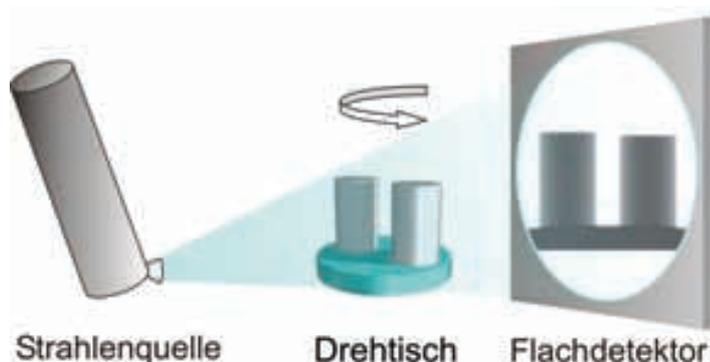


Bild 1: oben: Prinzip 3D-CT mit Kegelstrahl und Flachdetektor, unten: Prinzip 2D-CT mit Fächerstrahl und Zeilendetektor

Bei einer CT-Messung werden digitale Röntgenbilder (Projektionsbilder) des Messobjekts in verschiedenen Durchstrahlungsrichtungen erfasst und daraus die 3D-Geometrie des Messobjekts rekonstruiert. Bei den CT-Messsystemen wird zwischen 3D-Systemen mit Kegelstrahl und Flachdetektor und 2D-Systemen mit Fächerstrahl und Zeilendetektor unterschieden (Bild 1). Der Vorteil der 3D-CT gegenüber der 2D-CT liegt insbesondere in der schnelleren Erfassung des Messobjekts. Allerdings treten größere Messabweichungen auf.

Die Rückführung von CT-Messergebnissen hat heute noch nicht den hohen Stand erreicht wie bei klassischen KMG mit taktilen oder optischen Sensoren. Die PTB hat hier als weltweit erstes metrologisches Staatsinstitut im Jahre 2001 mit Untersuchungen zur Mess-

technik CT begonnen. In mehreren Projekten wurden in Zusammenarbeit mit der Industrie, Forschungsinstituten und der Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung (BAM) Prüfkörper zur Erfassung und Korrektur von Messabweichungen entwickelt. Der Schwerpunkt lag hierbei anfangs auf der Messung größerer Gussteile (z. B. Zylinderköpfe aus Aluminium). Hierbei wurden erhebliche Genauigkeitssteigerungen erreicht. Derzeit werden zusammen mit der BAM zwei Projekte zur Rückführung und Genauigkeitssteigerung von CT-Messungen an kleinen Bauteilen (z. B. Mikrozahnrädern) bearbeitet. Die Projekte werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert. Während das DFG-Projekt auf die Erarbeitung messtechnischer Grundlagen ausgerichtet ist, zielt das BMWi-geförderte Projekt insbesondere darauf ab, die CT zu einem Standardverfahren der Fertigungsmesstechnik zu entwickeln. Das Besondere an diesem Projekt ist, dass neun Industriepartner mit dabei sind, darunter die wichtigsten Hersteller industrieller CT-Messsysteme.

Im Oktober 2004 wurde in der Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) von VDI und VDE der Fachausschuss 3.33 „Computertomographie in der dimensionellen Messtechnik“ gegründet. Diese Gremienarbeit wurde von der PTB von Beginn an begleitet. Aktueller Diskussionspunkt ist die Definition von Kenngrößen für die CT, die, soweit möglich, auf den Normen und Richtlinien der „klassischen“ Koordinatenmesstechnik (DIN EN ISO 10360, VDI/VDE 2617) aufbauen sollen. Kenngrößen wie die Antastabweichungen für Maß und Form, die lokale Messabweichungen beschreiben sowie die Kenngröße Längenmessabweichung bzw. als Hilfsgröße die Kugelabstandsabweichung, die globale Messabweichungen erfassen, sollen dazu dienen, die Vergleichbarkeit von unterschiedlichen CT-Anlagen und klassischen KMG mit taktilen und optischen Sensoren zu gewährleisten. Darüber hinaus sind CT-spezifische Kenngrößen in Diskussion, die den Einfluss der Geometrie des Messobjekts auf Maß und Form insbesondere auch für Messungen von Innenstrukturen charakterisieren sollen. Die beschriebenen Kenngrößen und Verfahren geben Herstellern und

Anwendern Methoden an die Hand, Annahme- und Bestätigungsprüfungen sowie Überwachungsmaßnahmen von CT-Anlagen durchzuführen.

Die PTB hat hierzu Prüfkörper entwickelt und im Fachbereich Wissenschaftlicher Gerätebau gefertigt, die es neben der Bestimmung von Kenngrößen zusätzlich erlauben, spezifische Messabweichungen der CT-Systeme zu erfassen und zu korrigieren. Die Prüfkörper und -konzepte wurden dabei von 1D (Kugelstäbe) über 2D (Kugelplatte, Stufenzylinder, Rauheitsprüfkörper) auf 3D weiterentwickelt, um die Aussagekraft und die Wirtschaftlichkeit der Verfahren zu erhöhen. Dabei wurden gleichzeitig die Abmaße der Prüfkörper verringert, um auch in dem technologisch wichtigen Bereich der Mikromesstechnik Lösungen anbieten zu können. Als 3D-Prüfkörper geringer Größe wurde von der PTB ein Titan-Kugelkalottenwürfel (Kantenlänge 10 mm) aus dem in der Koordinatenmesstechnik akzeptierten Konzept der Kugelplatte entwickelt. Dieser 3D-Prüfkörper bietet den Vorteil eines höheren Informationsgehalts und trägt normativen Gesichtspunkten Rechnung. Er ist zudem nicht nur für die CT, sondern auch für KMG mit taktilen und optischen Sensoren geeignet (Bild 2).

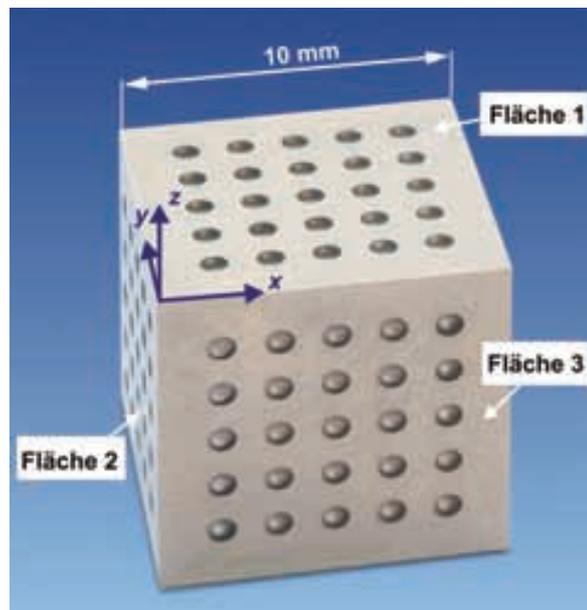


Bild 2: 3D-Prüfkörper (Kugelkalottenwürfel) aus Titan mit 75 senkerodierten Kalotten auf drei Seiten zur Bestimmung von Kenngrößen in Analogie zu Normen und Richtlinien der Koordinatenmesstechnik (DIN EN ISO 10360, VDI/VDE 2617)

Ein Prüfkörper dieses Typs wurde u. a. an der 3D-CT-Anlage der BAM gemessen (Voxelgröße 8,1  $\mu\text{m}$ , Beschleunigungsspannung 180 kV, Flachdetektor mit 2048 x 2048 Pixel). Weiterhin wurde der Prüfkörper taktil kalibriert (Tastelementdurchmesser 0,3 mm). Diese anspruchsvollen Messungen wurden von der PTB und einem DKD-akkreditierten Kalibrierlabor validiert und sind in Zukunft als Dienstleistung industriell verfügbar. Aus den CT-Messdaten konnten auf diese Weise erfolgreich die Antastabweichung (Maß: Radienabweichungen) der Kalotten (Bild 3) und die Kugelabstandsabweichungen (Bild 4) bestimmt werden. Die Messergebnisse zeigen, dass mit aktuellen CT-Systemen Kugelabstandsabweichungen in der Größenordnung der Voxelgröße (und darunter) erreicht werden können. Für die Radienabweichung können Werte kleiner als die halbe Voxelgröße erreicht werden. Der neuartige Prüfkörper bietet damit die Möglichkeit, schnell und wirtschaftlich industrielle Messsysteme mit unterschiedlichen Sensoren (incl. CT) zu prüfen und zu vergleichen. Die externe Ferti-

gung einer Kleinserie für Forschung und Industrie wird im Moment vorbereitet.

Der Fachbereich *Koordinatenmesstechnik* hat im März 2007 unter Mitwirkung der BAM, der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) und des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) ein PTB-Seminar zum Thema „Geometriebestimmung mit industrieller Computertomographie“ ausgerichtet. Zielsetzung des zweitägigen Seminars war es, den Nutzen dieser Messtechnik weiter bekannt zu machen und über aktuelle Entwicklungen zu berichten. Das hohe Interesse an der Veranstaltung (129 registrierte, externe Teilnehmer sowie ca. 40 Teilnehmer aus der PTB) und das positive Feedback haben gezeigt, dass es richtig war, dass sich die PTB frühzeitig mit der Industriellen CT als eine neue Koordinatenmesstechnik beschäftigt hat. Dabei hat sich speziell die Bündelung der Kompetenzen von PTB und BAM ausgezahlt. Die Beiträge des Seminars sind als PTB-Bericht F-54 in gedruckter Form erschienen.

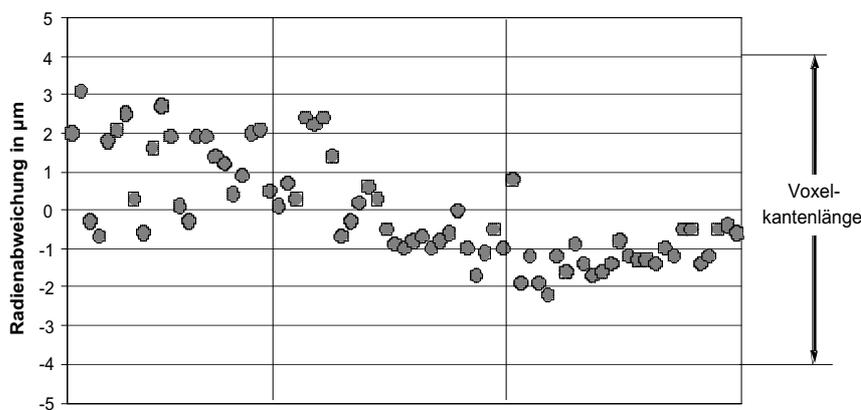


Bild 3: Gemessene Radienabweichungen der 75 Kalotten

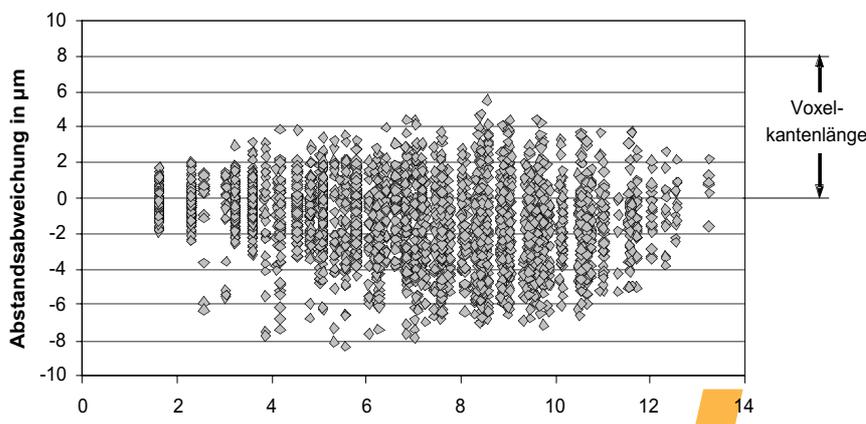


Bild 4: Gemessene 3D-Kugelabstandsabweichungen der 75 Kalotten (insgesamt 2775 Abstände)

### Weiterentwicklung des Nanometerkomparators als Referenzmessgerät für Länge und Geradheit mit angestrebten sub-nm Unsicherheiten

In bestimmten Bereichen industrieller Präzisionsfertigung werden heute Fertigungstoleranzen von nur noch wenigen Nanometern gefordert. Beispiele für derart eng tolerierte Komponenten sind die in Synchrotron-Speicherringen verwendeten Röntgenspiegel, bei denen geringste Formabweichungen, Welligkeiten und Rauheiten gefordert sind. Ähnlich hohe Anforderungen werden an die für die EUV-Lithographie verwendeten Multilag-Reflexionsspiegel und EUV-Masken gestellt. Bei der EUV-Lithographie werden die Maskenstrukturen auf den mit Photolack belegten Si-Wafer mit einer Wellenlänge von 13,5 nm unter Vakuumbedingungen verkleinert im Maßstab 1:4 abgebildet.

Für die kurz bevorstehende Volumen-Produktion von Halbleiter-Bauelementen mit kleinsten Strukturabmessungen von nur noch 45 nm wird allerdings noch das Verfahren der Transmissions-Lithographie mit einer Belichtungswellenlänge von 193 nm unter Anwendung von Wasserimmersion verwendet.

Eine zurzeit intensiv diskutierte Technologie zur Weiterführung der 193nm-Lithographie bis hin zur 32 nm-Technologiegeneration ist das so genannte Doppelbelichtungsverfahren.

Hierbei werden die hinsichtlich Auflösung der kleinsten Strukturen kritischen Struktur-lagen in 2 getrennten Belichtungs- und Prozessschritten im Photolack strukturiert. Die Strukturinformationen werden dabei von 2 Masken verkörpert, die zueinander komplementär sind, d. h. im Schaltungsdesign direkt benachbarte Strukturelemente werden auf beide Masken verteilt. Auf diese Weise werden die Strukturabstände auf den beiden komplementären Masken vergrößert und können so mit gutem Kontrast im Photolack abgebildet werden.

Eine entscheidende Voraussetzung für die Realisierung und die Qualität der Doppelbelichtungs-Lithographieverfahren ist allerdings eine sehr gute Positions- und Überdeckungsmesstechnik, sowohl für Wafer als auch Masken. Die Lageabweichungen der Strukturen auf den einzelnen Masken sowie insbesondere auf den beiden komplementären Masken zueinander sowie die Überdeckung der belichteten und prozessierten Strukturen auf dem Wafer sind künftig mit Genauigkeiten im Sub-nm-Bereich messtechnisch zu erfassen und auch fertigungstechnisch zu kontrollieren.

Zur messtechnischen Rückführung industrieller Längen- und Koordinatenmessungen an strukturierten Masken und Wafern mit den genannten Präzisionsanforderungen wurde die zielgerichtete Weiterentwicklung des

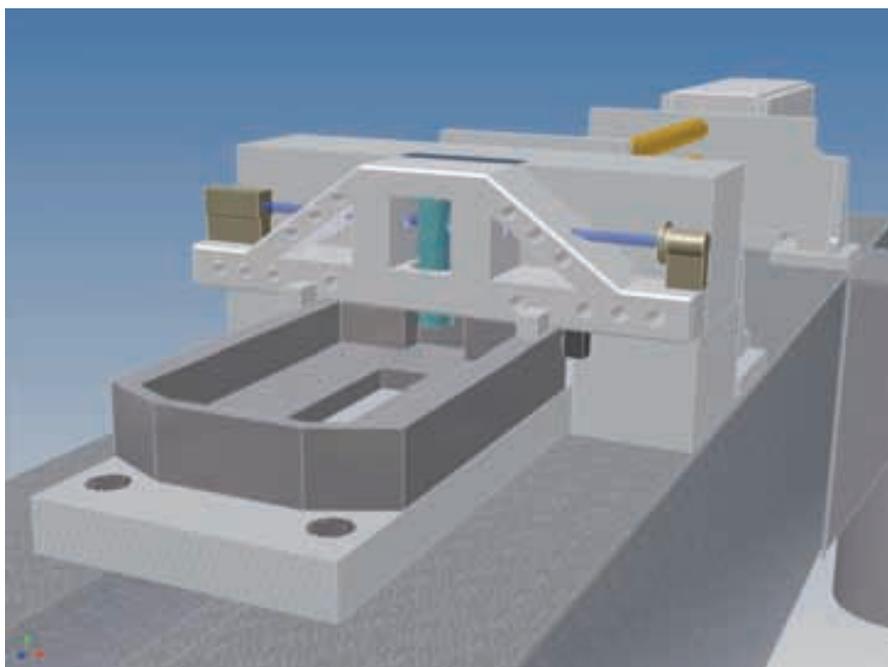


Bild 5: Prinzipskizze des zu einem Referenzmessgerät für Länge und Geradheit an strukturierten Messobjekten weiter zu entwickelnden Nanometerkomparators. Schematisch gezeigt sind eine mögliche Ausführungsform des neuen Messschlittens mit Geradheitsreferenzen, die Interferometersysteme in y- und z-Richtung sowie das DUV-Mikroskop mit Beleuchtungs- und CCD-Kamerasystem.

Vakuum-Längenkomparators der PTB, des Nanometerkomparators, zu einem Referenzkomparator für Länge und Geradheit begonnen (Bild 5). Hierzu wird der Nanometerkomparator mit einer neuen Messobjektaufnahme und einem zusätzlichen Interferometersystem ausgestattet, die eine hoch genaue Erfassung der Geradheitsabweichungen des Messschlittens und damit auch der Geradheitsabweichung von Teilungsspuren auf den Messobjekten erlauben. Eine weitere wesentliche Komponente der vorbereiteten Entwicklung des Nanometerkomparators zu einem 1,5D-Referenzkomparator stellt die Integration eines hoch auflösenden optischen Antastsystems basierend auf einem im tiefen UV messenden CCD-Mikroskop dar. Die Integration der neuen messtechnischen Komponenten in Kombination mit neuen Auswerteverfahren wird Referenz-Messungen von Längen und Geradheiten an strukturierten Messobjekten mit Sub-nm-Messunsicherheiten erlauben. Diese Kalibrierobjekte bilden dann die Basis für hoch genaue Messungen von Längen- und Koordinatenabweichungen an industriell gefertigten Masken und Wafern und die Arbeiten der PTB unterstützen so die Einführung der Doppelbelichtungsverfahren in der Lithographie.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Erste Rauschmessung an einer Prototyp-Messeinrichtung zur Realisierung eines Nanonewton-Kraftnormals

An der Prototyp-Messeinrichtung zur Realisierung eines Nanonewtonkraftnormals wurden erste Testmessungen an Luft durchgeführt. Rauschmessungen an beiden Scheibenpendeln ergaben über einen Zeitraum von 40 h Rauschpegel von nur 3 pN ( $\sigma$ : Standardabweichung, Tiefpassfilter  $10^{-2}$  Hz). Damit wurde der Nachweis der Eignung des gewählten elektrostatischen Messprinzips für Kraftmessungen im Pikonewtonbereich erbracht. (V. Nesterov, FB 5.1, [vladimir.nesterov@ptb.de](mailto:vladimir.nesterov@ptb.de))

#### *In-situ*-Bestimmung von Abbe-Fehlern sowie deren Korrektur am Nanometerkomparator

Die am Nanometerkomparator realisierte Kombination von Vakuum-Winkelinterferometern mit in den Luftlagererelementen des Präzisions-Messschlittens integrierten Piezostellelementen erlaubt erstmals die *In-situ*-Bestimmung und Kompensation von Abbe-Fehlern; verbleibende Längenmessabweichungen liegen im Sub-nm-Bereich. (R. Köning, FB 5.2, [rainer.koenig@ptb.de](mailto:rainer.koenig@ptb.de))

#### Messung der Linienbreite von Sub-100-nm-Trapezstrukturen

Mit dem Elektronenoptischen Metrologiesystem wurden Messungen der Strukturbreiten an Sub-100nm-Si-Trapezstrukturen ausgeführt. Die zur Bestimmung der Strukturbreiten entwickelten Kantenalgorithmen stützen sich auf Monte-Carlo-Simulationen des Signalkontrastes. (C.G. Frase, FB 5.2, [carl.g.frase@ptb.de](mailto:carl.g.frase@ptb.de))

#### Umschlagverfahren mit einem zweiachsigen Piezo-Kippsystem zur Untersuchung von elektronischen Autokollimatoren

Ein in der PTB entwickeltes Messverfahren zur Bestimmung des nichtlinearen axialen Übersprechens bei der Winkelmessung mit zweiachsigen Autokollimatoren wurde unter optimierten Umgebungsbedingungen erprobt. Das Verfahren beruht auf der Fehler-trennung durch Umschlagverfahren unter Einsatz eines zweiachsigen Piezo-Kippsystems. (A. Just, FB 5.2, [andreas.just@ptb.de](mailto:andreas.just@ptb.de))

#### Verfahren zur Auswertung der Durchmesser-topographien bei der Volumensmessung der Siliziumkugeln zur Neubestimmung der Avogadrokonstanten

Eine zentrale Teilaufgabe im internationalen Projekt zur Neubestimmung der Avogadrokonstanten ist die Messung des Volumens der in Australien hergestellten Silizium-Einkristall-Kugeln. Hierzu wurde jetzt ein neues Auswerteverfahren entwickelt, welches die Bestimmung des mittleren Kugeldurchmessers aus den Messdaten des Kugelinterferometers der PTB mit Unsicherheiten im Subnanometerbereich erlaubt. (G. Bartl, FB 5.4, [guido.bartl@ptb.de](mailto:guido.bartl@ptb.de))

#### Messung der Dispersion von Luft mittels 2-Farben-Interferometrie

Untersuchungen zur Kompensation des Brechungsindex der Luft am 50-m-Komparator zeigten systematische Abweichungen in der Längenmessung. Als Ursache konnte eine Abweichung von ca.  $8 \cdot 10^{-9}$  im Dispersions-term der Edlen-Gleichung ermittelt werden. (K. Meiners-Hagen, FB 5.4, [karl.meiners-hagen@ptb.de](mailto:karl.meiners-hagen@ptb.de))

#### Auslegung und Konstruktion eines Planplatten-Messgehäuses

Im Rahmen des EUROMET-Projektes 672 (Vergleich hochgenauer Planflächenmessungen) wird ein Transport- und Messgehäuse benötigt, das die zu messende Zerodur-Planfläche während des Transportes und der Messung aufnimmt und schützt. Für die optimale Auslegung der Unterstützungspunkte der Messplatte wurde die FEM-Methode angewendet. (H. Drösemeyer, FB 5.5, [holger.droesemeyer@ptb.de](mailto:holger.droesemeyer@ptb.de))

## Metrologie für die Wirtschaft

### 3D-Mikrotaster-Kalibriereinrichtung zur Bestimmung von Antastabweichungen

Eine 3D-Mikrotaster-Kalibriereinrichtung mit einem Grob- und Feinpositionierbereich von 25 mm x 25 mm x 12,5 mm bzw. 80 µm x 80 µm x 80 µm und laserinterferometrischer Positionsmessung wurde aufgebaut. Mit dieser Einrichtung wurden 1D- und 2D-Antastabweichungen eines optimierten 3D-Mikrotasters von 16 nm bzw. 76 nm gemessen. (S. Bütefisch, FB 5.1, sebastian.buetefisch@ptb.de)

### Normalmesseinrichtung für die Kalibrierung der Leeb-Härte

Bei der mobilen Härteprüfung ist die Härte nach Leeb von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Hierzu wurde in der PTB eine Normalmesseinrichtung zur Kalibrierung von Härtevergleichsplatten für die beiden LEEB-Härteskalen HLD und HLG in Betrieb genommen. Die erreichbare Messunsicherheit beträgt 3 %. (K. Herrmann, FB 5.1, konrad.herrmann@ptb.de)

### Chirp-Normal zur effizienten Bestimmung der Übertragungsfunktion von optischen Topographie-Messgeräten

Ein Chirp-Normal mit sinusartigen Strukturen und abgestuften Wellenlängen im Bereich von 10 µm bis 91 µm sowie einer Amplitude von  $P_t = 1$  µm wurde mittels Ultrapräzisionsbearbeitung hergestellt. Hiermit lässt sich die untere Grenzwellenlänge der Übertragungsfunktion von optischen Mikroskopen schnell bestimmen. (R. Krüger-Sehm, FB 5.1, rolf.krueger-sehm@ptb.de)

### Kalibrierung von Strichmaßstäben mit Messunsicherheiten von unter 5 nm

Durch Optimierung der Beleuchtung und der Justage des Mikroskops für die optische Strichantastung am Nanometerkomparator werden nunmehr an qualitativ hochwertigen 300-mm-Strichmaßstäben Messunsicherheiten von unter 5 nm erreicht. (R. Köning, FB 5.2, rainer.koenig@ptb.de)

### Photomasken für die 65-nm-Technologiegeneration kalibriert

Die fortschreitende Miniaturisierung bei der lithographischen Herstellung integrierter Schaltkreise zieht steigende Anforderungen an die dimensionelle Charakterisierung der Strukturen auf den als Vorlage verwendeten Photomasken nach sich. Es wurden jetzt erstmals die Breiten von Sub-100-nm-Strukturen auf Normalen eines Maskenherstellers elektronenmikroskopisch kalibriert. (W. Häßler-Grohne, FB 5.2, wolfgang.haessler-grohne@ptb.de)

### Kalibrierung von Mikroprüfkörpern mit großen taktilen KMG

Mikroprüfkörper mit komplexer Geometrie sind für die Rückführung von Mikro-CT-Messungen unverzichtbar, entsprechende Kalibrierangebote stehen im Deutschen Kalibrierdienst (DKD) zur Zeit aber nur für große Koordinatenmessgeräte (KMG) zur Verfügung. Gemeinsam mit einem DKD-Kalibrierlaboratorium wurden daher an einem in der PTB entwickelten Mikro-CT-Prüfkörper Untersuchungen durchgeführt, die gezeigt haben, dass mit einem großen KMG unter Einsatz sehr kleiner Tastkugeln und geringen Antastkräften Messunsicherheiten von kleiner 1 µm realisiert werden können. (M. Neugebauer, FB 5.3, michael.neugebauer@ptb.de)

### Erweiterung des taktil-optischen Messtasters in die dritte Dimension

Der in der PTB entwickelte taktil-optische Mikrotaster für die Koordinatenmesstechnik wird in Industrie und Forschung verbreitet für die Messung kleiner Strukturen eingesetzt. Bisher ist er aber auf die Messung in zwei Dimensionen beschränkt. Die PTB hat nun gemeinsam mit einem deutschen Messgerätehersteller erfolgreich ein Verfahren entwickelt, das diese Begrenzung überwindet und eine Empfindlichkeit des Systems zusätzlich in Richtung der optischen Achse realisiert. (M. Wissmann, FB 5.3, mark.wissmann@ptb.de)

### **Kompensation der wellenlängenabhängigen Bildverschiebung bei der abbildenden optischen Interferometrie**

Im Zusammenhang mit dem Neuaufbau des Ultrapräzisionsinterferometers wurde der Effekt der wellenlängenabhängigen Bildverschiebung und dessen Kompensation quantitativ analysiert. Ausgehend von der gegebenen Geometrie konnte eine Anordnung gefunden werden, in der die Wellenlängenabhängigkeit der Bildposition nahezu verschwindet. (R. Schödel, FB 5.4, rene.schoedel@ptb.de)

### **Konstruktion und Fertigung des neuen DUV-Scatterometers der PTB**

In enger Zusammenarbeit mit dem Fachbereich 4.2 „Bild- und Wellenoptik“ wurde ein neuartiges Scatterometer entwickelt, das die Metrologie an Photolithographiemasken aktueller und kommender Technologiegenerationen ermöglicht. Mit dem System sind Messungen sowohl im Transmissions- als auch im Reflexionsverfahren möglich. (F. Pilarski, FB 5.5, frank.pilarski@ptb.de)

### **Entwicklung gesputterter Dünnschichtsensoren für die Metrologie**

Im Rahmen eines DFG-Vorhabens zur Erforschung von gesputterten Dehnungsmessstreifen wurde ein neuartiges Verfahren zur Strukturierung von Dünnschicht-Sensoren auf nicht-ebenen, metallischen Substraten entwickelt. (D. Hagedorn, FB 5.5, daniel.hagedorn@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Messung von Kräften an lebenden Zellen**

Glaspipetten, die in der Medizintechnik für Messungen an Muskelzellen eingesetzt werden, wurden an einem Mikrokräfttransfernormal kalibriert. Mit Hilfe des Normals ist eine genauere Bestimmung der Biegesteifigkeit möglich, so dass Kraftmessungen an einzelnen Muskelzellen mit Messunsicherheiten im Nanonewtonbereich möglich sind. (L. Döring, FB 5.1, lutz.doering@ptb.de)

### **Preis für den besten „Nano-Film“ an Wissenschaftler der PTB verliehen**

Der Kurzfilm „Dimensionen“ von Dr. Hans U. Danzebrink (PTB) wurde als bester „Nano-Film“ im Rahmen eines Wettbewerbes um die besten Bilder, Animationen und Filme aus dem Bereich der Nanowissenschaften ausgezeichnet. Der Preis wurde im Rahmen einer Veranstaltung im Deutschen Museum durch die Staatssekretärin im Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie überreicht. (H.-U. Danzebrink, FB 5.1, hans-ulrich.danzebrink@ptb.de)

### **Zulassung von Messgeräten in der Logistikbranche**

Der Ausbau der Logistikbranche fordert immer schnellere und genauere Messgeräte für die Identifikation und Messung unterschiedlicher Transportgüter, von Briefen bis zur Europalette. Eine wesentliche Neuerung dieser Messgeräte, welche erstmalig durch die PTB zertifiziert wurden, ist eine Messeinrichtung, die es ermöglicht, Pakete auf Sorterschalen oder Quergurtt Förderern zu messen. (I. Lohse, FB 5.4, ingo.lohse@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

#### **Bilateraler Maßvergleich von 50-nm- und 100-nm-Gittern**

Der bilaterale Maßvergleich von eindimensionalen Gittern mit 50 nm und 100 nm Periodenlänge zwischen dem japanischen Staatsinstitut (NMIJ) und der PTB ergab eine ausgezeichnete Übereinstimmung. Die mittels Rastersondenmikroskopen gemessenen Abweichungen der mittleren Gitterperioden waren dabei kleiner als 30 pm. (G. Dai, FB 5.1, gaoliang.dai@ptb.de)

#### **Preis für Nano-Metrologen der PTB: Thorsten Dziomba gewinnt ersten Preis bei europäisch-asiatischem Wettbewerb**

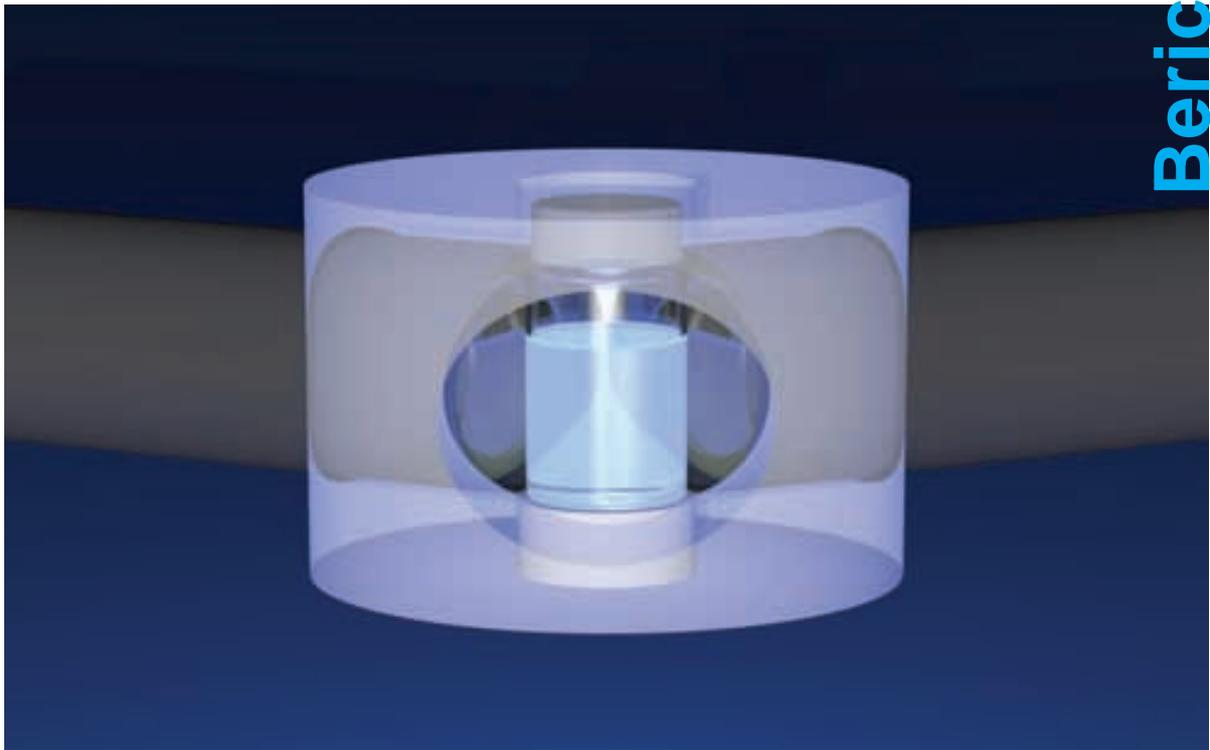
Thorsten Dziomba, ein junger wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich 5.1 *Nano- und Mikrometrologie*, wurde der Titel „The Best Young Metrologist of COOMET“ verliehen. Sein Vortrag überzeugte die hochrangige Jury, in der u. a. die Präsidenten mehrerer metrologischer Staatsinstitute aus dem COOMET vertreten waren. (T. Dziomba, FB 5.1, thorsten.dziomba@ptb.de)

### Internationale Vergleichsmessung an Winkelnormalen

Bei der internationalen Vergleichsmessung CCL-K3 an einem Spiegelpolygon und 4 Winkelendmaßen waren die Messergebnisse der PTB in guter Übereinstimmung mit den Referenzwerten. Für das Spiegelpolygon hat die PTB mit  $U_{k=2} = 0,03''$  die geringste Messunsicherheit aller 13 teilnehmenden Metrologieinstitute angegeben. (H. Bosse, FB 5.2, harald.bosse@ptb.de)



# Ionisierende Strahlung



# Ionisierende

Die Arbeiten zum Thema ionisierende Strahlung umfassen mit ihrem komplexen Tätigkeitsspektrum alle Geschäftsbereiche der PTB, die Grundlagen der Metrologie, die Metrologie für die Wirtschaft, für die Gesellschaft und die internationalen Angelegenheiten. Zu den Basisaufgaben gehören die Darstellung und die Weitergabe der SI-Einheiten der Aktivität, der Teilchenfluenz, der Luftkerma, der Energiedosis und der Äquivalentdosis. Für diesen Zweck werden Primär- und Transfornormale entwickelt und bereitgestellt, welche die heutigen und die für die Zukunft absehbaren Anforderungen erfüllen. Dafür stehen aufwendige Einrichtungen zur Erzeugung von Referenzstrahlungsfeldern mit zum Teil einzigartigen Feldeigenschaften zur Verfügung. Zu diesen wird auch die neue Elektronenbeschleuniger-Anlage gehören, deren Aufbau gerade der Vollendung entgegen geht (siehe Nachrichten des Jahres).

## **Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte**

Der Erhalt bzw. die Wiederherstellung der Gesundheit der Bürger ist ein elementares Bedürfnis der Gesellschaft. Deshalb hat die Dosimetrie der ionisierenden Strahlung und die Entwicklung von Normalen und Normalmesseinrichtungen für die medizinische Diagnostik und Therapiekontrolle, aber auch für den Strahlenschutz, eine besondere gesellschaftliche Bedeutung. Die Untersuchung der Wirkung ionisierender Strahlung im Gesundheitsbereich ist eines der zukunftsweisenden Themen mit neuen Forschungsschwerpunkten, für die sich die Abteilung verstärkt engagiert.

### **Titelbild**

Simulation der Eigenschaften eines Flüssigszintillations-Spektrometers nach der TDCR-Methode: Blick in die optische Kammer mit eingesetzter radioaktiver Probe.

Mit der Anwendung neuer technischer Entwicklungen und Methoden in der Strahlentherapie, wie z. B. „der Intensity Modulated Radiation Therapy“ (IMRT) oder der Tomotherapie, kann eine verbesserte Übereinstimmung der Dosisverteilung im Körper mit der Ausdehnung des Tumors (Tumorkonformität) und damit eine Verbesserung der Therapieerfolgsquote erreicht werden. Durch eine Überlagerung einer Vielzahl kleiner Strahlungsfelder wird bei diesen Bestrahlungsmethoden die Dosisverteilung im Tumor optimiert, wobei gleichzeitig schädliche Nebenwirkungen (z.B. durch die Bestrahlung von Risikoorganen) minimiert werden.

Die modernen Bestrahlungsmethoden mit kleinen Feldern und starken Dosisgradienten stellen große Herausforderungen an die Dosimetrie. Dass hier ein hoher Forschungsbedarf besteht, zeigen unter anderem die Pläne für das „European Metrology Research Programme“ (EMRP), in dem die Entwicklung dosimetrischer Methoden und geeigneter Normale für moderne Bestrahlungsmethoden als wichtiges Ziel im Rahmen des 7. EU-Forschungsprogramms formuliert ist. Dieser international als besonders wichtig eingestufte Themenbereich wird bereits vor der Entscheidung über das EMRP im Rahmen des ERA-NET-Plus-Programms durch die Europäische Kommission gefördert.

Die in der PTB verfügbaren Referenzfelder für Neutronenstrahlen bieten ausgezeichnete messtechnische Voraussetzungen für die vollständige Charakterisierung des Ansprechvermögens von Neutronenspektrometern. Mit einem solchen Spektrometer auf der Basis des organischen Szintillators NE213, das in der PTB zusammen mit dafür notwendigen optimierten Verfahren der Datenanalyse entwickelt worden ist, konnte eine Reihe von Messungen am Joint European Torus (JET) durchgeführt werden. Für die Anwendung der Neutronenspektrometrie zur Diagnostik

# e Strahlung

an Fusionsplasmen sind spezielle optimierte Verfahren der Datenanalyse entscheidend, mit deren Hilfe die benötigte Information über relevante Parameter des Fusionsplasmas extrahiert werden können. Zu diesem Zweck wurden Bayessche Methoden und Entfaltungsverfahren nach dem Maximum-Entropie-Prinzip miteinander kombiniert. Dieses zweistufige Verfahren erlaubt eine optimierte Datenanalyse, die genau auf die konkrete Information angepasst werden kann, die aus der Messung abgeleitet werden soll. Zur Verdeutlichung dieser Methoden wurden Messungen an der Beschleunigeranlage der PTB unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt und analysiert. Bild 1 zeigt einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Neutronenspektren für zwei Bestrahlungsbedingungen. Für die Analyse dieser Daten wurde ein kürzlich entwickeltes Verfahren verwendet, das eine Entfaltung nach der Maximum-Entropie-Methode mit der Bestimmung eines optimalen Parameters zur Festlegung der Güte des Lösungsspektrums kombiniert. Die sehr gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und den mit dem Entfaltungsverfahren bestimmten Spektren demonstriert sowohl die hohe Güte der verwendeten Antwortfunktionen des Neutronendetektors als auch die hervorragende Qualität der Datenanalyse, die bei vernachlässigbarer statistischer Unsicherheit in den Messungen erreicht werden kann.

In den Fällen, in denen die statistische Unsicherheit der Messungen nicht vernachlässigt werden kann, ist es jedoch erforderlich, die Methode der Maximum-Entropie-Entfaltung mit Bayesschen Verfahren zu vervollständigen. Eine konkrete Anwendung von Bayesschen Methoden ist die in Bild 2 gezeigte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Halbwertsbreite eines nahezu monoenergetischen Neutronenspektrums für vier Messungen mit ähnlicher Messzeit und statistischer Unsicherheit. Ein guter Schätzwert für die Halbwerts-

breite ergibt sich aus dem Maximum der Wahrscheinlichkeitsverteilung. Die diesem Wert zugeordnete Unsicherheit kann aus der Breite der Wahrscheinlichkeitsverteilung abgeleitet werden. Die interne Konsistenz der Datenauswertung zeigt, dass die Analyse einer einzelnen Messung mit Bayesschen Verfahren ausreicht, um die Halbwertsbreite und deren zugehörige Unsicherheit zu bestimmen.

Die Neutronenspektrometrie zur Plasma-diagnostik stellt einen weiteren Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die nächsten Jahre dar, mit dem die PTB einen wichtigen Beitrag zu den metrologischen Grundlagen für die nächste Generation von Fusionsreaktoren (ITER) leisten kann.

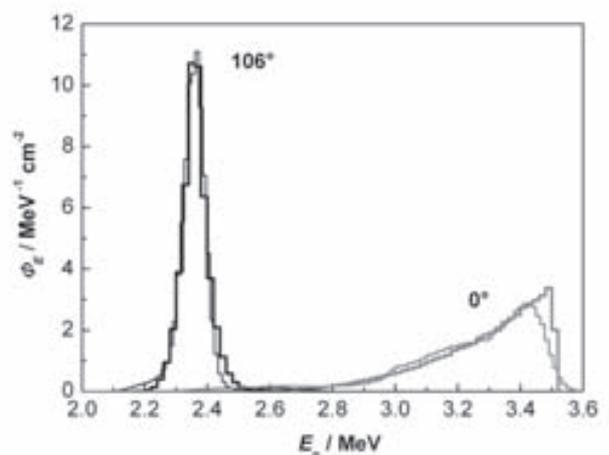


Bild 1: Berechnete (dünne Linie) und gemessene (dicke Linie) spektrale Fluenz für ein mit der Reaktion erzeugtes Neutronenspektrum für verschiedene Positionen des Neutronendetektors (Winkel der Neutronenemission relativ zum Deuteronenstrahl von  $106^\circ$  bzw.  $0^\circ$ ).

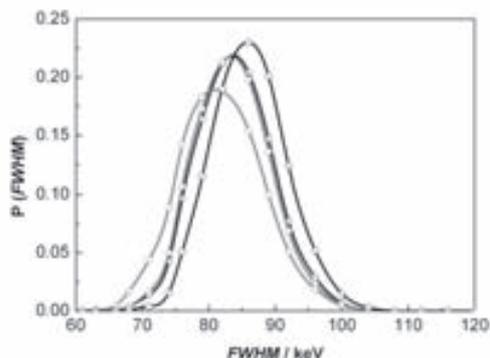


Bild 2: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Halbwertsbreite (FWHM) eines nahezu monoenergetischen Neutronenspektrums mit einer Neutronenenergie von etwa 2,5 MeV (siehe Bild 1) als Ergebnis einer Bayesschen Parameterbestimmung für ein gaussförmiges Modell des Neutronenspektrums.

### Zur Wirkung ionisierender Strahlung in nanometrischen Volumina

In Deutschland erkranken jährlich etwa 400 000 Menschen an Krebs. Von diesen wird etwa die Hälfte strahlentherapeutisch behandelt. Nach der Chirurgie ist die Strahlentherapie damit die am häufigsten eingesetzte Therapieform. Sie wird zur Zeit überwiegend mit hochenergetischen Photonen durchgeführt, ist aber auch bei lokalisierten und potentiell heilbaren Tumoren nicht immer erfolgreich. Eine Möglichkeit, die Strahlentherapie bei bestimmten Tumorarten deutlich zu verbessern, liegt in der Bestrahlung mit Hadronen (z. B. Protonen, leichten Ionen oder Neutronen), die eine zum Teil deutlich größere strahlenbiologische Wirksamkeit aufweisen als konventionelle Photonenstrahlung. Verantwortlich hierfür ist die Spurstruktur von Hadronen, die einen großen Anteil an Ionisationsereignissen aufweist, deren Abstände im Nanometerbereich liegen und durch die Erzeugung irreparabler Mehrfachstrangbrüche in der DNA die Abtötung von Zellen bewirken. Der Einfluss der Spurstruktur auf die strahlentherapeutische Effektivität einer ionisierenden Strahlung wird bisher bei der Festlegung der Energiedosis, die während der Therapie im Tumorumfang appliziert werden muss, mit semi-empirischen Modellen berücksichtigt. Da die Energiedosis als makroskopisch definierte Größe aber nicht in der Lage ist, Aussagen über die Spurstruktur einer ionisierenden

Strahlung zu machen, steht die Metrologie ionisierender Strahlung vor der Herausforderung, die Energiedosis durch eine Größe zu ersetzen oder zumindest zu ergänzen, mit der die Spurstruktur ionisierender Teilchen unter Berücksichtigung der Eigenschaften strahlungsempfindlicher biologischer Strukturen messtechnisch erfasst werden kann. Eine viel versprechende Methode hierfür besteht in der Messung der Häufigkeitsverteilung von Ionisationsclustern, die durch ionisierende Teilchen in nanometrischen Volumina erzeugt werden (Nanodosimetrie). Grundlage hierfür ist die Annahme, dass zur Auslösung von DNA-Doppelstrangbrüchen mindestens zwei Ionisationsereignisse notwendig sind und daher die Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung von Ionisationsclustern eng mit einer Schädigung der DNA verknüpft ist.

Um diese Aussage zu erhärten, wurde die Erzeugung von Ionisationsclustern durch Protonen,  $^4\text{He}$ -,  $^7\text{Li}$ -,  $^{12}\text{C}$ - und  $^{20}\text{Ne}$ -Ionen in Wasser (als Ersatz für biologisches Gewebe) mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode simuliert und mit strahlenbiologischen Daten korreliert. Als Zielvolumen diente ein Wasserzylinder von der Größe eines DNA-Segments aus 10 Basenpaaren (Durchmesser 2,3 nm; Höhe 3,4 nm). Die sich aus den Simulationsrechnungen ergebende Häufigkeit  $F_2$  für das Auftreten von mindestens zwei Ionisationsereignissen wurde dann mit gemessenen strahlenbiologischen Wirkungsquerschnitten  $\sigma_{\text{DSB}}$  zur Erzeugung von SV40-DNA-Doppelstrangbrüchen verglichen (siehe Bild 3). Die starke Korrelation der Ionisationscluster-Häufigkeit mit den strahlenbiologischen Wirkungsquerschnitten ist eindeutig und zeigt den großen Wert nanodosimetrischer Größen im Hinblick auf die Charakterisierung der Strahlenqualitäten leichter Ionen.

### Dosismittlung ionisierender Strahlung bei helfenden Personen und bei Grenzkontrollen

Im Rahmen des vom BMU geförderten Forschungsvorhabens „Dosismittlung bei der Anwendung von Röntgenstrahlung in der medizinischen Heilkunde, zahnmedizinischen Heilkunde, Tierheilkunde und bei Grenzkontrollen mit ionisierender Strahlung“

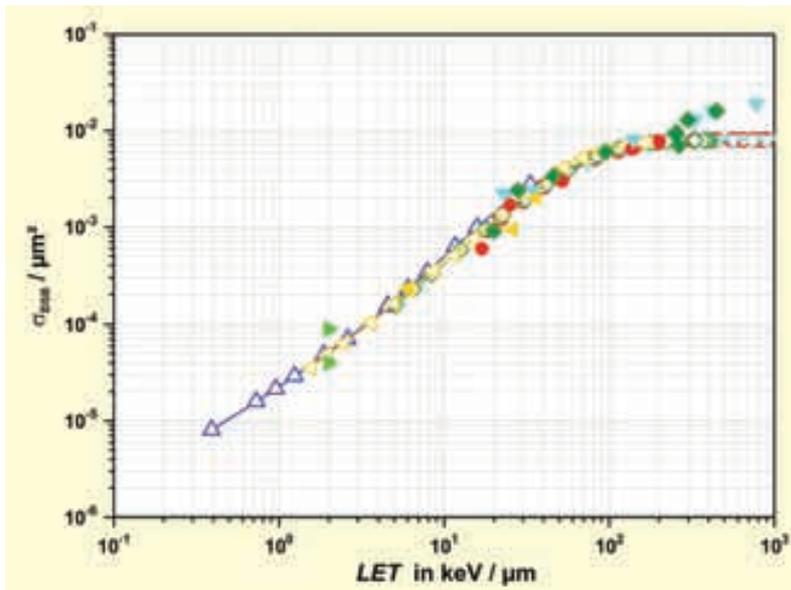


Bild 3: Strahlenbiologischer Wirkungsquerschnitt  $\sigma_{\text{DSB}}$  zur Erzeugung von Doppelstrangbrüchen in SV40-DNA durch ionisierende Strahlung unterschiedlicher Qualität in Anhängigkeit vom LET der Primärstrahlung. Experimentelle Daten von Taucher-Scholz und Kraft (1999): (▶) 250 kV Röntgenstrahlung, (◀)  $^4\text{He}$ -Ionen, (●)  $^{12}\text{C}$ -Ionen, (◆)  $^{16}\text{O}$ -Ionen und (▼)  $^{20}\text{Ne}$ -Ionen; Ionisationscluster-Häufigkeit F2 bei einem LET von 202 keV/μm auf den gemessenen Wirkungsquerschnitt für  $^{12}\text{C}$ -Ionen normiert: (△) Protonen, (◁)  $^4\text{He}$ -Ionen, (◇)  $^7\text{Li}$ -Ionen, (○)  $^{12}\text{C}$ -Ionen und (▽)  $^{20}\text{Ne}$ -Ionen.

wurden rückführbare Dosis-Messungen in den gültigen Strahlenschutzmessgrößen, Tiefen-Personendosis  $H_p(10)$  und Umgebungs-Äquivalentdosis  $H^*(10)$  durchgeführt. Die Federführung für das über 36 Monate laufende Vorhaben lag bei der PTB, die Kooperationspartner waren der TÜV Nord Röntgentechnik und das Krankenhaus St. Georg, Hamburg.

Ein Ziel des Vorhabens war es, die Körperdosis für helfende Personen bei Standarduntersuchungen mit Röntgenstrahlung in der Human-, Zahn- und Tierheilkunde zu ermitteln. Die häufigsten Expositionsszenarien wurden durch intensive Gespräche mit Ärzten und Sachverständigen und durch Hospitationen in Kliniken ermittelt. Hierbei stellte sich heraus, dass helfende Personen überwiegend im Bereich der Orthopädie zur Beruhigung von Kindern, behinderten oder dementen Patienten eingesetzt werden.

Bild 4: Typische Situation für eine helfende Person während einer radiologischen Becken-Untersuchung in der Kinder-Orthopädie.



Anwesenheiten von helfenden Personen in der Zahnmedizin sind hingegen sehr selten. Bei tierärztlichen Röntgenaufnahmen werden helfende Personen sowohl zur Beruhigung der Tiere als auch zur Unterstützung der Tierärzte benötigt.

Um bei den Messungen auch den Fall von nicht getragener Schutzkleidung zu erfassen, wurden die Dosimeter oberhalb der Bleischürze befestigt (siehe Bild 4). Die so gemessenen Dosiswerte für helfende Personen in der radiologischen Diagnostik liegen im Bereich von wenigen Mikrosievert. Zur Bewertung des Risikos für helfende Personen ist weiter zu beachten, das durch das Tragen der

## Ionisierende Strahlung

vorgeschriebenen Schutzkleidung die auftretenden Dosiswerte, je nach Art der Schutzkleidung und der eingestellten Hochspannung, um bis zu einen Faktor 100 verringert werden können.

Für die anspruchsvollen Messungen an Röntgenscannern zur Personen- und Fahrzeugkontrolle konnte aufbauend auf den messtechnischen und physikalischen Erfahrungen aus den Bauartprüfungen und der Darstellung der Einheiten der Strahlungsmessgrößen eine spezielle Messtechnik entwickelt werden (siehe Bild 5). Durch die neue Möglichkeit der zeitaufgelösten Messung konnten Störeinflüsse eindeutig von den kleinen Dosiswerten der eigentlichen Bestrahlung getrennt werden. Die Dosiswerte von sich schon im Einsatz befindlichen Röntgenscannern liegen im Bereich der durch die natürliche Umgebungsstrahlung innerhalb von Stunden bis wenigen Tagen erzeugten Dosis.



Bild 5: Mobiles Messsystem zur zeitaufgelösten Messung gepulster Strahlung mit einer Kugelsonisationskammer.

Während der Laufzeit des Projektes erfolgten zeitnahe Rückmeldungen der aktuellen Ergebnisse an die Strahlenschutzkommission (SSK) und an das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Die Ergebnisse wurden auf nationalen und internationalen Tagungen vorgestellt. Die aus dem Vorhaben gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse werden in die internationale Strahlenschutz-Normung eingebracht.

Anlässlich des Tages der offenen Tür 2007 konnten die Ergebnisse des Teilbereichs Röntgenscanner der Öffentlichkeit hautnah bei Messungen an einem in der PTB aufgestellten Fahrzeug-Röntgenscanner (siehe Bild 6) präsentiert werden.



Bild 6: Fahrzeugscanner CAB2000 der Firma Smiths Heimann im simulierten Betrieb am Tag der offenen Tür 2007.

### Natürliche Radioaktivität: Die neue Thoron-Folgeprodukt-Kammer der PTB

Die Hauptkomponente natürlicher Exposition des Menschen mit ionisierender Strahlung ist die Inhalation von kurzlebigen Folgeprodukten des radioaktiven Edelgases Radon, das in Form der beiden Nuklide  $^{222}\text{Rn}$  und  $^{220}\text{Rn}$  in der Erdatmosphäre auftritt. Epidemiologische Studien gehen davon aus, dass in der Bundesrepublik etwa 5 % aller Lungenkrebsfälle auf die Inhalation von  $^{222}\text{Rn}$ -Folgeprodukten zurückzuführen ist. Über den Einfluss des wegen seiner kurzen Halbwertszeit messtechnisch schwer zu erfassenden Thorons ( $^{220}\text{Rn}$ ) ist wenig bekannt. Dies ist problematisch, da sich wegen der unterschiedlichen Energien und Halbwertszeiten seiner Folgeprodukte aus einer erhöhten  $^{220}\text{Rn}$ -Konzentration eine um einen Faktor 14(!) höhere Dosis als bei vergleichbarer  $^{222}\text{Rn}$ -Konzentration ergibt. Die PTB hat deshalb in Rahmen eines vom BMU geförderten Forschungsvorhabens eine Thoron-Folgeprodukt-Kammer für definierte Referenzfelder entwickelt (Bild 7), mit der nun Messsysteme für Radon- und Radon-Folgeprodukte bei

realistischen Klimaverhältnissen mit einer weltweit einmaligen Genauigkeit auch in gemischten Radon-/Thoron-Feldern kalibriert werden können. Dies ist die Basis einer jeden Beurteilung der Radonsituation in einem Gebäude.



Bild 7: Thoron-Folgeprodukt-Kammer mit Quellkontrollsystem, Luftmonitorsystem und Messfühler zur Überwachung der Umweltparameter.

### Radionuklidmetrologie

Das in der Medizin für Diagnostik und Therapie verwendete Radionuklidspektrum vergrößert sich ständig und es gibt eine steigende Nachfrage nach hochpräzisen Kalibrierungen. Dies erfordert in Teilbereichen die Entwicklung und Etablierung neuer Absolutmessverfahren, um auch Nuklide mit ganz kleinen Halbwertszeiten von wenigen Minuten handhaben zu können. Ein Verfahren, das bei geringem Personalaufwand zur Quellenpräparation und Durchführung der Kalibrierung zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist eine spezielle Variante der Flüssigszintillationszählung, die Triple-To-Double-Coincidence-Ratio-Methode (TDCR).

Eine TDCR-Apparatur besteht aus einer optischen Kammer, in der ein mit Szintillator und radioaktiver Lösung gefüllter Glasbehälter platziert wird. Symmetrisch um den Behälter angeordnet befinden sich drei Photomultiplier, die so ausgewählt und eingestellt werden, dass einzelne Photonen an der Photokathode nachgewiesen werden können. Die Einzelzählraten sowie Koinzidenzraten zwischen zwei und drei Photomultipliern werden von einem Datenaufnahmesystem erfasst und bilden die Grundlage für die Auswertung der Messungen.

Eine Aktivitätsbestimmung nach der TDCR-Methode setzt voraus, dass man die physikalischen Nachweisreaktionen im Flüssigszintillator modellieren und durch Simulation die Lichtausbeute – d. h. die Zahl der erzeugten Photonen – aus einem einzelnen Zerfall bestimmen kann. Zwischen der Nachweiseffizienz und dem Verhältnis von Doppel- und Dreifachkoinzidenzen gibt es einen direkten Zusammenhang, der sich berechnen lässt und aus dem schließlich die Aktivität einer Probe abgeleitet werden kann.

Um eine hohe Nachweiseffizienz und damit geringe Unsicherheiten in der Aktivitätsbestimmung zu erreichen, kommt dem optischen Design des Systems eine besondere Bedeutung zu. Es muss gewährleistet sein, dass ein möglichst hoher Anteil des im Szintillator erzeugten Lichts in ein nachweisbares Anodensignal am Photomultiplier umgesetzt wird. Hierzu ist eine optische Kammer erforderlich, die das aus den LSC-Proben austretende Licht möglichst effektiv und gleichzeitig diffus auf die Kathoden der drei Photomultiplier reflektiert. Durch Simulationen und den Einsatz von selbstleuchtenden Flüssigkeiten (Chemolumineszenz) konnte der Einfluss der unterschiedlichen Brechungsindizes von Szintillator und Behälter vor allem an den Übergängen Glas-Luft sichtbar gemacht werden. Daraus entstand ein Design für eine optische Kammer, die aus einem speziellen Kunststoff gefertigt wurde, der einen Reflexionsgrad von mehr als 98 % über einen weiten Wellenlängenbereich bis in den UV-Bereich aufweist und vollständig diffus reflektiert (siehe Titelbild).

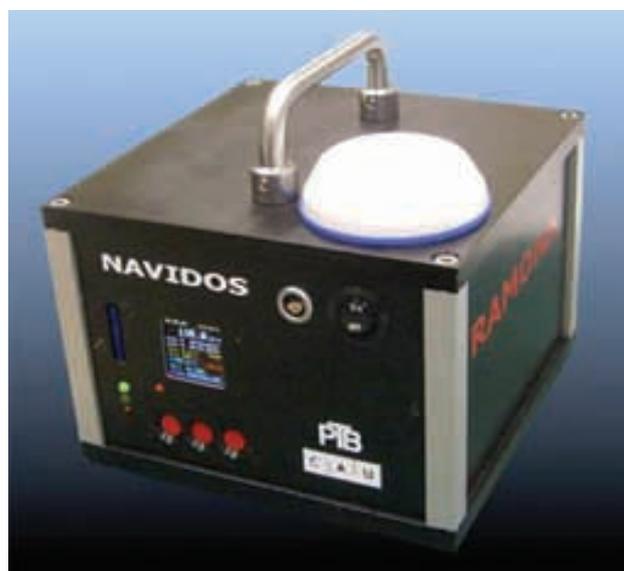
### RAMONA: Radiation Monitoring On board Aircraft

In Deutschland gilt das fliegende Personal mit etwa 30 000 Personen als beruflich strahlenexponiert. Das Strahlungsfeld in Flughöhen wird durch die kosmische Strahlung aus dem Weltall in der Atmosphäre erzeugt. Aufgrund der Vielzahl an erzeugten Sekundärteilchen (Neutronen, Protonen, Elektronen, etc.) und deren zum Teil großen Energien gibt es nur wenige Detektorsysteme, die zur Dosismessung in diesem Strahlungsfeld geeignet sind. Bereits seit 1997 führt die PTB Messungen in Flugzeugen mit einem speziell dafür entwickelten Messsystem durch, das in einem Handkoffer untergebracht ist („Flugkoffer“). Der Flugkoffer wurde an Bord eines Lufthansa Airbus eingebaut und konnte so zwischen Dezember 2003 und September 2004 weltweit messen; allerdings flog der Airbus nur auf der Nordhalbkugel. Aus den Messdaten wurden einfach handhabbare mathematische Funktionen gewonnen, welche die Breiten- und Höhenabhängigkeit der Umgebungs-Äquivalentdosisleistung beschreiben.

Einen Schritt weiter geht das durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung geförderte Projekt RAMONA. Als Partner haben sich die Universität Kiel, TU Braunschweig, DLR Köln, PTB, LTU und Lufthansa zum Ziel gesetzt, Dosimeter in Verkehrsflugzeugen einzubauen, um über einen längeren Zeitraum die Strahlenexposition in Flughöhen zu messen. Von besonderem Interesse dabei ist die Untersuchung von so genannten „solar particle events“. Das sind Sonneneruptionen, bei denen hochenergetische Protonen von der Sonne emittiert werden, die zu einer deutlichen Zunahme der Dosis in Flughöhen führen können.

Bild 8: Das System NAVIDOS für die Messung der Strahlenexposition in Flughöhen. Das System ist mit seiner Größe von  $17 \times 17 \times 12$  cm<sup>3</sup> und einem Gewicht von ca. 4 kg sehr kompakt aufgebaut. Der OLED-Bildschirm erlaubt eine direkte Kontrolle der Messung. Oberhalb der grün leuchtenden LED ist die SD-Speicherkarte und auf dem Deckel die GPS-Antenne zu erkennen.

Im Gegensatz zum Flugkoffer sollen für RAMONA wesentlich kleinere Strahlungsdetektoren zum Einsatz kommen. Dazu wurde zusammen mit der Universität Kiel das Messsystem NAVIDOS (siehe Bild 8) entwickelt. Basierend auf dem im Weltraum erprobten Detektor DOSTEL ist NAVIDOS mittels eines hochempfindlichen GPS-Empfängers und einer sehr leistungsfähigen Antenne in der Lage, GPS-Daten für die Ermittlung der Flugkoordinaten überall in der Passagierkabine des Flugzeuges zu empfangen. Als zentrale Datenerfassungseinheit dient der in der PTB entwickelte, leicht modifizierte Datenlogger. Alle Messdaten werden auf einer handelsüblichen SD-Speicherkarte abgelegt, die dann monatlich gewechselt werden soll. Ein erster Test in Flugzeugen hat die Funktionsfähigkeit des Systems bestätigt.



## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Bestimmung der Aktivität und des $\beta^+$ -Verzweigungsverhältnisses von $^{22}\text{Na}$

Die Arbeitsgruppe *Aktivitätseinheit* hat zu Vergleichszwecken eine  $^{22}\text{Na}$ -Lösung an das internationale Referenzsystem SIR eingeschickt. Die Aktivität der Lösung wurde zuvor sowohl mit der  $4\pi$ -Flüssigszintillationszählung (LSC) als auch mit der  $4\pi\beta$ - $\gamma$ -Koinzidenzmethode bestimmt. Die Ergebnisse stimmen sehr gut mit dem Wert überein, der mit Hilfe einer im Jahr 1977 kalibrierten Ionisationskammer bestimmt wurde, wodurch deren Langzeitstabilität bestätigt wird. Durch Koinzidenzmessungen in zwei unterschiedlichen Messkonfigurationen konnte zusätzlich das Verhältnis der Wahrscheinlichkeiten für Elektroneneinfang und  $\beta^+$ -Zerfall bestimmt werden, was sowohl von theoretischem Interesse als auch von großer Bedeutung für Sekundärmethoden, nicht nur in der Radionuklidmetrologie, ist. (O. Nähle, FB 6.1, [ole.j.naehle@ptb.de](mailto:ole.j.naehle@ptb.de))

#### Entwicklung einer Triple-to-Double-Coincidence-Ratio (TDCR) Apparatur zur Aktivitätsbestimmung

Es wurde eine TDCR-Apparatur zur Aktivitätsbestimmung mit Hilfe der Flüssigszintillationstechnik aufgebaut, die bestehende Verfahren zur Aktivitätsbestimmung ergänzt und neue Kalibriermöglichkeiten auch für Nuklide mit komplizierten Zerfallsschemata eröffnet. (O. Nähle, FB 6.1, [ole.j.naehle@ptb.de](mailto:ole.j.naehle@ptb.de))

#### Ein Monte-Carlo-Modell zur Berechnung des Elektronenspektrums von Elektroneneinfangsnukliden

Für die Aktivitätsbestimmung von Elektroneneinfangsnukliden mit Hilfe der Flüssigszintillationszählung wurde ein verbessertes Monte-Carlo-Modell entwickelt und mit  $^{109}\text{Cd}$  und  $^{125}\text{I}$  getestet. Die Ergebnisse zeigen deutliche Verbesserungen gegenüber früheren vereinfachten analytischen Modellen. (K. Kossert, FB 6.1, [karsten.kossert@ptb.de](mailto:karsten.kossert@ptb.de))

#### Bestimmung der Halbwertszeit von $^{233}\text{U}$

Zur Vorbereitung eines Experiments zur Bestimmung der Halbwertszeiten der für die Geochronologie wichtigen Isotope  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  wurde in Zusammenarbeit mit drei weiteren Instituten die Halbwertszeit von  $^{233}\text{U}$  mit kleinen Unsicherheiten bestimmt. (K. Kossert, FB 6.1, [karsten.kossert@ptb.de](mailto:karsten.kossert@ptb.de))

#### Anfangs- und Volumenrekombination separat gemessen

Bei Dosismessungen mit Ionisationskammern an Elektronenbeschleunigern ist es bislang nicht üblich, Volumenrekombination und Anfangsrekombination separat zu bestimmen. Mit entsprechenden Messverfahren können relative Dosisabweichungen, die auf Ionenverluste zurückzuführen sind, von zur Zeit etwa 0,2 % auf unter 0,05 % verringert werden. (Klaus Derikum, FB 6.2, [klaus.derikum@ptb.de](mailto:klaus.derikum@ptb.de))

#### Untersuchungen der Geometrie kleiner Photonenstrahlungsfelder

Die geometrischen Eigenschaften der von einer  $^{60}\text{Co}$ -Bestrahlungsvorrichtung und von einem Linearbeschleuniger erzeugten kleinen Photonenfelder wurden experimentell und mit Hilfe von Monte-Carlo-Rechnungen im Hinblick auf ihre Eignung als Referenzstrahlungsfelder für Dosismessungen mit dem Wasser-Kalorimeter untersucht. (R.-P. Kapsch, FB 6.2, [ralf-peter.kapsch@ptb.de](mailto:ralf-peter.kapsch@ptb.de))

### **Validierung eines neuen Primärnormals für die Kalibrierung von Brachytherapie-Quellen**

Für die Kalibrierung der zur Therapie des Prostatakarzinoms verwendeten radioaktiven Quellen, so genannten Seeds, hat die PTB eine neue Primärstandard-Messeinrichtung entwickelt, die im Berichtsjahr durch Vergleich mit Kalibrierungen des National Institute of Standards and Technology (NIST) validiert wurde. Die Abweichungen der Kalibrierwerte des NIST und der PTB waren geringer als 1 % und lagen damit innerhalb der von beiden Instituten angegebenen Unsicherheiten. Damit steht erstmals auch in Europa ein Primärnormal zur Kalibrierung von  $^{125}\text{I}$ - und  $^{103}\text{Pd}$ - Brachytherapyquellen zur Verfügung. (H.-J. Selbach, FB 6.2, hans-joachim.selbach@ptb.de)

### **Bestimmung der Wasser-Energiedosis für die interstitielle Brachytherapie**

Die Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis für die interstitielle Brachytherapie, z. B. für die Behandlung von Prostatakarzinomen, ist ein Stück näher gerückt. Für niederenergetische Photonenstrahlung (bis ca. 40 keV) wurde ein neues Messverfahren entwickelt, welches auf einer im Phantom befindlichen Ionisationskammer beruht, deren Messvolumen variabel ist. (Th. Schneider, FB 6.2, thorsten.schneider@ptb.de)

### **Vergleich zwischen experimentellen und berechneten Verhältnissen $D_w/K_a$ im Bereich der Röntgenstrahlung mit Erzeugungsspannungen von 70 kV bis 280 kV**

Messgröße in der Dosimetrie für die Therapie mit Röntgenstrahlung ist die Wasser-Energiedosis,  $D_w$ . Da bislang kein Primärnormal für diese Messgröße im Bereich der Röntgenstrahlung mittlerer Energie existiert, wird die Dosismessung über die ionometrische Bestimmung der Messgröße Luftkerma,  $K_a$ , und unter Verwendung von berechneten Konversionsfaktoren zur Umrechnung in Wasser-Energiedosis durchgeführt. Ein Wasserkalorimeter ist prinzipiell als Primärnormal auch im Bereich der Röntgenstrahlung geeignet und wurde bei 6 verschiedenen Röntgenqualitäten zur direkten  $D_w$ -Bestimmung eingesetzt. Ein Vergleich der Ergebnisse der kalorimetrischen  $D_w$ -Bestimmung und der ionometrischen  $K_a$ -Bestimmung mit dem über Monte-Carlo-Methoden berechneten Verhältnis beider Messgrößen zeigt nach vorläufiger Auswertung eine Übereinstimmung innerhalb von ca.  $\pm 1,5$  %. (A. Krauss, FB 6.2, achim.krauss@ptb.de)

### **Einfluss der Abmessungen des Stabphantoms auf die Kalibrierergebnisse bei Fingerringdosimetern**

Für die Bestrahlungen von Fingerringdosimetern empfiehlt die ISO die Verwendung eines PMMA-Stabphantoms mit 19 mm Durchmesser und 300 mm Länge. Untersuchungen an Stabphantomen mit abweichenden Abmessungen zeigten, dass die Verwendung von kürzeren Stabphantomen (mindestens 70 mm Länge) und mit einem Durchmesser von  $(19 \pm 1)$  mm zu Ergebnissen führt, deren Unterschiede innerhalb der Messunsicherheit dieser Untersuchung von 1 % ( $k = 2$ ) und damit innerhalb der in den CMC-Listen angegebenen Gesamt-Messunsicherheit von 3 % bis 4 % ( $k = 2$ ) liegen. (J. Brunzendorf, FB 6.3, jens.brunzendorf@ptb.de)

### Erster EUROMET-Vergleich in der „Beta-Dosimetrie“

Erstmals wurde ein internationaler EUROMET-Messvergleich für Betastrahlung im Bereich Strahlenschutz durchgeführt. Neben der PTB als Pilotlabor nahmen aus Europa die Primärlaboratorien von Finnland, Frankreich und Italien teil, von anderen Kontinenten jene aus Japan, Kanada, Russland und den USA. Die meisten Ergebnisse stimmen im Rahmen der Unsicherheiten überein und dokumentieren damit die gute Übereinstimmung der Beta-Dosimetrie innerhalb der beteiligten Staatsinstitute. Die Ergebnisse dienen allen Teilnehmern als Grundlage für die Eintragung ihrer Messmöglichkeiten in die internationale Datenbank des BIPM. (R. Behrens, FB 6.3, rolf.behrens@ptb.de)

### Ein handlicher Datenlogger für vielseitigen Einsatz

Eine neue technische Entwicklung ist der batteriebetriebene Datenlogger für gleichzeitige Impulzzählung, Analogsignalmessung, serielle Datenauslese und Datenspeicherung auf einer Speicherkarte. (F. Langner, FB 6.4, frank.langner@ptb.de)

### Teilchenspurdetektor für die nukleare Astrophysik

In einer Zusammenarbeit mit verschiedenen Instituten wird ein Messverfahren und Detektorsystem zur Bestimmung des Wirkungsquerschnitts der Kohlenstoffverbrennung zu Sauerstoff eingesetzt, mit dem die physikalischen Vorgänge kurz vor Supernovaexplosionen untersucht werden können. (V. Dangendorf, FB 6.5, volker.dangendorf@ptb.de)

### Datenanalyse für die Spektrometrie an Fusionsplasmen

Für die Neutronenspektrometrie in der Plasmediagnostik werden komplexe Verfahren der Datenanalyse benötigt. Eine Methode, die Verfahren der Bayesschen Statistik und der maximalen Entropie kombiniert, ermöglicht die Untersuchung von Parametern, die das Plasma in Fusionsexperimenten beschreiben. (M. Reginatto, FB 6.5, marcel.reginatto@ptb.de)

### Untersuchung des Lichtabklingverhaltens von Flüssigszintillatoren

Für Spektrometrie- und Radiographie an Hochintensitätslasern werden Detektoren benötigt, mit deren Hilfe die aus dem Laserplasma emittierten Neutronen wenige Nanosekunden nach einem extrem intensiven  $\gamma$ -Blitz nachgewiesen werden können. Für diese Messaufgabe wurde der zeitliche Verlauf der Lichtemission verschiedener Szintillatoren über 5 Größenordnungen der Lichtintensität untersucht und optimiert. (R. Lauck, FB 6.5, ronald.lauck@ptb.de)

### Relative biologische Wirksamkeit von Protonen nanometrisch bestimmbar

Durch Simulation der Ionisationscluster- Erzeugung in einem nanometrischen Zielvolumen wird für leichte Ionen gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeiten zur Erzeugung von Ionisationsclustern mit mindestens zwei Ionisationsereignissen direkt zur Bestimmung der in der Hadronentherapie benötigten relativen biologischen Wirksamkeit (RBW) verwendet werden kann. (B. Großwendt, FB 6.6, bernd.grosswendt@ptb.de)

### Grenzen der Anwendung von herkömmlichen Monte-Carlo-Programmen in der Nanodosimetrie

Das Ansprechvermögen eines in Italien entwickelten miniaturisierten Dosimeters für klinische Anwendungen im nanometrischen Bereich wird zur Zeit im Fachbereich 6.6 mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationsrechnungen untersucht. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass die mit herkömmlichen Codes (MCNP und FLUKA) berechneten Pulshöhenspektren sehr stark vom gewählten Algorithmus zur Beschreibung des Energieverlustes von Elektronen in einem Medium abhängen. Der Vergleich mit einem *ad-hoc* analogen Monte-Carlo-Programm zeigt Unterschiede im Pulshöhenspektrum, die teilweise einen Faktor 10 erreichen. Daher ist die genaue Kenntnis der physikalischen Bedingungen und Grenzen der verwendeten mathematischen Modelle entscheidend, um die Monte-Carlo-Methode erfolgreich und fehlerfrei anwenden zu können. (E. Gargioni, FB 6.6, elisabetta.gargioni@ptb.de)

### Nanometrische Spektren zum ersten Mal für He-Ionen bis hinunter zu 0,1 MeV gemessen

An den Beschleunigeranlagen der PTB wurden nanometrische Spektren für monoenergetische He-Ionen im Energiebereich zwischen 0,1 MeV bis 20 MeV zum ersten Mal gemessen und mit Monte-Carlo-Simulationsrechnungen verglichen. Als Messgas diente Propan ( $C_3H_8$ ) bei einem Druck von 1,2 mbar. Die gemessenen und berechneten mittleren Ionisationsclustergrößen zeigen für Energien oberhalb von ca. 0,4 MeV eine gute Übereinstimmung, wohingegen die Übereinstimmung zu niedrigeren Energien hin schlechter wird. (G. Hilgers, FB 6.6, gerhard.hilgers@ptb.de)

### Der DNA auf der Spur: Messung elastischer Elektronenstreuquerschnitte von Tetrahydrofuran

Bei der Simulation von Strahlenschädigungen der DNA ist die Kenntnis aller wesentlichen Wechselwirkungsprozesse zwischen Elektronen und den Bausteinen der DNA unerlässlich. Da die derzeit bekannten Wechselwirkungsdaten noch sehr lückenhaft und zum Teil sogar widersprüchlich sind, wurden die elastischen differentiellen Elektronen-Wirkungsquerschnitte von Tetrahydrofuran (ein Hauptbestandteil der DNA) für Primärenergien zwischen 20 eV und 1 keV und Streuwinkeln zwischen  $5^\circ$  und  $135^\circ$  absolut gemessen. (W.-Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

### Weltweit aktuellste Streuquerschnitte für Elektronentransport in Argon

Vollständige Streuquerschnittsdaten sind für die Untersuchung des Elektronentransports in einem Medium von großer Bedeutung in vielen Gebieten der Physik. Beispiele hierfür sind Transportphänomene in der Oberflächenphysik, der Plasmaphysik, der Dosimetrie ionisierender Strahlung und der Atmosphärenphysik. Im Fachbereich 6.6 wurden konsistente Querschnittsdaten für die elastische und die unelastische Streuung von Elektronen an Argon im Energiebereich von 10 meV bis zu einigen keV aufgebaut. Dieser Datensatz ist, momentan, der aktuellste weltweit. (E. Gargioni, FB 6.6, elisabetta.gargioni@ptb.de)

## Metrologie für die Gesellschaft

### Neue Referenzatmosphären in der PTB

Die Hauptkomponente natürlicher Exposition des Menschen mit ionisierender Strahlung ist die Inhalation von kurzlebigen Folgeprodukten des radioaktiven Edelgas Radon, das in Form der beiden Nuklide  $^{222}Rn$  und  $^{220}Rn$  in der Erdatmosphäre auftritt. Epidemiologische Studien gehen davon aus, dass in der Bundesrepublik ca. 5 % aller Lungenkrebsfälle auf die Inhalation von  $^{222}Rn$ -Folgeprodukten zurückzuführen ist. Über den Einfluss des wegen seiner kurzen Halbwertszeit messtechnisch schwer zu erfassenden Thorons ( $^{220}Rn$ ) ist wenig bekannt. Mit dem Aufbau einer Thoron-Folgeprodukt-Kammer können in der PTB ab sofort aktive und passive Messsysteme für  $^{220}Rn$ ,  $^{222}Rn$  und deren Folgeprodukte bei realistischen Klimaverhältnissen mit einer weltweit einmaligen Genauigkeit kalibriert werden. (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de)

### Quellkontrollsystem zur Erzeugung homogener $^{220}Rn$ -Referenzatmosphären

Zur Herstellung einer Referenzatmosphäre wurden in der Thoron-Folgeprodukt-Kammer zehn  $^{228}Th$ -Quellen installiert, aus denen  $^{220}Rn$  emaniert. Jede einzelne Quelle befindet sich in einer Schublade in einem Bleikubus. Das Öffnen und Schließen der Schubladen mit den Quellen wird von außen über ein Quellkontrollsystem gesteuert. Ist eine Quelle im Bleikubus versenkt, dient dies der Abschirmung der ionisierenden Strahlung sowie der Reduzierung der Aktivitätskonzentration des  $^{220}Rn$  und seiner Folgeprodukte in der Kammer. (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de)

### Luftmonitorsystem zur Überwachung von radioaktiven Referenzatmosphären

Bei der Kalibrierung von Messsystemen in der Thoron-Folgeprodukt-Kammer ist sicherzustellen, dass die erzeugte Referenzatmosphäre bzgl. der einzelnen Aktivitätskonzentrationen homogen ist. Eine homogene Verteilung von  $^{220}\text{Rn}$  ist allerdings nicht so leicht sicherzustellen, da dieses Isotop nur eine Halbwertszeit von 55 s besitzt. Über das Quellkontrollsystem wird der Atmosphäre deshalb räumlich verteilt  $^{220}\text{Rn}$  zugeführt. Der Nachweis einer nuklidspezifisch gleichverteilten Aktivitätskonzentration erfolgt online mittels des Luftmonitorsystems (4 so genannte Cam-Detektoren, d. h. lichtdichte Oberflächensperrschicht-Detektoren mit 1700 mm<sup>2</sup> aktiver Fläche), das unter anderem eine lokale Messung von  $^{216}\text{Po}$  ermöglicht. Da  $^{216}\text{Po}$  wegen seiner Halbwertszeit von 0,15 s sich immer im Gleichgewicht mit  $^{220}\text{Rn}$  befindet, ist somit auch der Nachweis der Homogenität der Atmosphäre bzgl.  $^{220}\text{Rn}$  geführt. (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de)

### Dosimetrie mit ESR/Alanin: Von der Metrologie zur Therapie

Ein kommerzielles, kompaktes ESR-Spektrometer für die industrielle Dosimetrie wurde auf seine Eignung für Anwendungen in der Strahlentherapie untersucht. Bei Verwendung von Auswerteverfahren, die in der PTB entwickelt wurden, ergibt sich eine relative Standard-Messunsicherheit von 1 % bei 10 Gy, was eine Nutzung für Messaufgaben in der Qualitätssicherung für die Strahlentherapie durchaus sinnvoll erscheinen lässt. (M. Anton, FB 6.2, mathias.anton@ptb.de)

### Untersuchungen zur Relativen Biologischen Wirksamkeit hochenergetischer Photonenstrahlung

Monte-Carlo-Simulationen beschreiben die Abhängigkeit der Relativen Biologischen Wirksamkeit von Photonenstrahlung mit Energien kleiner als 1 MeV; bei größeren Energien gibt es Hinweise auf neue Wirkungsmechanismen. (R.-P. Kapsch, FB 6.2, ralf-peter.kapsch@ptb.de)

### Erfolgreicher Einsatz des PTB-Wasserkalorimeters im gescannten 280 MeV/u $^{12}\text{C}$ -Strahl bei der GSI

Die bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) durchgeführte Form der Strahlentherapie verwendet einen hochenergetischen Kohlenstoff-Ionenstrahl, um den Tumor zu zerstören. Dabei wird der Ionenstrahl mittels der so genannten Raster-Scan-Methode sehr präzise über das gesamte Tumervolumen gelenkt. Für diese Bestrahlungsbedingungen existiert bislang kein geeignetes Primärnormal für die Bestimmung der Wasser-Energiedosis. In einem ersten Experiment wurde daher das transportable Wasserkalorimeter der PTB in einem 280 MeV/u-Kohlenstoff-Strahl bei der GSI eingesetzt, um die Eignung des kalorimetrischen Messverfahrens aufzuzeigen. Es ist zu erwarten, dass die Wasser-Energiedosis mit Hilfe des Kalorimeters mit einer Standard-Messunsicherheit von weniger als 1 % bestimmt werden kann. (A. Krauss, FB 6.2, achim.krauss@ptb.de)

### Dosimetrie mit ESR/Alanin: Ansprechvermögen für ultraharte Photonenstrahlung

Das relative Ansprechvermögen des Sekundärnormal-Messsystems basierend auf dem Nachweis strahlungsinduzierter freier Radikale in Alanin konnte für therapeutisch verwendete ultraharte Photonenstrahlung bei 8 MV und 16 MV mit einer Standard-Unsicherheit von nur 0,3 % bestimmt werden. Das Messsystem ist damit für Untersuchungen in therapeutisch relevanten Feldern mit ultraharter Photonenstrahlung einsetzbar. (M. Anton, FB 6.2, mathias.anton@ptb.de)

### Ermittlung der Strahlenbelastung helfender Personen in der Zahnmedizin

Im Rahmen eines vom BMU geförderten Forschungsvorhabens wurde die Dosis helfender Personen bei Röntgenuntersuchungen in der Zahnmedizin gemessen. Sie liegt im Bereich der Tagesdosis durch die natürliche Umgebungsstrahlung. (O. Hupe, FB 6.3, oliver.hupe@ptb.de)

### **AKD-PTB-Messvergleich zur Untersuchung von passiven $H^*(10)$ -Dosimetern**

Ziel der Vergleichsmessungen war es, das Langzeitverhalten von Dosimetern, die speziell für die Überwachung kerntechnischer Anlagen im Strahlungsfeld der natürlichen Umgebungsstrahlung eingesetzt werden, unter realen Umweltbedingungen zu untersuchen. Im Herbst 2007 wurde der Messvergleich nach zweijähriger Laufzeit abgeschlossen. Erste Ergebnisse liegen vor. Die vorwiegend auf Lumineszenz basierenden passiven Ortsdosimeter für die Messgröße Umgebungs-Äquivalentdosis  $H^*(10)$  wurden von zehn teilnehmenden Institutionen aus den drei Mitgliedsländern des AKD gestellt. (H. Dombrowski, FB 6.3, harald.dombrowski@ptb.de)

### **RAMONA: Radiation Monitoring ON board Aircraft**

Für die dauerhafte Messung der Strahlenexposition in Verkehrsflugzeugen wurde im Rahmen des durch das BMVBS geförderten Projektes RAMONA das handliche Messgerät NAVIDOS entwickelt. (F. Wissmann, FB 6.4, frank.wissmann@ptb.de)

### **Strahlenschutzdosimetrie an Hochenergie-Teilchenbeschleunigern**

Bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) wurden europäische Vergleichsmessungen, koordiniert durch die „European Radiation Dosimetry Group“ (EURADOS), hinter Abschirmungen durchgeführt, um Strahlenschutz-Messgeräte zu überprüfen. Die PTB hat dabei Neutronenspektren gemessen und daraus Referenzwerte für die Teilnehmer an diesem Vergleich ermittelt. (B. Wiegel, FB 6.5, burkhard.wiegel@ptb.de)

### **Dosimeter für Astronauten**

Die PTB beteiligt sich in Zusammenarbeit mit dem DLR an Strahlenschutzmessungen auf der Internationalen Raumstation (ISS) und an der Entwicklung eines direkt anzeigenden Personendosimeters für Astronauten. (M. Luszik-Bhadra, FB 6.5, marlies.luszik-bhadra@ptb.de)

### **Kalibrierung von Ionisationskammern zur Dosismessung in der Computertomographie**

Mehr als 50 % der effektiven Kollektivdosis der Bevölkerung durch die Röntgendiagnostik entsteht im Bereich der Computertomographie (CT), so dass die Bestimmung der effektiven Patientendosis bei CT-Untersuchungen von besonderer Bedeutung ist. Aus diesem Grund, wurden im FB 6.6 die bei der Kalibrierung von CT-Ionisationskammern verwendeten Verfahren genauer untersucht. Dabei ergab sich, dass die von Bochud und anderen ermittelte Korrektur des bei der Kalibrierung durch Streustrahlung verursachten Ionisationsstromes in der CT-Kammer um etwa einen Faktor zehn zu groß ist. (L. Büermann, FB 6.6, ludwig.bueermann@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

#### **Spurenanalyse radioaktiver Stoffe in der bodennahen Luft**

Der 2. Ringversuch im Bereich der Spurenanalyse radioaktiver Stoffe in der bodennahen Luft wurde von der Leitstelle Spurenanalyse im BfS in Zusammenarbeit mit der PTB durchgeführt. Am Ringversuch nahmen Spurenmessstellen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz teil. Der Ringversuch ermöglichte den Teilnehmern die Beurteilung ihrer Analyse- und Messverfahren in Form einer externen Qualitätssicherung.

(H. Wershofen, FB 6.1, herbert.wershofen@ptb.de)

### **Internationale Normen für Strahlenschutzdosimeter**

Im Bereich Strahlenschutz findet die Globalisierung seit vielen Jahren statt. Ein wichtiges Steuerungsinstrument ist dabei die Normung, die seit 2001 auch auf europäischer Ebene stattfindet. Neue Meilensteine sind die Normen IEC/EN 61526 für direkt anzeigende (elektronische) Strahlenschutz-Dosimeter und das Pendant IEC 62387 für passive Dosimeter. Beide Normen sind in dosimetrischer Hinsicht angeglichen und berücksichtigen erstmalig die Bestimmung der Unsicherheit. Neu ist auch das Konzept, die Messverfahren und die zulässigen Messabweichungen festzuschreiben, die Bereiche der verschiedenen Einflussgrößen, in denen die Messabweichungen eingehalten werden müssen, flexibel zu gestalten und nur Mindestbereiche festzuschreiben. (P. Ambrosi und R. Behrens, FB 6.3, peter.ambrosi@ptb.de, rolf.behrens@ptb.de)

### **Start des EU-Projekts EFNUDAT**

Die PTB stellt im Rahmen der von der EU geförderten integrierten Infrastruktur Initiative EFNUDAT ihre Beschleunigeranlage für die Nutzung durch externe Forschergruppen zur Verfügung. (R. Nolte, FB 6.4, ralf.nolte@ptb.de)

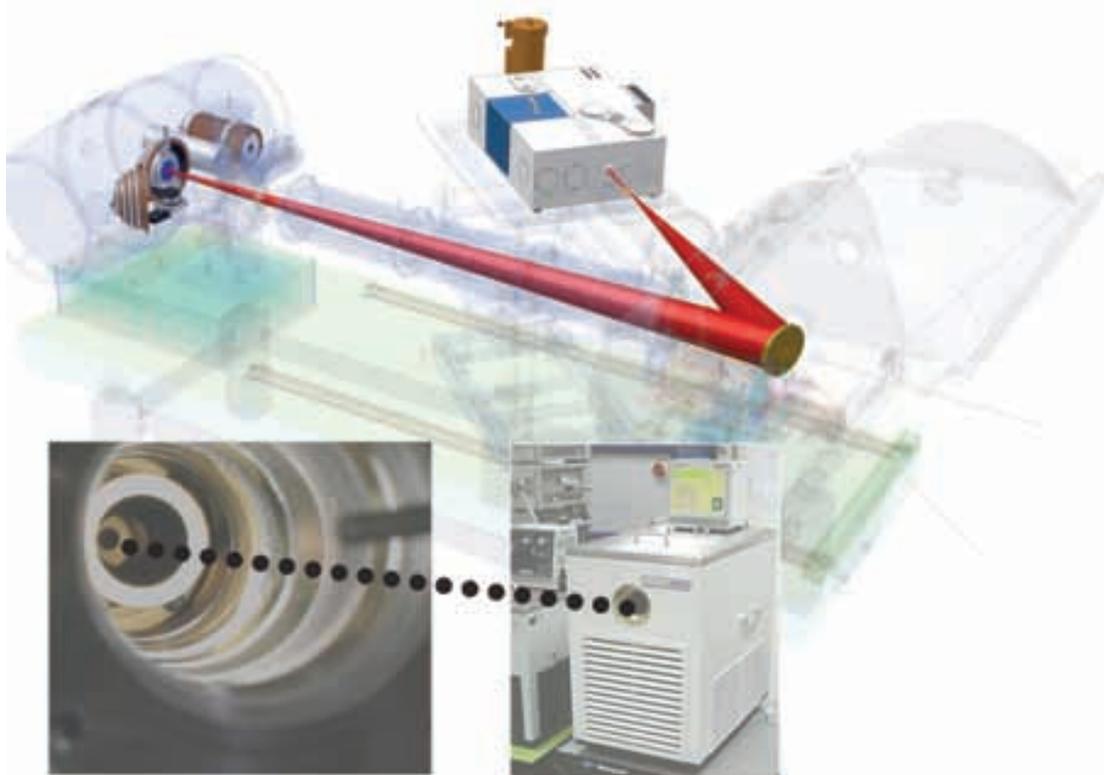
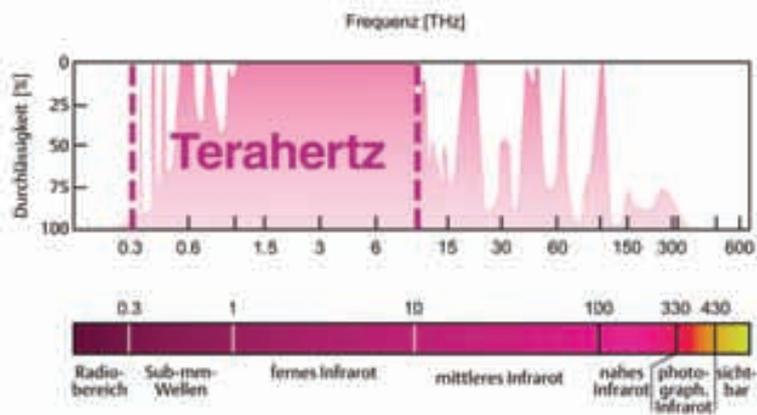
### **Weitere Informationen**

#### **Messplatz am hochenergetischen Photonenfeld**

Für die Bauartprüfung von Dosimetern mit Photonenstrahlung ist eine Vielzahl von Referenzstrahlungsfeldern erforderlich. Unter anderem ein Feld mit hochenergetischen Photonen mit einer mittleren Energie von 4,4 MeV bzw. 6,7 MeV. Für dieses hochenergetische Photonenfeld wurde ein neuer Messstand aufgebaut. In diesem Neubau wurden sowohl kommerzielle Messgeräte als auch Eigenentwicklungen eingesetzt. Zur Steuerung des Messstandes wurde ein Bestrahlungsprogramm erstellt, das die gesamte Steuerung des Messstandes übernimmt und auch die Auswertung der gemessenen Werte durchführt. (B. Pullner, FB 6.3, bjoern.pullner@ptb.de)



# Temperatur und Synchrotronstrahlung



Berichte der Abteilungen

Abteilung

# Temperatur Synchrotron

## Institut Berlin

Marc Schulte, Stadtrat des Berliner Bezirks Charlottenburg-Wilmersdorf, hat die Veränderungen der letzten zehn Jahre in der öffentlichen Sichtbarkeit der PTB in seinem Grußwort anlässlich der Feiern zum 120-jährigen Bestehen der PTR/PTB am 10. Dezember auf den Punkt gebracht (Bild 1), indem er feststellte: „Die PTB öffnet sich nach außen. Wissenschaft muss öffentlich sein. Das ist das, was wir wollen.“ So hat die PTB ihre Hauptstadtrepräsentanz auch im vergangenen Jahr außer für das Jubiläumskolloquium für viele weitere öffentliche Ereignisse genutzt, die z. T. an anderer Stelle dieses Jahresberichts ausführlicher behandelt werden.



Bild 1: Die 120-Jahr-Feier der PTR/PTB im Hermann-von-Helmholtz-Bau; Stadtrat Schulte ganz rechts im Bild, daneben der Schatzmeister des Helmholtz-Fonds Ruprecht von Siemens.

### Titelbild

Terahertz-Metrologie: Die PTB hat einen neuen Schwerpunkt „Terahertz-Metrologie“ eingerichtet, in dem die Abteilungen 2, 7 und 8 die Leistungsmessung und das Zeit- und Ausbreitungsverhalten von Terahertz-Signalen untersuchen und auf SI-Einheiten zurückführen.

Im Hermann-von-Helmholtz-Bau fanden Veranstaltungen mit europäischer Dimension statt, wie die eine neue Epoche der europäischen Metrologie einläutende Gründung von EURAMET als eingetragenen Verein nach deutschem Recht am 11. Januar sowie die jährlich ihren Tagungsort wechselnde Fachtagung des EURAMET Technical Committee for Thermometry and Humidity im März. Anfang Juni trafen sich die führenden deutschen Experten für Tieftemperaturphysik und Thermometrie bei ultratiefen Temperaturen zu einem PTB-Seminar für zwei Tage und diskutieren die künftigen Entwicklungen ihrer Arbeitsgebiete und die von der PTB zu erwartenden Beiträge. Entsprechendes wurde im September mit den deutschen und internationalen „Stakeholdern“ zum Thema „Zukunft der Metrologie strömender Medien“ durchgeführt. Am 31. Oktober konnte in Berlin-Buch zusammen mit Vertretern des Berliner Senats, der Charité und des Max-Delbrück-Centrums für Molekulare Medizin der Grundstein für eine gemeinsame Forschungseinrichtung gelegt werden, die einen 7-Tesla-Magnetresonanztomographen beherbergen und der PTB die Möglichkeit erhalten soll, weiterhin auf diesem Arbeitsgebiet zu den Spitzeninstituten zu gehören. Im Oktober schließlich traf sich die BDI-Initiative „Innovationsstrategien und Wissensmanagement“ zu ihrer jährlichen Tagung und ließ sich über die Aufgaben der PTB informieren (Bild 2).

Zur „klügsten Nacht des Jahres“, wie die Lange Nacht der Wissenschaften inzwischen bezeichnet wird, öffnete die PTB erstmalig die Türen ihres Willy-Wien-Laboratoriums zu einer dem Jahrhundert des Photons gewidmeten Schau über das Licht, das „mehr ist als man sieht“. Es kamen fast zweieinhalbtausend Besucher.

# r und nstrahlung



Bild 2: Die BDI-Initiative „Innovationsstrategien und Wissensmanagement“ im Hermann-von-Helmholtz-Bau; von links Dr. Carsten Kreklau, Mitglied der Hauptgeschäftsführung des BDI, Prof. Dr. Heinrich von Pierer, Leiter des Rats für Innovation und Wachstum der Bundeskanzlerin, und Prof. Dr. Utz Claassen, Vorsitzender der BDI-Initiative Innovationsstrategien und Wissensmanagement und Mitglied der Forschungsunion.

## Abteilung 7 „Temperatur und Synchrotronstrahlung“

Die PTB ist dabei, ihre Aufgabenfelder künftig nach Themen oder Programmen zu ordnen. Das bedeutet, dass die zum Teil langjährige Verflechtung mit anderen Abteilungen nunmehr sichtbarer dargestellt wird. Die Kernaufgaben der Abteilung 7, wie die Darstellung und Weitergabe der Temperatureinheit und ihrer Skala, der radiometrischen Größen vom Terahertz- bis zum Röntgenbereich sowie der Druckskala im Vakuumbereich, bleiben dabei erhalten. Besonders sichtbar ist die traditionelle Kooperation mit der Abteilung 4 *Optik* beim Schwerpunkt Radiometrie im Rahmen der Initiative AMPHORA. Neu eingerichtet im Rahmen der Aufgabenkritik des Konzepts „PTB 2016“ wurden die Themenfelder „Durchfluss“ (Abt. 1, 3 und 7), das auch mit Energietransport verknüpft ist, und „Terahertz-Metrologie“ (Abt. 2, 7 und 8). Letzteres wird von der Abteilung 7 koordiniert.

## Terahertz-Metrologie

Unter dem Terahertz-Spektralbereich versteht man das ferne Infrarot im Grenzgebiet zwischen höchstfrequenter elektromagnetischer Strahlung aus dem Mikrowellenbereich und langwelliger optischer Strahlung im Infraroten, kurz den Frequenzbereich zwischen 1/10 THz und 10 THz oder in Wellenlängen ausgedrückt von 3 mm bis 30  $\mu\text{m}$ . Dieses Frequenzband wurde bisher aufgrund seiner Randlage bezüglich der Hochfrequenztechnik einerseits und der Optik andererseits wenig beachtet. Inzwischen sind aber zahlreiche Erfolg versprechende Anwendungen im Bereich der Materialwissenschaften, der industriellen Inspektion, der medizinischen Diagnostik, der Biotechnologie, der Kommunikationstechnik und – als ein wesentlicher Treiber – der Technik für die öffentliche Sicherheit weltweit aufgegriffen worden. Strahlungsquellen und Detektoren, die meistens schon in den traditionellen Spektralbereichen unterhalb und oberhalb des Terahertz-Bands eingesetzt werden, müssen auf

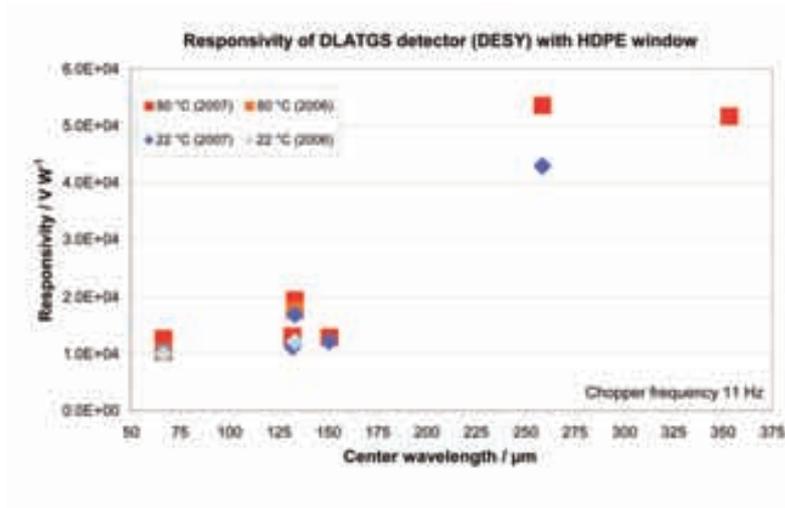


Bild 3: Detektorcharakterisierung bei zwei verschiedenen Strahlertemperaturen; Hohlraumstrahler für Terahertz-Strahlung im Einschub.

ihre Tauglichkeit in dem neuen Bereich untersucht, eingehend charakterisiert und rückgeführt werden. Letzteres gilt auch für neuartige Entwicklungen für dieses Frequenzgebiet.

Für erste Untersuchungen wurde zunächst ein geeigneter Hohlraumstrahler für Terahertz-Strahlung gebaut und in Kooperation mit einer Arbeitsgruppe am DESY zur quellengestützten Detektorcharakterisierung eingesetzt (Bild 3). Als leistungsfähige und sehr variabel einsetzbare weitere THz-Quelle wird die Metrology Light Source im Willy-

Wien-Laboratorium der PTB in Berlin-Adlershof im kommenden Jahr in Betrieb gehen. Ebenso wird zunächst der Einsatzbereich des kürzlich in Betrieb genommenen Messplatzes für die spektrale Empfindlichkeit von Empfängern vom Infraroten zu THz-Frequenzen erweitert. Schließlich sind Zähler für den Einzelphotonen-Nachweis sowie Bolometer für THz-Bildgebung und Fourier-Spektrometrie nach dem Transition-Edge-Sensor (TES)-Prinzip in der Entwicklung (Bild 4).

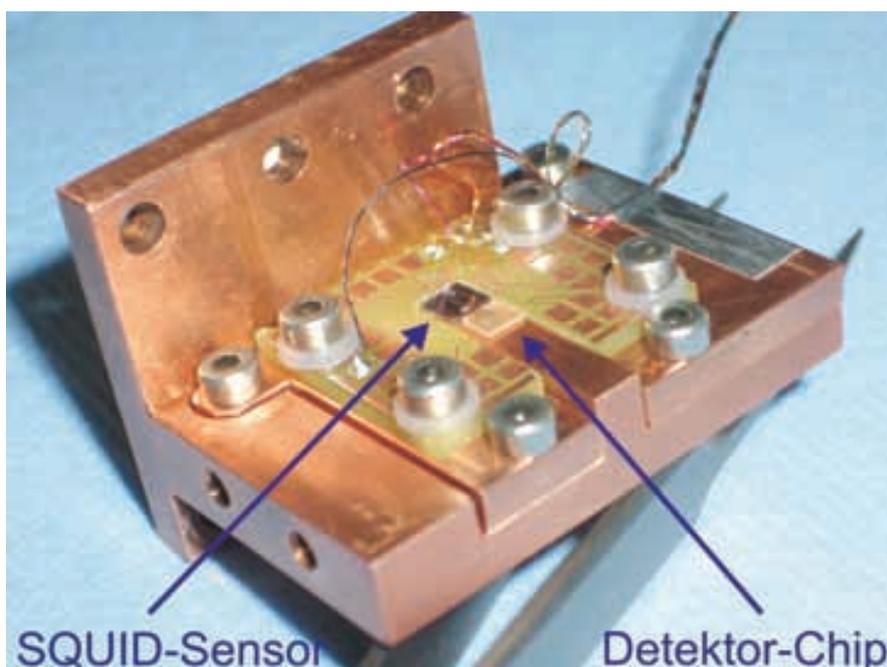
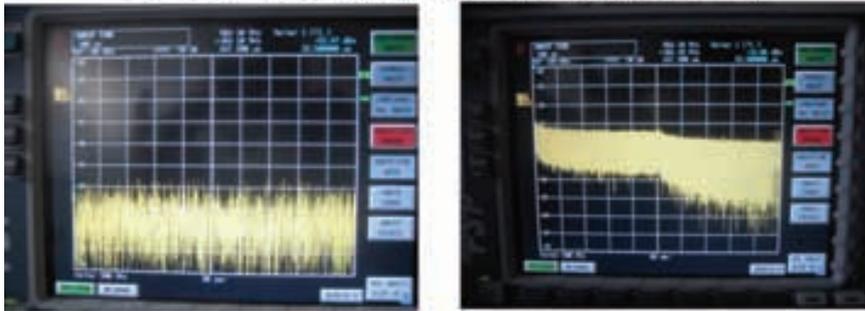


Bild 4: TES-Sensorchip der PTB für ein Quantenkalorimeter

5.6.2007 18:15 first beam stored (approx. 3  $\mu\text{A}$ )  
 Stripline-Signal with and without stored beam



Synchrotron radiation monitored with photo diode

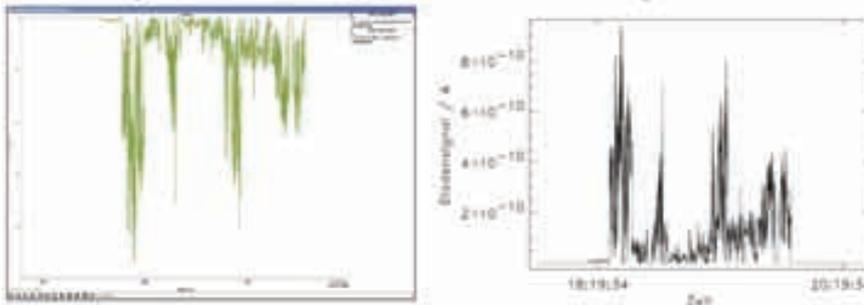


Bild 5: Dokumentation der erstmaligen Speicherung eines Elektronenstrahls in der Metrology Light Source in Berlin-Adlershof

### Metrologie mit Synchrotronstrahlung

Der Aufbau und die Inbetriebnahme der Metrology Light Source (MLS), des Niederenergie-Elektronenspeicherrings der PTB in Berlin-Adlershof, haben die erwarteten großen Fortschritte gemacht. Am 5. Juni wurde ein erster Elektronenstrahl von 3  $\mu\text{A}$  gespeichert (Bild 5). Am 13. Juni konnte die Betriebsvereinbarung für die MLS mit der BESSY GmbH unterzeichnet werden (Bild 6), in deren Rahmen der Speicherring im Routinebetrieb aus dem Kontrollraum bei BESSY II gesteuert werden soll. Kürzlich konnten die Kollegen der BESSY GmbH, die den Aufbau

der MLS vorantreiben, berichten, dass der geforderte Elektronen-Energiebereich von 200 MeV bis 600 MeV, die Strahllebensdauer, der Strahlquerschnitt und die Strahlstabilität ihre geforderten Werte bereits vorzeitig erreicht haben. Die Stromstärke der kreisenden Elektronen liegt inzwischen bei knapp der Hälfte des Sollwerts und verbessert sich stetig, sodass einem Nutzerbetrieb in der vorgesehenen Anlaufphase im kommenden Jahr nichts mehr im Wege stehen dürfte. Außer zur Einhaltung des Zeitplans kann man unseren Partnern von BESSY auch zur Einhaltung des Kostenrahmens wirklich gratulieren.

Bild 6: Prof. Göbel und Prof. Jaeschke nach der Unterzeichnung der Betriebsvereinbarung für die Metrology Light Source.



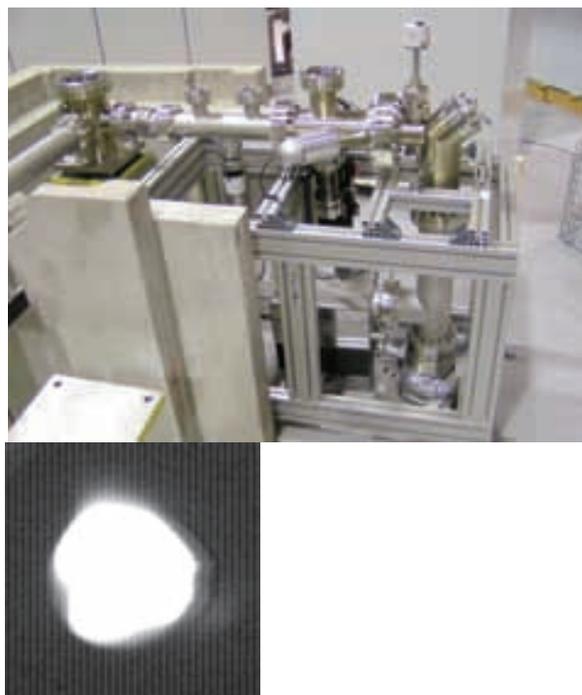
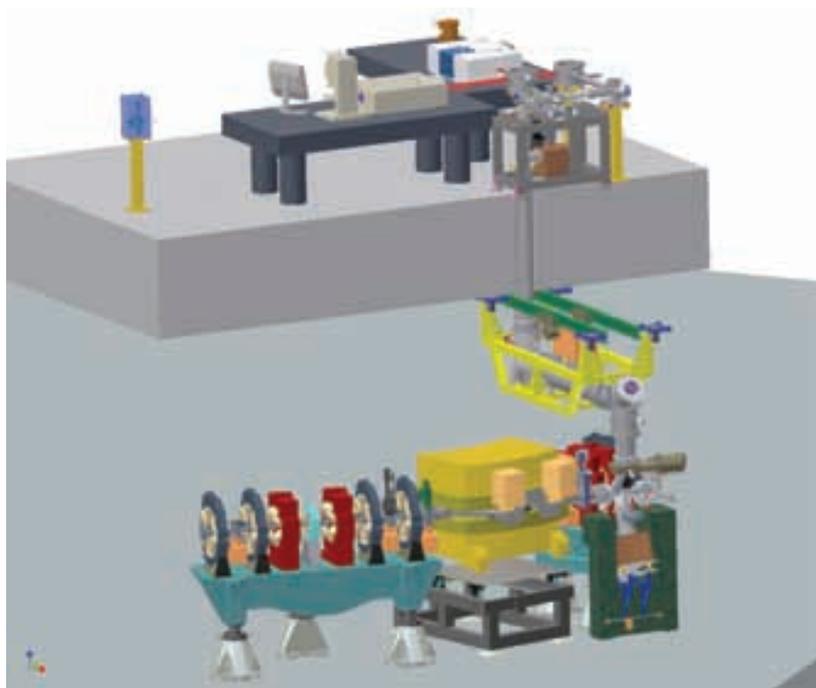


Bild 7: Das erste Infrarot-Strahlrohr an der Metrology Light Source im Probebetrieb

Parallel zum Speicherring der MLS werden von der PTB die zugehörigen Strahlrohre aufgebaut. Am 29. August war am Infrarot-Strahlrohr das erste „Licht“ zu sehen (Bild 7). Die messtechnische Ausstattung dieses Strahlrohrs ist derzeit in Arbeit. Dasselbe gilt auch für das sog. Weißlicht-Strahlrohr. Ein zweites IR-Strahlrohr und das THz-Strahlrohr werden im kommenden Jahr folgen.

An den traditionellen Strahlrohren der PTB am Speicherring BESSY II in Berlin-Adlershof musste parallel dazu die Forschung möglichst unbeeinträchtigt weitergehen. Neben der schon mehrfach beschriebenen At-Wavelength-Charakterisierung von optischen Komponenten für die EUV-Lithographie liegt im Röntgenbereich ein Schwergewicht weiterhin im Gebiet der Oberflächenanalytik, u. a. bei der Untersuchung des Ergebnisses der Reinigung von Halbleiter-Wafer-Oberflächen und ggf. von Rückständen aus diesen Reinigungsprozeduren mit Hilfe der referenzprobenfreien Röntgenfluoreszenzanalyse. Außerdem wurde der Einsatz der im sichtbaren und UV-Spektralbereich wohl etablierten Kryoradiometrie bis in den Röntgenbereich vorangetrieben. Dabei ist es ein schwieriges Unterfangen, die energiereiche Strahlung (bis 60 keV) im Hohlraumabsorber vollständig zu absorbieren, um den Vergleich mit der elek-

trisch substituierten Energie mit geringer Unsicherheit von unter 1 % durchführen zu können.

Für die Anwendung in der Medizin wurde zusammen mit den industriellen Partnern Bayer Schering Pharma, Siemens und anderen ein Modul zur Konzentration und Monochromatisierung von Röntgenstrahlung zur Therapie von Tumoren entwickelt. In diesem Projekt oblag der PTB die räumlich und spektral aufgelöste Radiometrie zur Bestimmung der lokalen Dosiserhöhung.

### **Metrologie für die Weltraumforschung**

Traditionell nutzt die PTB ihre messtechnischen Möglichkeiten in der Radiometrie für die Unterstützung von astronomischen und Weltraummissionen auf höchstem metrologischen Niveau. Quantitative Untersuchungen der Sonnenaktivität haben u. a. große Relevanz für die Vorhersage der Klimaentwicklung auf unserem Planeten.

Dieses Jahr wurden in Kooperation mit dem Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos verschiedene Strahlungsempfänger untersucht und charakterisiert, die in Filterradiometern des PREMOS-Instruments (Bild 8) zum präzisen Monitoring der Sonnen-

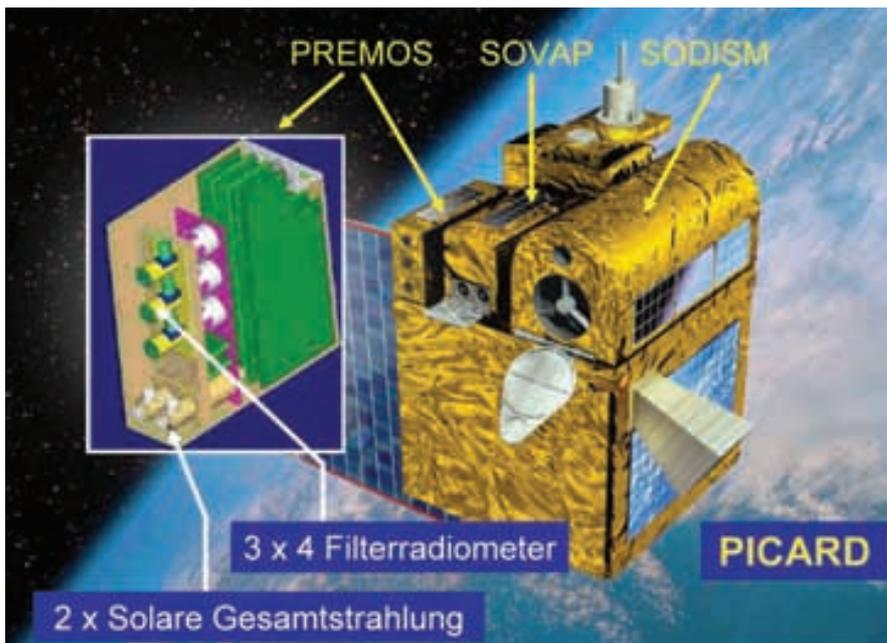


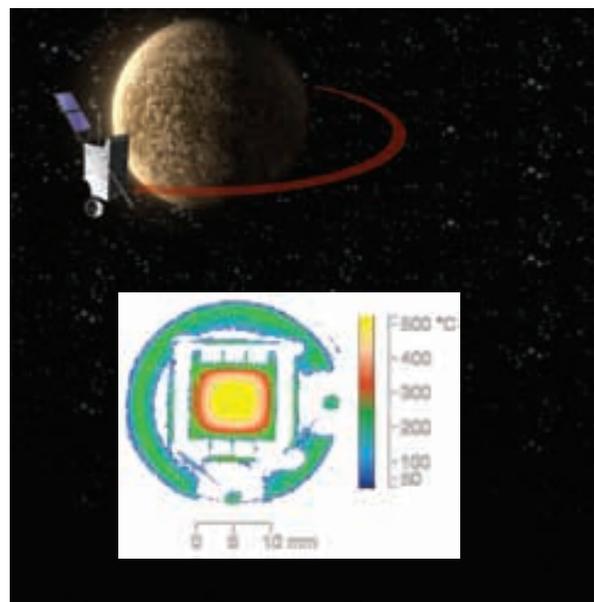
Bild 8: Das PREMOS-Instrument der Satellitenmission PICARD zur Messung der Sonnenaktivität im Ultravioletten

aktivität im Ultravioletten eingebaut und mit dem französischen Mikrosatelliten PICARD in den Orbit gebracht werden sollen. Im VUV-Bereich konnten in Zusammenarbeit mit dem Royal Observatory of Belgium die ESA-Instrumente LYRA der PROBA-2-Mission und SOLSPEC für das Columbus-Modul der ISS radiometrisch charakterisiert werden. Für eine weitere „cornerstone“-ESA-Mission, die zum Merkur geschickt werden soll, hat die PTB einen Miniatur-Infrarotstrahler (Bild 9) thermographisch untersucht. Er wird zur Kalibrierung der orts aufgelösten Strahlungsthermometrie von BepiColombo sowohl pre-flight als auch in-flight benötigt, mit der die Oberflächentemperatur des Planeten im Bereich von  $-150\text{ °C}$  bis  $450\text{ °C}$  bestimmt werden soll.

Mit einem monochromatischen Röntgen-Nadelstrahl wurde die Leistungsfähigkeit neuartiger kompakter Spiegel für ein Teleskop der geplanten Röntgen-Mission XEUS der ESA untersucht. Mit Hilfe eines neuen referenzdetektor-gestützten Verfahrens wurden im Rahmen einer weiteren Forschungskooperation mit der ESA und dem SRON energiedispersive Röntgen-Detektoren kalibriert.

Bild 9: Thermographische Charakterisierung eines Miniatur-Infrarotstrahlers für die BepiColombo-Mission der ESA zum Merkur

Neben den zahlreichen gemeinsamen Projekten mit der ESA wurde die Zusammenarbeit mit dem Institut für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart intensiviert. Hier wurde ein Kooperationsvertrag zum Thema „Metrologie in der Weltraumfahrt“ abgeschlossen, der den Rahmen für wissenschaftlichen Informations- und Erfahrungsaustausch, gemeinsame Forschungsprojekte, die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und ein entsprechendes Lehrangebot sowie die wechselseitige Nutzung von Einrichtungen liefert.



### Thermometrie

Temperatur-Fixpunkte sind Stützstellen jeder Temperaturskala. Das Ziel ist hierbei, die Bedingungen zu ermitteln, unter denen man die Fixpunkt-Temperatur für einen betrachteten Phasenübergang eines Materials exemplarunabhängig angeben kann. Deshalb muss man die Abhängigkeiten von Materialchargen, Verunreinigungen, Kristallisationsbedingungen, Tiegelmaterialien usw. aufklären und bei der Herstellung beachten. Dazu dienen in europäischer Zusammenarbeit fortgesetzte Untersuchungen von Verunreinigungseinflüssen auf die Schmelz- und Erstarrungstemperaturen von hochreinen Metallen unter Zuhilfenahme der exzellenten Analysemethoden der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). In einem anderen Projekt wurde die Kristallisationsgeschwindigkeit an den Tripelpunkten kryogener Gase und deren Einfluss auf die Temperatur unter die Lupe genommen. Durch geeignete Prozessführung konnte die Unsicherheit der Temperaturmessungen erheblich verringert werden.

Die Temperaturwerte von Fixpunkten müssen durch primäre Thermometrie ermittelt und den Phasenübergangsplateaus zugeordnet werden. Im Bereich der Schmelz- und Erstarrungspunkte von Metallen eignet sich hierfür die absolut-radiometrische Bestimmung der Temperaturen von Hohlraumstrahlern, die mit den Fixpunktmaterialien bestückt sind. Um im Bereich bis hinab zu 400 °C solche Bestimmungen durchführen zu können, benötigt man Filtrerradiometer mit Zentralwellenlängen im nahen Infrarot. Dazu verwendet man InGaAs-Detektoren, deren Eignung für metrologische Zwecke im Gegensatz zu den bei kürzeren Wellenlängen üblichen Silicium-Detektoren erst genau untersucht werden muss. So konnten die Temperaturen des Al- und des Zn-Fixpunkts radiometrisch bestimmt werden, die gute Übereinstimmung mit Gasthermometermessungen zeigen, die dort die internationale Temperaturskala repräsentieren.

Der europäische Teil des weltweiten Boltzmann-Projekts zur Neudefinition der SI-Basiseinheit Kelvin, der von der PTB koordiniert wird, war im Rahmen des von der EU geförderten Vorläufers des European Metrology Research Programme mit der Bezeich-

nung „iMERA plus“ erfolgreich und wird in den kommenden drei Jahren gefördert. Auch die vorbereitenden Arbeiten am dielektrischen Gasthermometer gehen planmäßig voran. Die Ergebnisse der Messungen mit der zweiten Generation des Geräts konnten die vor zehn Jahren durchgeführten Messungen bestätigen und die Unsicherheit um einen Faktor 2 verringern (Bild 10). Dies nährt die Hoffnung auf die Erreichbarkeit der für die Kelvin-Neudefinition angestrebten Unsicherheit am Wassertripelpunkt.

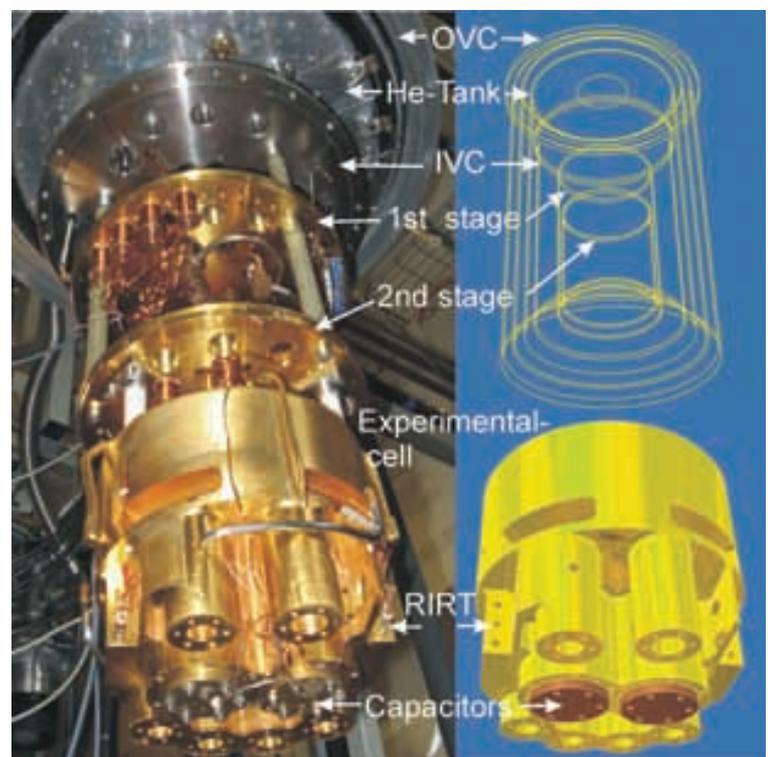
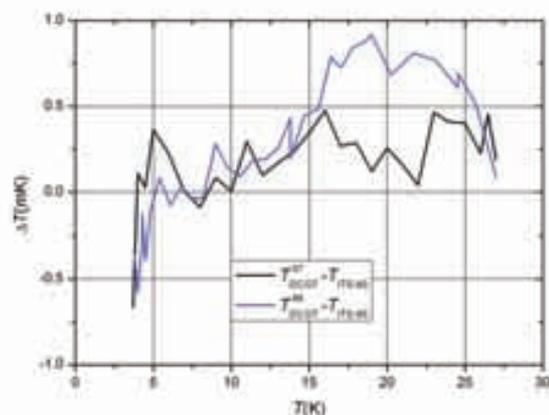


Bild 10: Verbesserte Ergebnisse von Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometermessungen bei tiefen Temperaturen



Bild 11: Zweite Kernentmagnetisierungskühlstufe aus reinem Platin für die Kühlung auf Temperaturen nahe 1  $\mu$ K.

Um Temperaturen in der Nähe von 0,000 001 Kelvin zu erreichen, wurde eine zweite Kernentmagnetisierungsstufe aus reinem Platin (Bild 11) fertig gestellt, die in langwierigen Versuchen zu Beginn des kommenden Jahres getestet wird.

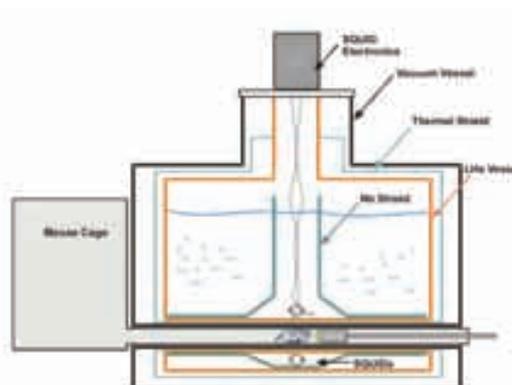
Im Bereich der Tieftemperaturtechnologie ist die PTB weltweit führend bei der Entwicklung von rauscharmen und störungsunempfindlichen SQUID-Schaltungen einschließlich schneller Ausleseelektroniken, die sich für den Einsatz in den Bereichen der Thermometrie, der Strahlungsdetektion, der elektrischen Messtechnik mit Kryostromkomparatoren und des Biomagnetismus eignen. Im

Rahmen eines EU-geförderten Vorhabens „Biodiagnostics“ hat die PTB SQUID-Sensoren entwickelt, die gegenüber äußeren Magnetfeldern unempfindlich sind. Sie können daher in neuen medizinischen Diagnoseverfahren eingesetzt werden, die mit dem Begriff Low-Field-NMR bezeichnet werden. Außerdem wurde mit DFG-Förderung ein Messsystem für die Kleintier-Magnetokardiographie (Bild 12) entwickelt und in Zusammenarbeit mit dem Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin gezeigt, dass unter üblichen Laborbedingungen hochempfindliche magnetokardiographische Messungen an Mäusen durchgeführt werden können.

### Materialeigenschaften und Nanoanalytik

Um mit Hilfe von Röntgenfluoreszenzanalyse die elementaren Bestandteile von Schichten auf Oberflächen zu identifizieren und zu quantifizieren, benötigt man die entsprechenden atomaren Fundamentalparameter mit kleinen Unsicherheiten. Mit Hilfe eines neuen wellenlängen-dispersiven Spektrometers im weichen Röntgengebiet konnten bei BESSY II diese Fundamentalparameter für leichte Elemente bestimmt werden. Ebenso bei BESSY II wurden bis zu mehrere 100 nm tief „vergrabene“ Schichten mit Röntgen-Emissionsspektrometrie untersucht und ihr chemischer Bindungszustand aufgeklärt. Durch Reflexions- und Transmissionsmessungen im VUV-Bereich wurde der Einfluss von Umgebungsbedingungen auf die Kontamination von Linsenoberflächen untersucht. Dies ist besonders wichtig für optische Komponenten für die 193-nm-Lithographie.

Bild 12: Ein sog. Kleintier-Scanner zur Magnetokardiographie an Mäusen mit rauscharmen PTB-SQUIDs



Aufgrund ihrer apparativen Möglichkeiten der Röntgenspektrometrie und -reflektometrie und der Expertise der Mitarbeiter ist die PTB seit Jahresfrist mit acht weiteren Forschungseinrichtungen und drei Halbleiterschaltungsherstellern Partner in einem europäischen „Analytical Network for Nanotech“ (ANNA), das im 6. EU-Rahmenprogramm gefördert wird.

### Durchfluss und Energietransport

In Zeiten geforderter Energieeinsparung ist die genaue, aber auch kostengünstige Überwachung der Durchflüsse und Temperaturdifferenzen in Fernwärmenetzen ein Gebot der Stunde. Dazu benötigt man sowohl die Kenntnis des physikalischen Verhaltens der verwendeten Sensoren und Zähler als auch die Fähigkeit zur numerischen Simulation der Strömungsverhältnisse am Ort derselben. Dazu wurden zum einen für Untersuchungen zur Abnutzung von konventionellen Wärmemesszählern neue beschleunigte Messverfahren entwickelt, die in die entsprechenden Normen eingehen werden. Zum anderen wurde, gefördert durch das ProInno-Programm, ein laseroptischer Volumenstromsensor (Bild 13) entwickelt, der durch starke Störungen des Strömungsprofils oder ausgeprägte zeitliche Schwankungen nur unwesentlich beeinflusst wird und eine Unsicherheit von weniger als 0,2 % erreicht. Dies sind zwei aktuelle Beispiele, mit denen die PTB ihre führende Rolle bei der messtechnischen Kontrolle in Europa bei der Verteilung und Abrechnung von Fernwärme und -kälte unter Beweis gestellt hat.

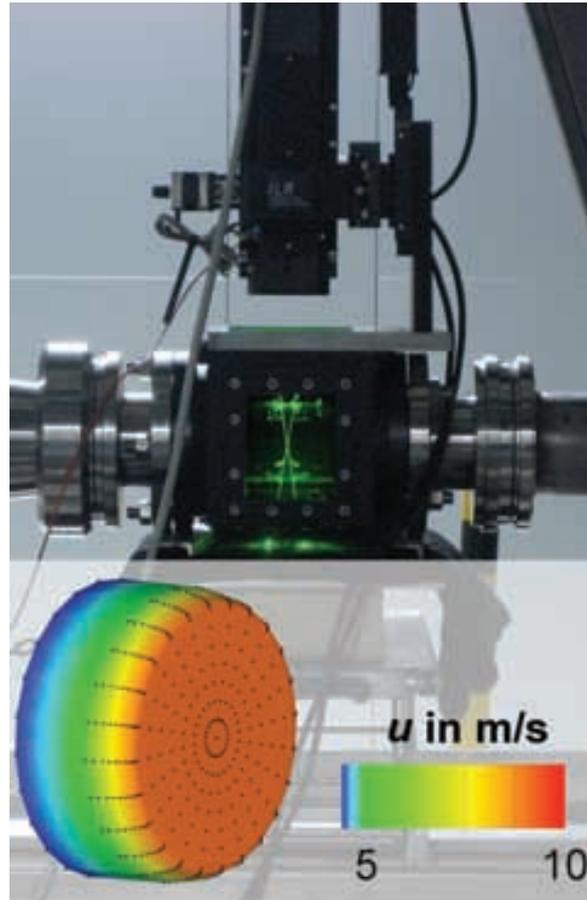


Bild 13: Laseroptischer Volumenstromsensor für Fernwärmenetze und Strömungsprofil

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Metrology Light Source (MLS)

*Erfolgreiche Inbetriebnahme:* Der Aufbau des von der BESSY GmbH für die PTB geplanten dedizierten Elektronenspeicherrings MLS wurde voll im Kostenrahmen termingerecht im Februar 2007 abgeschlossen. Das BESSY-MLS-Team konnte noch im Januar das als Injektor eingesetzte 100-MeV-Mikrotron erfolgreich in Betrieb nehmen, am 5. Juni 2007 wurden erstmals Elektronen im Speicherring gespeichert. Auch das Rampen der Energie der gespeicherten Elektronen von 100 MeV auf 600 MeV gelang problemlos im August 2007. (G. Ulm, FB 7.1, [gerhard.ulm@ptb.de](mailto:gerhard.ulm@ptb.de))

*Elektronenstrahldiagnostik:* Die Einrichtung zur Messung kleiner und kleinster gespeicherter Elektronenströme wurde erfolgreich in Betrieb genommen. Das Messprinzip basiert auf der Leistungsmessung der emittierten Synchrotronstrahlung mit Photodioden. Die Messeinrichtung im MLS-Bunker hat sich als äußerst hilfreiche Diagnostik für den Nachweis kleiner gespeicherter Elektronenströme während der Inbetriebnahme der MLS bewährt. (R. Klein, FB 7.1, [roman.klein@ptb.de](mailto:roman.klein@ptb.de))

*Erste Messungen der Elektronenenergie:* Mit der Methode der Compton-Rückstreuung von Laserphotonen wurden erste präzise Messungen der Energie der gespeicherten Elektronen an der MLS im 400-MeV-, 500-MeV- und 600-MeV-Betrieb durchgeführt. Die Bestimmung der Elektronenenergie mit kleiner Unsicherheit ist eine Grundvoraussetzung zur Nutzung der MLS als berechenbare primäre Strahlungsquelle. (R. Klein, FB 7.1, [roman.klein@ptb.de](mailto:roman.klein@ptb.de))

*Erstes Licht am Weißlicht-Strahlrohr:* Das Strahlrohr zur Nutzung der undispergierten berechenbaren Synchrotronstrahlung der MLS wurde aufgebaut und in Betrieb genommen. Erstes „Licht“ aus dem homogenen Feldbereich eines Dipolmagneten wurde an diesem „Weißlichtstrahlrohr“ in der Experimentierhalle des Willy-Wien-Laboratoriums beobachtet. (R. Klein, FB 7.1, [roman.klein@ptb.de](mailto:roman.klein@ptb.de))

*... und im IR-Strahlrohr:* Der Aufbau des dedizierten Strahlrohres zur Nutzung von IR-Strahlung eines Dipolmagneten der MLS wurde Mitte 2007 abgeschlossen. Ende August konnte das erste Licht am zugehörigen IR-Messplatz auf dem MLS-Bunker beobachtet werden. Das Strahlrohr wird die metrologische Nutzung von Synchrotronstrahlung vom nahen IR bis zum fernen IR inklusive des THz-Bereiches ermöglichen. (R. Müller, FB 7.1, [ralph.mueller@ptb.de](mailto:ralph.mueller@ptb.de))

#### Ausdehnung der Kryoradiometrie in den Bereich harter Röntgenstrahlung

Die Kryoradiometrie, die im sichtbaren Spektralbereich die Basis der detektorgestützten Radiometrie ist, war im Laboratorium der PTB bei BESSY II auch in den VUV- und Röntgenbereich bis zu Photonenenergien von etwa 10 keV ausgedehnt worden. Die bei höheren Energien einsetzende Transmission des Strahlungsabsorbers verhinderte aber den Einsatz bei härterer Strahlung. Mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen wurde nun ein neuer Absorber entwickelt, der bis zu Photonenenergien von etwa 60 keV vollständige Absorption der Strahlung gewährleistet. Am Wellenlängenschieber-Strahlrohr bei BESSY II, an dem monochromatisierte Synchrotronstrahlung bis 60 keV zur Verfügung steht, können nun Detektoren gegen das Kryoradiometer mit relativen Unsicherheiten von unter 1 % kalibriert werden. (M. Krumrey, FB 7.1, [michael.krumrey@ptb.de](mailto:michael.krumrey@ptb.de))

#### Teilchen oder Welle?

In Kooperation zwischen der PTB, dem Ioffe-Institut in St. Petersburg und dem DESY wurden im Fokus eines EUV-Multilayer-Spiegels am neuen Freie-Elektronen-Laser FLASH in Hamburg Bestrahlungsstärken bis zu  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> bei der EUV-Photonenenergie von 93 eV realisiert und gemessen sowie Photoionisationsexperimente an Xenon-Atomen durchgeführt. Obwohl im Spektralbereich des klassischen Photoeffektes erzielt, lassen sich die überraschenden Ergebnisse der bis zu 21-fachen Ionisation von Xenon, wozu die Energie von mehr als 50 EUV-Photonen notwendig ist, nicht mehr eindeutig im Teilchenbild des Lichtes erklären. (M. Richter, FB 7.1, [mathias.richter@ptb.de](mailto:mathias.richter@ptb.de))

### VUV-Sonnenradiometrie

In Kooperation mit dem Royal Observatory of Belgium und dem Belgian Institute for Space Aeronomy konnten mit den im PTB-Laboratorium am Speicherring BESSY II entwickelten Methoden der Radiometrie mit Synchrotronstrahlung im Spektralbereich von VUV-Strahlung die ESA-Instrumente LYRA (PROBA-2-Mission) und SOLSPEC (Columbus-Modul der ISS) charakterisiert werden. Ferner wurde die für die SOHO-Mission Mitte der neunziger Jahre entwickelte CDS-Kalibrierquelle rekali­briert. Damit wurden die vorher am Rutherford Appleton Laboratory durchgeführten Charakterisierungen der NASA-Instrumente SERTS I&II, MOSES und EUNIS erfolgreich validiert. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

### Detektoren für die solare UV-Strahlung

In Kooperation mit dem Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos (PMOD) hat die PTB verschiedene Strahlungsempfänger eingehend untersucht, die das PMOD für UV-Filterradiometer seines PREMOS-Instruments (Precision Monitoring of Solar variability) in Aussicht genommen hatte, um während der geplanten französischen Mikrosatellitenmission PICARD den für die Atmosphärenchemie besonders wichtigen UV-Anteil der Sonnenstrahlung erheblich genauer zu bestimmen als bisher. Abschließend kalibriert die PTB jetzt die Filterradiometer, die das PMOD mit den für diesen Zweck bestgeeigneten Detektoren aufgebaut hat. (L. Werner, P. Meindl, FB 7.2, lutz.werner@ptb.de)

### Neues Strahlrohr zur Untersuchung von Si-Wafer-Röntgenoptiken für die Astrophysik

Für die geplante Röntgenmission XEUS (X-ray Envolving Universe Spectroscopy) der europäischen Raumfahrtagentur ESA werden Röntgenspiegel mit großer effektiver Fläche ( $\sim 10 \text{ m}^2$ ) und extrem kleinen Formabweichungen bei gleichzeitig geringem Eigengewicht benötigt. An Stelle von bisher üblichen langen Spiegeln soll ein Stapel von kleineren Spiegelflächen verwendet werden. Mit hochpolierten Si-Wafern, die – mit Rippen an der Rückseite versehen – gestapelt werden können, lassen sich sehr steife und kompakte Spiegel realisieren. Die Qualität dieser Spiegel wird an einem neuen Strahlrohr bei BESSY II mit einem monochromatischen Nadelstrahl bei der festen Photonenenergie von 2,8 keV untersucht. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

### Neue Methode zur Kalibrierung von Zähl-detektoren

Die Kalibrierung von zählenden (energiedispersiven) Röntgendetektoren mit Synchrotronstrahlung am Speicherring BESSY II erforderte bisher den Sonderbetrieb des Speicherrings zur reproduzierbaren Einstellung geringer Photonenflüsse in der Größenordnung von nur  $10^3 \text{ s}^{-1}$ . Mit einem neuen Messstand unter Verwendung eines kalibrierten Zähl­detektors als Referenzdetektor konnte diese Einschränkung aufgehoben werden. Es wurden erfolgreich energiedispersive Detektoren im Rahmen der Kooperationen mit der ESA und dem SRON kalibriert. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

### Erste hochaufgelöste Fundamentalparameter-Messungen im Bereich weicher Röntgenstrahlung

Für die Bestimmung atomarer Fundamentalparameter (FP) im weichen Röntgenbereich mit kleinen Unsicherheiten wurde ein neues wellenlängen-dispersives Spektrometer erfolgreich in Bezug auf seine Nachweiseffizienz und sein Ansprechverhalten charakterisiert. Damit konnten bei BESSY II erste für die referenzfreie Röntgenfluoreszenzanalyse von leichten Elementen und Übergangsmetallen wichtige FP bestimmt werden. (B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

### Charakterisierung vergrabener Nanoschichten

Im Rahmen eines DFG-Vorhabens zur Nanoschicht-Speziation mit der TU Darmstadt wird eine Methode entwickelt, die Röntgenemissionspektrometrie mit Untersuchungen der Nahkantenabsorptionsfeinstruktur (GIXRF-NEXAFS) kombiniert, um einen Zugang zur zerstörungsfreien Charakterisierung von bis zu mehrere 100 nm tief vergrabene Nanoschichten bezüglich ihres chemischen Bindungszustands zu ermöglichen. Die Arbeiten werden im PTB-Laboratorium bei BESSY II unter Verwendung von Undulatorstrahlung durchgeführt. (B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

### Kooperation mit dem DESY zur THz-Metrologie

Um durch quantitative THz-Spektroskopie an kohärenter Synchrotron- und Übergangsstrahlung wichtige Informationen zur Ladungsverteilung in sehr kurzen, hochenergetischen Elektronenpaketen für den Betrieb eines Freie-Elektronen-Lasers zu erhalten, kooperieren das DESY und die PTB bei der Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von breitbandigen THz-Empfängern mit berechenbarer Hohlraumstrahlung. Dazu wurde an der PTB ein THz-Hohlraumstrahler in Kombination mit genau gemessenen THz-Transmissionsfiltern in Betrieb genommen. Messungen an diesem Strahler ermöglichten auf der Grundlage des Planckschen Strahlungsgesetzes eine schnelle Bestimmung der Empfindlichkeit von pyroelektrischen THz-Empfängern über einen Spektralbereich von 50  $\mu\text{m}$  bis zu 570  $\mu\text{m}$ . Mit Messungen an Golayzellen und anderen photoakustischen Empfängern soll das Verfahren mit dem Ziel weiter entwickelt werden, Anwenden von THz-Strahlung eine schnelle und einfache Methode zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit von THz-Empfängern für die Strahlungsleistungsmessung zur Verfügung zu stellen. (J. Hollandt, FB 7.3, joerg.hollandt@ptb.de)

### Messung thermodynamischer Temperaturen mit Infrarot-Filterradiometern

In der PTB wurden erstmals neuartige Indium-Galliumarsenid-Filterradiometer mit Zentralwellenlängen im nahen Infrarot (1300 nm und 1550 nm) entwickelt und aufgebaut. Die spektrale Empfindlichkeit dieser Filterradiometer konnte mit einer relativen Standardunsicherheit von einigen  $10^{-4}$  bestimmt werden, wie es bisher nur für Silicium-Filterradiometer für Wellenlängen unter 1000 nm möglich war. Damit wurden an dem als Doppelwärmerohr-Hohlraumstrahler aufgebauten Planckschen Normalstrahler der PTB thermodynamische Temperaturen im Bereich der Fixpunkte Aluminium (660 °C) und Zink (419 °C) der Internationalen Temperaturskala von 1990 (ITS-90) mit Standardunsicherheiten von 30 mK bis 60 mK radiometrisch bestimmt. Die radiometrischen Messungen ermöglichen es, in diesem Temperaturbereich existierende Inkonsistenzen der gasthermometrischen Messung thermodynamischer Temperaturen mit einer unabhängigen Methode gezielt zu untersuchen und damit einen wichtigen Beitrag für eine verbesserte zukünftige Internationale Temperaturskala ITS-20XX zu leisten. (D. R. Taubert, FB 7.3, dieter.taubert@ptb.de)

### Zusammenarbeit der Bereiche Temperatur und chemische Analytik von PTB und BAM

Im Fachbereich 7.4 werden zurzeit verbesserte Temperaturfixpunkte zur Darstellung und Weitergabe der ITS-90 entwickelt. Die dominierende Unsicherheitskomponente ist der Einfluss von Verunreinigungen, deren quantitativer Nachweis eine Aufgabe an der Grenze des derzeit Machbaren ist. Der Fachbereich I.1 der BAM ist weltweit führend auf dem Gebiet der rückgeführten Spurenanalytik von Reinstmetallen. Daher wurde eine Kooperation vereinbart und eine gemeinsame Doktorandin mit den erforderlichen Forschungsarbeiten betraut. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

### **Einfluss der Kristallisationsbedingungen auf die Messung der Tripelpunkttemperatur kryogener Gase**

Im Tieftemperaturbereich stützt sich die Internationale Temperaturskala ITS-90 auf die Tripelpunkte der kryogenen Gase Ar, O<sub>2</sub>, Ne und H<sub>2</sub> als definierende Fixpunkte. Nach Präparation mit unterschiedlichen Einfriereschwindigkeiten wurde die Bedeutung eines gestörten Kristallwachstums für die anschließenden Schmelzplateaus erkannt. Dadurch können thermometrisch erwünschte Eigenschaften gezielt erzeugt werden, wie z. B. im Falle von Ar ein flacheres Plateau oder bei Ne ein schnellerer Temperatureausgleich nach der periodischen Zufuhr der Schmelzwärme. Im Endergebnis können die thermischen Temperaturmessfehler signifikant verringert werden. (L. Wolber, B. Fellmuth, FB 7.4, lutz.wolber@ptb.de)

### **Neue Temperaturskala im Tieftemperaturbereich**

Mit der zweiten Generation des Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometers wurde die bisherige Basis der Temperaturskala der PTB im Bereich zwischen 4 K und 26 K bestätigt und die Unsicherheiten um den Faktor zwei verringert. Zusätzlich zur thermodynamischen Temperatur konnten neue Daten für die Realgaseigenschaften von <sup>4</sup>He gewonnen und mit neuen theoretischen Werten verglichen werden. Durch die Erweiterung des Messbereichs bis 2,4 K und Messung sowohl mit <sup>3</sup>He als auch mit <sup>4</sup>He ergaben sich neue interessante Einblicke in das Tieftemperaturverhalten der beiden Isotope. Der erfolgreiche Abschluss dieser Arbeiten war der Prüfstein für das Boltzmann-Projekt am Wassertripelpunkt und lässt große Hoffnungen für die Neubestimmung der Boltzmann-Konstanten zu. (Ch. Gaiser, B. Fellmuth, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

### **Elektronischer und Kernmagnetismus in Platin**

Platin ist ein geeignetes Modellsystem zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen elektronischem Magnetismus und Kernmagnetismus und darüber hinaus die zur Zeit einzige Thermometriesubstanz zur zuverlässigen Messung von Temperaturen unterhalb von 0,001 K. An Proben mit isotonenangereichertem <sup>195</sup>Pt (93,52 %) und einer Fe-Dotierung von 100 ppm wurden Messungen der Wechselfeldsuszeptibilität, der spezifischen Wärme und der Kernspinresonanz bei Gleichgewichtstemperaturen bis unterhalb 100 µK und in Magnetfeldern bis zu 8 T durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die magnetischen Fe-Momente benachbarte 5d-Leitungselektronen polarisieren und in Wechselwirkung mit diesen „giant magnetic moments“ bilden, die im Grundzustand Spinglasverhalten zeigen. Die Polarisationsfelder der Riesenmomente führen zu einer Erhöhung der Wärmekapazität des Kernspinsystems und beeinflussen die Relaxationsparameter in Kernspinresonanzexperimenten. (P. Strehlow, FB 7.5, peter.strehlow@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Radiometrische Charakterisierung eines Computertomographen**

In einem Verbundprojekts mit der Bayer Schering Pharma AG, der Siemens AG, dem Institute for Scientific Instruments und der Charité – Universitätsmedizin Berlin wurde ein röntgenoptisches Modul entwickelt, mit dem ein normalerweise zur Diagnostik eingesetzter Computertomograph auch für die Strahlentherapie verwendet werden kann. Das Modul monochromatisiert und konzentriert die Strahlung. Die PTB war für die räumlich und spektral aufgelösten radiometrischen Messungen mit und ohne Modul zuständig. Hieraus konnte die lokale Dosiserhöhung bestimmt werden. Durch die Applikation stark absorbierender Substanzen auf Jod- oder Gadolinium-Basis, die sich bevorzugt in Tumorzentren anlagern, kann eine weitere Dosiserhöhung erreicht werden. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

### SQUID-Sensorik für neue medizinische Diagnoseverfahren

Derzeit wird intensiv an neuartigen medizinischen Diagnoseverfahren für die Medizin gearbeitet, die auf empfindlicher Magnetfeldmesstechnik beruhen. In der PTB besteht langjährige Erfahrung beim Einsatz von SQUID-Messtechnik auf diesem Gebiet. Neue Verfahren wie z.B. die magnetische Kernresonanz bei kleinen Magnetfeldern (Low-Field NMR) oder die Magnetorelaxometrie (MRX) benötigen zur Signalerzeugung möglichst hohe Anregungsfelder zur Ausrichtung der magnetischen Momente der zu untersuchenden Proben, die mit den Magnetfeldsensoren gemessen werden sollen. Die bisher verfügbare SQUID-Messtechnik begrenzt den Einsatz von Anregungsfeldern sehr stark, da die Bauelementeparameter nach dem Anlegen derartiger Felder u.U. stark degradiert sind. Im Rahmen des EU-geförderten Vorhabens „Biodiagnostics“ zur Entwicklung neuer medizinischer Diagnoseverfahren unter Verwendung magnetischer Messtechnik hat die PTB neue SQUID-Sensoren entwickelt, die sich durch besonders hohe Störfestigkeit gegen magnetische Felder auszeichnen und deshalb sehr gut für magnetische Messmethoden geeignet sind, bei denen magnetische Felder zur Anregung der zu untersuchenden Proben verwendet werden. Die Sensoren können Magnetisierungsimpulsen mit hohen Flussdichten bis zu 1,5 mT ausgesetzt werden, ohne dass ihre hohe Empfindlichkeit beeinflusst wird. Die Sensoren sind im Rahmen einer Lizenzvereinbarung kommerziell über die Firma Magnicon erhältlich, die seit Oktober 2007 eine Zweigstelle in der PTB unterhält. (F. Ruede, FB 7.5, frank.ruede@ptb.de)

### Neues Kleintier-Magnetokardiographie-Messsystem mit Supraleitungssensorik

Im Rahmen eines DFG-geförderten Vorhabens wurde in Kooperation mit dem Kanazawa Institute of Technology, Japan, ein Kleintier-Magnetokardiographie-Messsystem entwickelt, das auf einem Flüssig-Helium-Kryostaten mit integrierter supraleitender Abschirmung basiert. Das zu vermessende Kleintier befindet sich in einer Warmbohrung innerhalb der supraleitenden Schirmung und ist von mehreren SQUID-Magnetometern zur Messung des biomagnetischen Feldes umgeben. Wird der Kryostat in der magnetisch geschirmten Kammer der PTB (BMSR-2) eingekühlt, verbleibt ein statisches Restfeld von weniger als einem Tausendstel des Erdfeldes innerhalb der Schirmung. Gemeinsam mit dem Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin in Berlin-Buch wurde gezeigt, dass mit diesem Messgerät auch unter üblichen Laborbedingungen hochempfindliche magnetokardiographische Messungen an Mäusen mit ausgezeichnetem Signal/Rausch-Verhältnis gemacht werden können. (T. Schurig, FB 7.5, thomas.schurig@ptb.de, L. Trahms, FB 8.2, lutz.trahms@ptb.de)

### Metrologie für die Wirtschaft

#### PTB-Beteiligung am EU-Vorhaben ANNA

Seit dem 1. Dezember 2006 fördert die EU im 6. Rahmenprogramm als Integrierte Infrastrukturinitiative das „Analytical Network for Nanotech“ (ANNA), an dem neben drei Halbleiterunternehmen neun europäische Forschungseinrichtungen, darunter die PTB, mitwirken. Gemeinsame Netzwerk- und Forschungsaktivitäten zielen dabei ab auf die Einrichtung eines transnationalen Zugangs zu den analytischen Instrumentierungen der beteiligten Partner in den Bereichen der Nanotechnologie, der Mikroelektronik und der Oberflächenwissenschaften. Die PTB bietet hierbei bei BESSY II Zugang zur synchrotronstrahlungsgestützten Röntgenspektrometrie und Röntgenreflektometrie. (B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

### **Kontamination optischer Oberflächen im VUV untersucht**

Bei der Charakterisierung optischer Komponenten für die 193-nm-Lithographie wurde der Einfluss von Luft- und Stickstoffumgebungen in verschiedenen Druckbereichen von Ultrahochvakuum bis Normaldruck auf die Kondensatbildung auf Oberflächen untersucht. Durch Transmissions- und Reflexionsmessungen mit VUV-Synchrotronstrahlung im PTB-Laboratorium bei BESSY II konnten Kontaminationen im Bereich einiger atomarer Monolagen detektiert werden, die sich zum Teil durch photochemische Prozesse an der Oberfläche erklären lassen. Dabei wurden auch verschiedene Reinigungsverfahren wie das UV-Brennen getestet. (A. Gottwald, FB 7.1, alexander.gottwald@ptb.de)

### **Metrologie für die EUV-Lithographie**

Die umfangreiche Unterstützung der europäischen Halbleiterindustrie bei der Entwicklung der Halbleiter-Lithographie mit Strahlung einer Wellenlänge von 13,5 nm im extremen UV (EUV) wurde fortgesetzt und erweitert. Derzeitige Arbeitsschwerpunkte sind die Entwicklung verbesserter Schichtsysteme für die Optiken der nächsten Gerätegeneration sowie Untersuchungen zur Lebensdauer der Optiken in Kooperation mit der Carl Zeiss SMT AG und dem Fraunhofer-Institut IOF als wichtigen Partnern sowie die Charakterisierung von Messgeräten für EUV-Strahlungsquellen auf der Basis der bei der PTB realisierten Empfindlichkeitsskala in Kooperation mit Xtreme technologies GmbH, Jena. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

### **Entwicklung von EUV-Photosensoren**

Derzeit besteht im Spektralbereich des EUV und DUV ein Mangel an langzeitstabilen Photosensoren für die industrielle Anwendung, aber auch für die PTB zur Verwendung als verlässliche Transfornormale. Im Rahmen einer wissenschaftlichen Kooperation mit dem ASML, Niederlande, und der Universität Delft unterstützt die PTB die Entwicklung von Halbleiter-Photosensoren für diese Spektralbereiche mit ihren Messmöglichkeiten zur Charakterisierung und Alterungstests. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

### **EUV-Scatterometrie als CD-Messverfahren für Photomasken evaluiert**

Im Rahmen des BMBF-Projektes ABBILD wurde gemeinsam mit dem AMTC Dresden und dem Zuse-Institut in Berlin sowie den PTB-Fachbereichen 4.2 und 8.4 die Evaluation der Scatterometrie als Methode zur Bestimmung von Linienbreiten auf EUV-Masken abgeschlossen. Es konnte eine sehr gute Korrelation der mit Scatterometrie gemessenen Linienbreiten zu den Daten der Standardmesstechnik des AMTC mit Rasterelektronen- und Rasterkraftmikroskopie gezeigt werden. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

### **Neues Modell für die cw-Schwelle eines OPOs**

Im Rahmen eines vom BMWi geförderten Kooperationsprojekts mit einem Berliner Unternehmen der Laserbranche entsteht derzeit eine neuartige Strahlungsquelle für die Radiometrie im infraroten Wellenlängenbereich bis 4  $\mu\text{m}$ , die auf optisch-parametrischer Frequenzaufspaltung in einem signalresonanten Ringoszillator in patentierter kompakter Dreiecksform beruht. Basierend auf vorausgegangenen Entwicklungsarbeiten zum Pulsbetrieb eines solchen OPOs hat die PTB ein Modell zur Vorhersage der cw-Schwelle aus Messungen des Zeitverlaufs der Pumpstrahlung im Pulsbetrieb aufgestellt und durch den erreichten cw-Betrieb für die verschiedenen Polungsperioden des verwendeten OPO-Kristalls verifiziert. (A. Steiger, R. Müller, FB 7.2, andreas.steiger@ptb.de)

### **Gasartabhängigkeit von Wärmeleitungs-vakuummeter**

Um veraltete Daten aus den 60er Jahren zur Gasartabhängigkeit von Wärmeleitungs-vakuummeter nach dem Pirani-Prinzip zu aktualisieren, wurden für vier verschiedene kommerzielle Typen dieser Vakuummeter und für neun Gasarten die Korrekturfaktoren bestimmt, die typenabhängig bis zu 20 % differieren. Aus einem Vergleich mit der kinetischen Gastheorie konnten obere Grenzen für die Akkommodationskoeffizienten der erhitzten Materialien (Wolfram und Silicium) angegeben werden. Den Anwendern von Pirani-Sensoren werden damit neue Richtwerte für die Gasartkorrektur an die Hand gegeben. (K. Jousten, FB 7.3, karl.jousten@ptb.de)

### Entwicklung eines praktikablen Hochtemperaturofens bis 3200 °C

Vermehrte Anwendungen von Strahlungsthermometern und Thermographiegeräten im Hochtemperaturbereich bis über 3000 °C erfordern adäquate Strahlungsquellen zur praktikablen Kalibrierung dieser Geräte. Die bisher für diesen Temperaturbereich kommerziell erhältlichen Strahler haben zwei entscheidende Nachteile. Zum einen erfordern sie eine hohes Maß an vorbereitenden und unterstützenden Maßnahmen vor und während des Betriebs. Zum anderen sind die strahlenden Öffnungen mit Durchmessern bis maximal 25 mm zu klein für die Kalibrierung bildgebender Systeme. Zusammen mit der KE Technologie GmbH, Stuttgart, entwickelt die PTB im Rahmen eines vom BMWi geförderten Projekts einen praktikablen Hochtemperaturstrahler mit einem strahlenden Durchmesser von 50 mm für Temperaturen bis 3200 °C. (J. Hartmann, FB 7.3, juergen.hartmann@ptb.de)

### Emissionsgradbestimmung an semitransparenten GaAs-Laserbarren

Die berührungslose Temperaturmessung an Halbleiterlasern ist mittlerweile ein wichtiges Diagnosewerkzeug – vor allem bei Hochleistungssystemen – geworden. Die Bestimmung der absoluten Temperatur im Lasermedium ist jedoch immer noch fehlerbehaftet aufgrund der unzureichenden Kenntnis des Emissionsgrades der dotierten Lasermaterialien. In Kooperation mit dem Max-Born-Institut wurde erstmals der Emissionsgrad von GaAs-Laserbarren bestimmt, wie sie auch in kommerziellen Lasern Verwendung finden. Die besondere Schwierigkeit lag darin, den Emissionsgrad an semitransparenten Proben mit sehr geringen Abmessungen zu bestimmen. (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)

### Messung von Temperaturdifferenzen bei Wärmehählern

Die Messung der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf erfolgt bei Wärmehählern mit Platin-Widerstandsthermometern in den jeweiligen Heizungsleitungen. Die Prüfungen dieser beiden Thermometer erfolgen durchweg in denselben Messeinrichtungen, woraus sich eine starke Korrelation bei den Messunsicherheiten der beiden Thermometer ergibt. Das komplexe Verfahren zur Paarung geeigneter Fühler wurde mathematisch sowohl analytisch als auch mit einem Monte-Carlo-Verfahren modelliert. Beide Verfahren kommen zu übereinstimmenden Ergebnissen: Die Berücksichtigung der Korrelation führt zu einer deutlichen Reduzierung der Messunsicherheit für die Temperaturdifferenz. Der notwendige messtechnische Aufwand zur Paarung der Fühler kann somit realistischer beurteilt werden. (E. Tegeler, FB 7.4, erich.tegeler@ptb.de)

### Praktisches Rauschthermometer für den Tieftemperaturbereich

Ein in Kooperation der Fachbereiche 7.4, 7.5 und der Universität Heidelberg entwickeltes magnetisches Fluktations-Rauschthermometer wurde erfolgreich für den praktischen Einsatz im Temperaturbereich von 4,2 K bis 0,007 K getestet. Das Thermometer besitzt eine lineare Kennlinie. Es ist kompakt, robust, schnell und ermöglicht eine sehr gute thermische Kopplung an die jeweiligen Messobjekte. Unterhalb 1 K betragen die Abweichungen von der aktuellen Temperaturskala PLTS-2000 weniger als 1 % für Messzeiten kleiner als 200 s. Das Thermometer wird zukünftig in Kooperation mit der Firma Magnicon kommerziell angeboten. (J. Engert, FB 7.4, jost.engert@ptb.de)

### Neue Beschleunigte Abnutzungsprüfung

In Kooperation mit dem Verband der deutschen Wasser- und Wärmehähler-Industrie wurde eine neue Beschleunigte Abnutzungsprüfung zur Prognose der Messbeständigkeitsdauer von Wärme- und Kältezählern entwickelt und validiert. Der neue Test, der Bestandteil der EN 1434 (2008) wird, erlaubt durch rasche Lastwechsel die Verkürzung der Prüfzeit von sechs Monaten mit dem herkömmlichen Verfahren auf nunmehr etwa zwei Wochen. (J. Rose, FB 7.6, juergen.rose@ptb.de)

### **Durchbruch bei der laseroptischen Volumenstrommessung**

Im Rahmen eines ProInno-Projektes wurde gemeinsam mit der Fa. Intelligent Laser Applications GmbH, Jülich, ein laseroptischer Volumenstromsensor entwickelt, validiert und patentiert. Der Sensor erlaubt durch direkte Integration des laseroptisch gemessenen Strömungsfeldes in einem Rohr die Bestimmung des Volumenstroms mit Unsicherheiten  $U(k = 2) < 0,2 \%$ , selbst wenn die Strömung im Rohr stark gestört und zeitlich variabel ist. (T. Lederer, FB 7.6, thomas.lederer@ptb.de)

### **Neue Herangehensweise zur Charakterisierung von Volumenstrom-Sensoren für Wärmemengenzähler**

Der Fachbereich 7.6 bietet zur Charakterisierung von Strömungszuständen erstmalig Computational-Fluid-Dynamic-(CFD-)Simulationen an, die mittels laseroptischer Verfahren und direkter Messungen des Sensors an den Normalmessanlagen der PTB validiert werden. Das Verfahren bietet Einblicke in die Wirkmechanismen der im Sensor verwendeten Messtechnik und liefert so wichtige Daten für Verständnis und Weiterentwicklung der Sensoren. (T. Lederer, FB 7.6, thomas.lederer@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

#### **PTB-NIST-Vergleiche im Bereich UV- und VUV-Radiometrie**

Im PTB-Laboratorium am Speicherring BESSY II wurden die Messungen zu zwei bilateralen Vergleichen zwischen der PTB und dem National Institute of Standards and Technology (NIST) auf dem Gebiet der Radiometrie mit Synchrotronstrahlung weitgehend abgeschlossen. Die Vergleiche beziehen sich auf die spektrale Strahlstärke von Deuteriumlampen und die spektrale Empfindlichkeit von Photodetektoren im Spektralbereich von UV- und VUV-Strahlung. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

### **CCPR-Pilotvergleich der spektralen Empfindlichkeit im EUV**

Die Unterstützung der europäischen Halbleiterindustrie bei der Entwicklung der Halbleiter-Lithographie mit Strahlung einer Wellenlänge von 13,5 nm im extremen UV (EUV) erfordert international anerkannte Messverfahren. Im Sommer 2007 wurden die jeweils mit Synchrotronstrahlung durchgeführten Messungen für den CCPR-Pilotvergleich der spektralen Empfindlichkeit im Spektralbereich von 11,5 nm bis 20 nm unter Leitung der PTB als Pilotlabor erfolgreich abgeschlossen. An dem Vergleich nahmen neben der PTB das NIST und das NMIJ teil. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

### **Vergleichsmessungen von Kupferfixpunktzellen unter Verwendung von Pt/Pd-Thermoelementen**

Die Erstarrungstemperaturen der Kupferfixpunkte (1085 °C) von 13 europäischen Metrologie-Instituten wurden im Rahmen eines Euromet-Projektes mit der PTB als Pilotlabor verglichen. Dazu wurden in der PTB zwei thermoelektrisch stabile Pt/Pd-Thermoelemente gefertigt und metrologisch untersucht. Die an den Kupferpunkten gemessenen Thermospannungen stimmten für 10 von 13 Teilnehmern innerhalb eines Temperaturäquivalents von  $\pm 0,06$  K überein. Für zwei weitere Teilnehmer konnte eine Temperaturkorrektur ermittelt werden. Die sehr gute thermoelektrische Stabilität der verwendeten Pt/Pd-Thermoelemente ( $\pm 0,02$  K am Kupferpunkt) unterstreicht die Eignung dieser Thermoelemente als Transfernormale für die Weitergabe von Temperaturen im Temperaturbereich bis mindestens 1100 °C. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

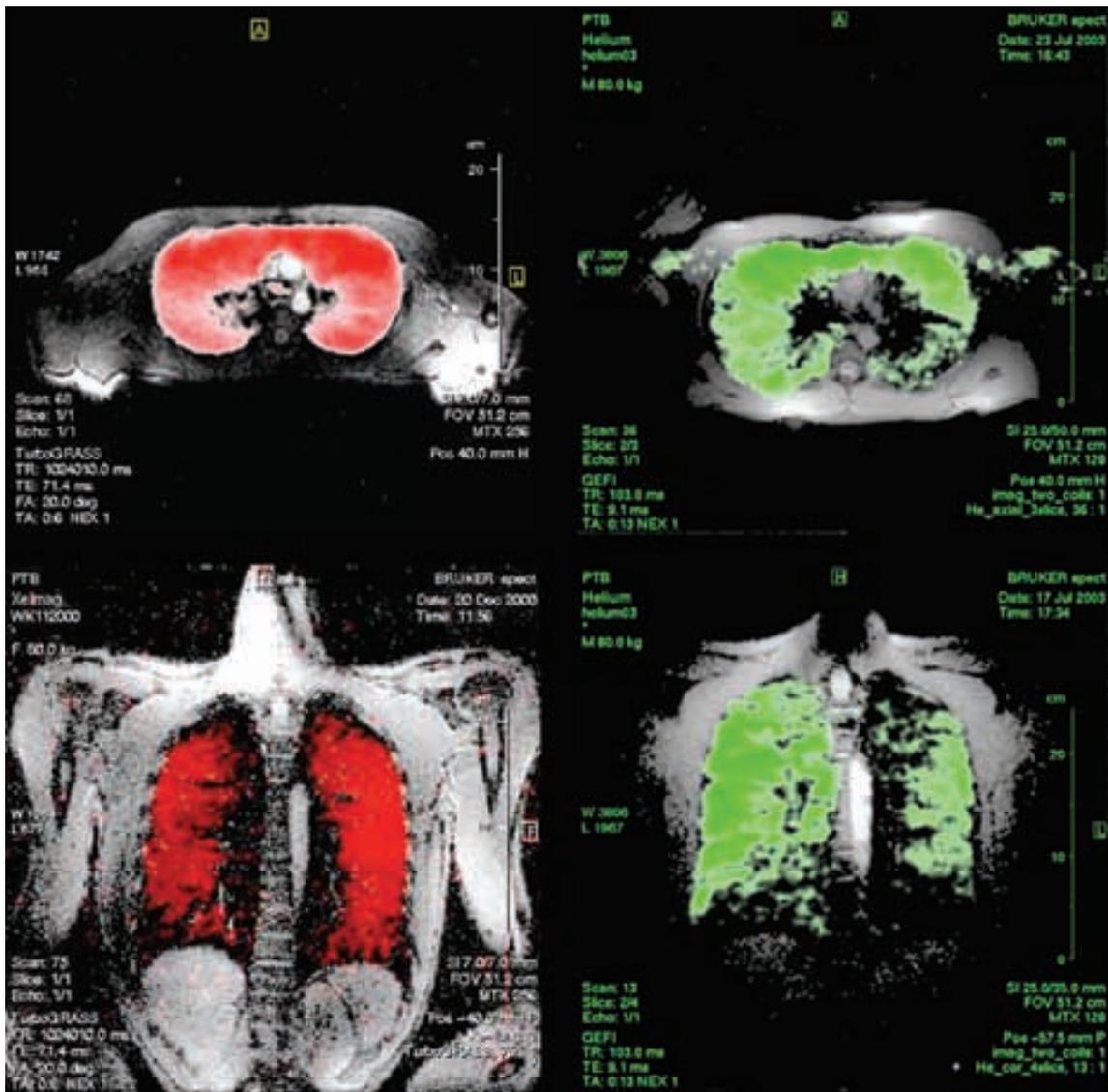
### Europäischer Ringvergleich an den Erstarrungspunkten von Aluminium und Silber

Die PTB war Pilotlabor des Schlüsselvergleichs EUROMET-T.K4, bei dem von 24 europäischen Staatsinstituten mit Hilfe von Standard-Platinwiderstandsthermometern die Temperaturen der jeweiligen lokalen Realisierungen der Temperaturfixpunkte von Al und Ag verglichen wurden. Am Al-Erstarrungspunkt war die Übereinstimmung in der Regel besser als 4 mK. Am Ag-Erstarrungspunkt traten erhebliche Probleme mit der Stabilität der verwendeten Hochtemperatur-Thermometer auf. Aufgrund redundanter Messungen war jedoch eine teilweise Korrektur der Drifterscheinungen möglich, so dass jetzt die Ergebnisse doch noch zur Bestätigung der CMC-Einträge der einzelnen Institute herangezogen werden können. Zukünftige Vergleichsmessungen am Ag-Erstarrungspunkt sollten jedoch bevorzugt mit Fixpunktzellen oder Au/Pt-Thermoelementen durchgeführt werden. (E. Tegeler, D. Heyer, FB 7.4, erich.tegeler@ptb.de)



# Medizinphysik und metrologische Informationstechnik

Berichte der Abteilungen



Abteilung

# Medizinphysik metrologisch Information

Zwei Ereignisse des vergangenen Jahres bedeuteten für die Abteilung entscheidende Weichenstellungen. Die im Rahmen des Konzepts 2016 vorgenommene Umsetzung von neuen Schwerpunktthemen führte zu deutlichen Verschiebungen der Gewichte im Aufgabenspektrum der Abteilung. Weiterhin hat die Ausschreibung der ersten Tranchen des European Metrology Research Programme (EMRP) im Rahmen von „ERA-NET Plus“ diesen Prozess der Neuausrichtung noch einmal erheblich verstärkt.

Die Voraussetzung dafür, in Zeiten des Umbruchs mit tragfähigen Zukunftskonzepten erfolgreich zu sein, ist die Gewissheit, von einem soliden Fundament ausgehen zu können. Im Folgenden soll daher exemplarisch für jeden Fachbereich der Abteilung ein Arbeitsthema beleuchtet werden, das über mehrere Jahre heranreife und inzwischen in vielfältiger Weise Früchte trägt.

**Titelbild**  
Lungenbildgebung mit den hyperpolarisierten Edelgasen  $^{129}\text{Xe}$  (links) und  $^3\text{He}$  (rechts). Oben: axiale Schnitte (Schichtdicke: 3 cm), unten: koronale Schichten (2 cm dick). Simultan aufgenommene anatomische Bilder mit standardmäßiger Protonen-MRT sind grau dargestellt.

## Konzept 2016

Bereits in den zurückliegenden Jahresberichten wurden als Schwerpunktthemen der Abteilung die metrologischen Beiträge für

- quantitative medizinische Bildgebung
- physikalisch-technische Charakterisierungen von Kontrastmitteln
- molekulare und zelluläre Medizin
- abteilungsübergreifende Forschungsprojekte und Dienstleistung auf den Gebieten mathematische Modellierung, Datenanalyse und Messunsicherheit sowie
- informationstechnische Fragen der Metrologie genannt.

Diese Schwerpunktsetzung ist im Rahmen des Konzepts 2016 bestätigt worden. Damit eine entsprechende Verstärkung weitestgehend ressourcenneutral umgesetzt werden konnte, sind die Aufgabengebiete „Metrologie der Analog-Digital-Umsetzung“ und „Entwicklung neuer Normale für Messtechnische Kontrollen gemäß Medizinproduktebetriebsverordnung“ aufgegeben worden.

Eine weitere Maßnahme zur Unterstützung der Neuausrichtung war der Transfer des Arbeitsgebietes „Tonometrie“ an das Tschechische Metrologieinstitut (CMI). Dies kann als ein gelungenes Musterbeispiel für die Verwirklichung der immer wieder geforderten Arbeitsteilung der NMIs (National Metrology Institutes) auf europäischer Ebene angesehen werden: kleinere NMIs übernehmen europaweit Aufgaben, für die sie über speziel-

# Physik und Medizinische Messtechnik

le Expertise verfügen und erlauben so den international führenden NMIs sich auf die neuen, ressourcenintensiven Herausforderungen zu konzentrieren. Genau Letzteres ist das Anliegen des EMRP.

## European Metrology Research Programme (EMRP)

Das EMRP stellte eine besondere Herausforderung für die Abteilung *Medizinphysik und Metrologische Informationstechnik* dar, denn sowohl die „Medizinphysik“ als auch die Bereiche „Mathematik und IT“ waren nicht im System der Technical Committees (TCs) des EUROMET vertreten.

Es galt daher, sich aktiv um die Gründung der EUROMET Focus Groups „Life Science“ und „Math and IT“ zu bemühen und bei der Gestaltung des EMRP-Programms und der Roadmaps entscheidend mitzuwirken. Für beide Focus Groups stellte die Abteilung die Vorsitzenden und konnte im Folgenden durch vorbereitende Workshops, Stakeholder Meetings und andere Aktivitäten erreichen, dass im Rahmen der ersten EMRP-Ausschreibung unter „ERA-NET Plus“ ein Targeted Programme (TP) zum Thema „Grand Challenge: Health“ aufgenommen und der PTB die Koordination des TP übertragen wurde.

An der Ausschreibung zum TP „Health“ nahmen sechs der acht wissenschaftlichen Abteilungen der PTB teil, was sowohl den interdisziplinären Charakter des Programms widerspiegelt, aber auch den notwendigen Trend zur Programmsteuerung inner-

halb der PTB unterstreicht. Dies gelang außerordentlich erfolgreich, denn die PTB ist substantiell in allen geförderten Joint Research Projects (JRPs) des TP „Health“ vertreten.

Neben den oben betrachteten Neuausrichtungen soll aber ein Blick zurück nicht fehlen auf Beispiele aus den Fachbereichen, die über die Jahre gereift sind und sich eine besondere Wertschätzung erarbeitet haben:

## Magnetresonanztomographie

Der Fachbereich *Medizinische Messtechnik* befasst sich u. a. mit Magnetresonanztomographie (MRT), also einem klinisch etablierten Bildgebungsverfahren in der Medizin. Schwerpunkte der PTB-Aktivitäten in diesem Bereich sind die Themenfelder Entwicklung neuer Messverfahren, Patientensicherheit und Quantifizierung von Messdaten in der Medizin.

Über die Möglichkeiten der Bildgebung hinaus, eröffnet die MR-Spektroskopie (MRS) ein Fenster zur Biochemie des Gehirns. Ein solches MR-Spektrum (Bild 1) aus einem selektierten Volumenelement des Gehirns spiegelt die relativen Amplituden bestimmter Metabolite wieder, die mit an der PTB entwickelten Verfahren mit zuverlässig analysierter Messunsicherheit quantifiziert werden können. So wurde beispielsweise zusätzlich zu strukturellen Unterschieden zwischen Raucher- und Nichtrauchergehirnen (siehe: J. Gallinat et al., Eur. J. Neuroscience 24, 2006, 1744–1750) mittels MRS eine verringerte Konzentration von N-Acetylaspartat (NAA) – einem Marker aktiver Neuronen – im Hippo-

campus von Rauchern sowie ein positiver Zusammenhang der Menge an konsumiertem Tabakrauch mit der Konzentration cholinhaltiger Substanzen (tCho) in einer weiteren Hirnregion, dem anterioren Cingulum, nachgewiesen (Bild 2). Letztere Substanzklasse reflektiert den Metabolismus von Zellmembrankonstituenten.

Die gemeinsame Quantifizierung von NAA und tCho ist jedoch nicht nur zum Nachweis von möglichen, bisher unbekanntem Folgeschäden des Rauchens, sondern auch für zahlreiche neurodegenerative Störungen wie z. B. Multiple Sklerose von Bedeutung.

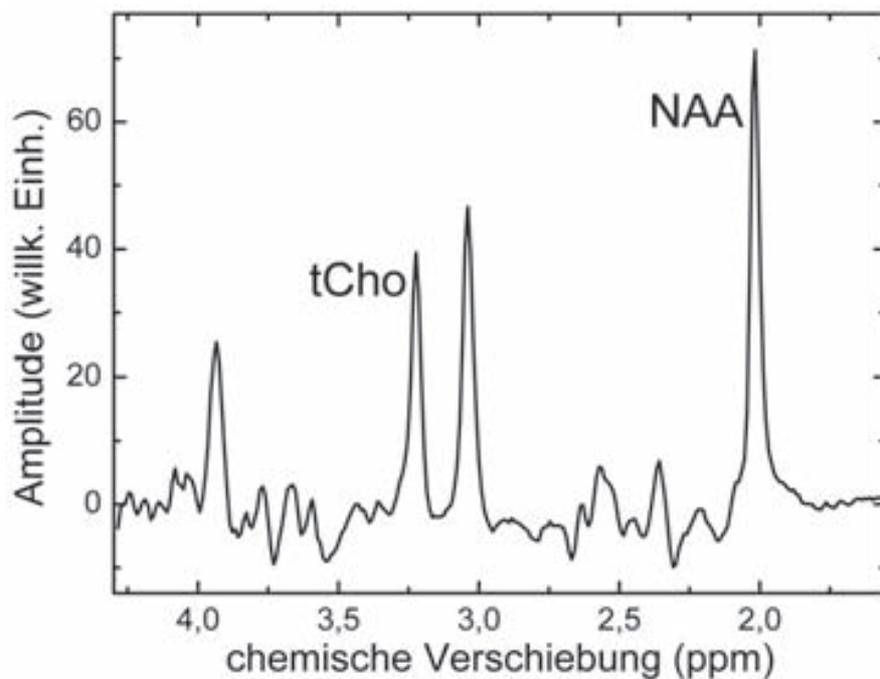
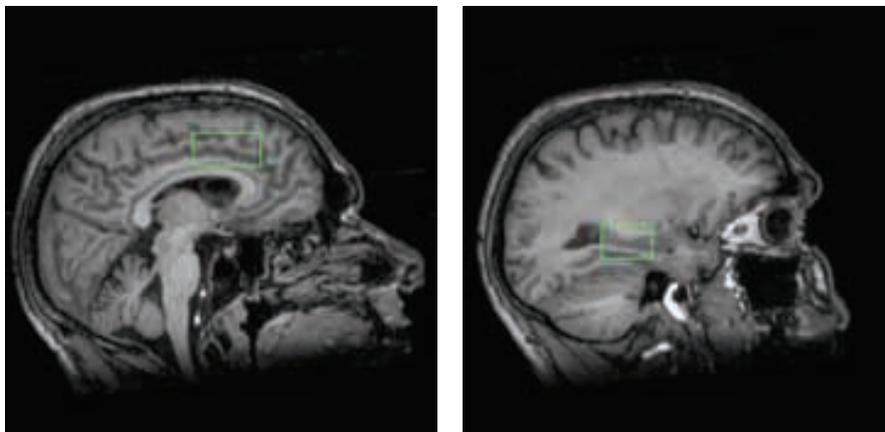


Bild 1: Sagittale MRT-Schnitte eines Probandengehirns in zwei verschiedenen Tiefen. In den markierten Volumenelementen (oben links: anteriores Cingulum, oben rechts: Hippocampus) wurden MR-Spektren gemessen. Anhand ihrer charakteristischen chemischen Verschiebung können verschiedene Metabolite im MR-Spektrum (unten) identifiziert werden, wobei in dieser Studie besonders Gesamtcholin (tCho) und N-Acetylaspartats (NAA) interessierten. Für die einzelnen Metaboliten wurden Auswertungsverfahren entwickelt, die eine quantitative Konzentrationsangabe der betreffenden Substanz ermöglichen. Eine universelle Quantifizierung des gesamten Spektrums, also eine Y-Achse in mmol/L statt in „arbitrary units“, ist nicht möglich, da die NMR-Nachweismempfindlichkeit für jede der Molekülgruppen verschieden ist.

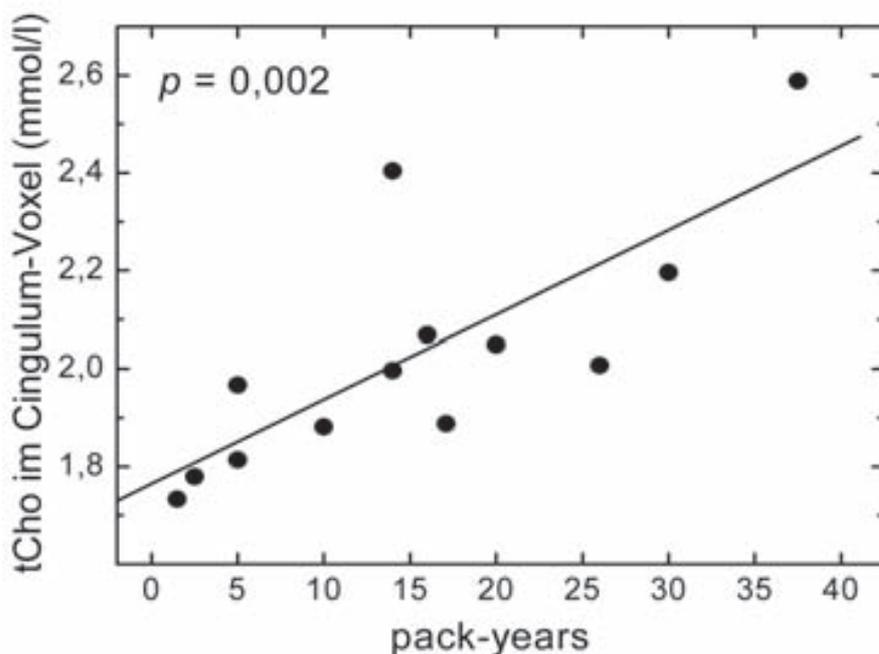


Bild 2: Innerhalb der Vergleichsgruppe der Raucher ist die jeweilige Konzentration des Gesamtcholins im anterioren Cingulum (s. Bild 1) hochsignifikant korreliert mit der insgesamt im Leben des betreffenden Individuums gerauchten Zigaretten (ein „pack-year“ bezeichnet den Konsum von 365 Schachteln Zigaretten). Dies könnte ein Indiz für eine zunehmende Zellschädigung in diesem Hirnareal sein.

### Magnetische Nanopartikel für die medizinische Diagnostik

In einem BMBF-Projekt wurden bis zum Jahr 2000 vom Fachbereich *Biosignale* gemeinsam mit der Schering AG und dem Institut für Diagnostikforschung neue Immunoassayverfahren entwickelt, die magnetische Nanopartikel (MNP) statt der sonst üblichen Radionuklide, Fluorophore oder Enzyme als Marker verwenden. In den Folgejahren galt es, die Messtechnik und insbesondere die magnetischen Nanopartikel für biologische Anwendungen zu optimieren. Dazu wurde in dem Fachbereich die Magnetrelaxometrie-Methode (MRX) entwickelt, um die magnetischen Eigenschaften und das kolloidale Verhalten der MNP zu quantifizieren. Unter Anwendung geeigneter Modelle können aus den Relaxationsdaten Anisotropiekonstante, Mittelwert und Streuung der Größenverteilung der magnetischen Kerne sowie die Größenverteilung von Clustern der MNP ermittelt werden. Damit gelang es, Hersteller dabei zu unterstützen, Teilchen mit erhöhtem Kerndurchmesser bzw. höherer Anisotropiekonstante bereitzustellen, die eine größere Signalamplitude liefern.

Insbesondere das Aggregationsverhalten der Teilchen in verschiedenen Medien wie Wasser, Serum oder Blut, das sich mit der MRX hervorragend studieren lässt (Clustergrößenbereich 50 nm bis 1  $\mu$ m), ist für medizinische

Anwendungen (z. B. MRI-Kontrasterhöhung, Drug Targeting) von großer Relevanz. Werden die magnetischen Nanopartikel mit Biomolekülen funktionalisiert, so lässt sich mit der MRX-Methode deren Bindungsverhalten untersuchen. Die modellbasierte Auswertung der Relaxationsdaten erlaubt die Ermittlung des Anteils gebundener MNP, ohne ungebundene MNP vorher auszuwaschen. Deshalb kann auch die Kinetik von Bindungsvorgängen mit einer zeitlichen Auflösung im Sekundenbereich gemessen werden.

Aufgrund des sehr spezifischen Relaxationssignals der MNP können sie im biologischen Gewebe hochempfindlich nachgewiesen werden. In Kooperation mit Partnern aus dem klinischen Bereich (z.B. Uni Erlangen, LMU München) werden gegenwärtig in BMBF- und DFG-geförderten Projekten MNP in Gewebeproben von Tieren aus verschiedenen klinischen Studien zur Medikamentenanreicherung im Tumorgewebe mittels MRX quantifiziert.

Weitere aktuelle Vorhaben mit PTB-Beteiligung, zum Beispiel das EU-Projekt „Biodiagnostics“, in dem Biotin-Streptavidin Modellsysteme analysiert werden, oder ein BMBF-Projekt, in dem ein MRX-Demonstrator unter Verwendung von Fluxgate-Sensoren entwickelt wird, zeigen den reichen Ertrag dieses F&E-Themas.

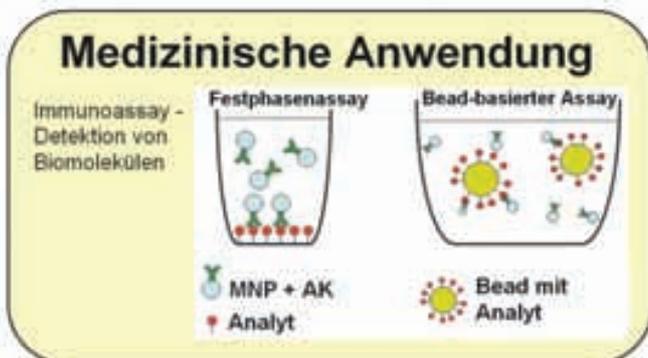
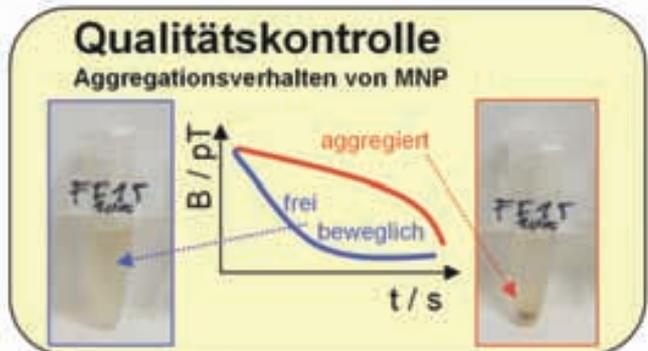
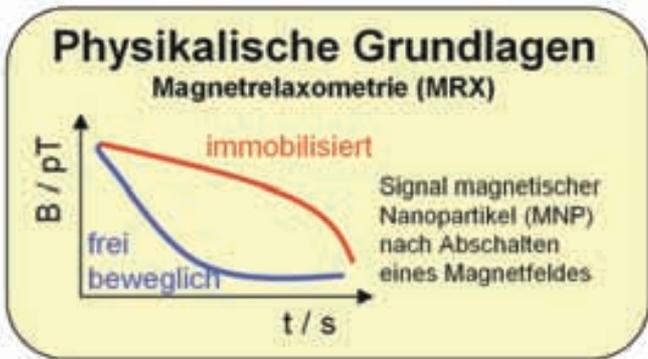


Bild 3: Verschiedene Aspekte der F&E-Arbeiten zu magnetischen Nanopartikeln für die medizinisch-biochemische Diagnostik

### Zytometrie

Seit 1969 werden im Fachbereich *Biomedizinische Optik* Arbeiten zur Entwicklung von Referenzmethoden für die Hämatologie für messtechnische Kontrollen im Rahmen der Qualitätssicherung quantitativer laboratoriumsmedizinischer Untersuchungen durchgeführt. Durch die Entwicklung und Erprobung dieser Referenzverfahren in der PTB wurden die Voraussetzungen dafür geschaffen, dass die Teilnahme hämatologischer Laboratorien an Ringversuchen als Maßnahme der externen Qualitätssicherung seit 2002 verpflichtend in den Richtlinien der Bundesärztekammer vorgeschrieben ist. Derzeit wird im Rahmen eines vom BMWi geförderten Technologie-Transfer-Projektes zusammen mit einem Hersteller von Laser-Durchflusszytometern ein Gerät mit hinreichender Messgenauigkeit entwickelt, um die Voraussetzungen für den Aufbau von externen Referenzlaboratorien zu schaffen.

Die entwickelten durchflusszytometrischen Messverfahren lassen sich aber auch für andere medizinische Fragestellungen vorteilhaft einsetzen. So wurde in Kooperation mit der Klinik für Infektiologie der Charité, Berlin, und dem Tropeninstitut der Universität Tübingen gezeigt, dass mit der guten statistischen Präzision dieses Messverfahrens auch seltene, charakteristisch veränderte, weiße Blutzellen im peripheren Blut von an Malaria erkrankten Patienten quantitativ mit diagnostischer Relevanz nachgewiesen werden können. Andere seltene Zellen im Blut, die – ebenfalls in Kooperation mit der Charité – durchflusszytometrisch nachgewiesen wurden, sind im Blut zirkulierende Endothelzellen, die normalerweise die Innenwände der Blutgefäße auskleiden. Die Konzentration dieser Zellen im Blut erlaubt möglicherweise Rückschlüsse auf Veränderungen am Blutgefäßsystem, z. B. im Verlauf einer Tumorerkrankung oder während eines akuten Herzinfarktes.

Ein hochaktuelles Forschungsgebiet ist weiterhin die durchflusszytometrische Zählung, Sortierung und Anreicherung von Stamm-

zellen im peripheren Blut Erwachsener. Körper-eigene Stammzellen sind auch die Grundlage für die Züchtung von Gewebetransplantaten beim so genannten „Tissue Engineering“ in der regenerativen Medizin. Die von der PTB entwickelten Methoden zur Qualitätssicherung sollen zusammen mit komplementären Methoden anderer nationaler Metrologie-Institute in einem EMRP-Verbundprojekt untersucht und weiterentwickelt werden.

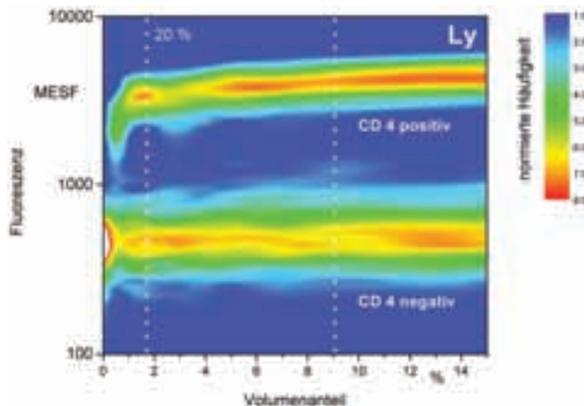


Bild 4: Titrationsserie für die Anfärbung von Lymphozyten in Blut mit FITC markierten CD4-Antikörpern (Lieferant: Dako Deutschland GmbH, Reaktionszeit 900 s) zur Bestimmung der erforderlichen Reagenzienmenge; aufgetragen ist die Häufigkeit, dass eine Zelle eine bestimmte Fluoreszenzintensität gemessen in MESF-Einheiten (Molecular Equivalent of Soluble Fluorescein) zeigt. Die Unterscheidung CD4-positiver und CD4-negativer Lymphozyten ist ein entscheidender Faktor für die Verlaufskontrolle einer HIV-Infektion und nur mit immunologischen Färbemethoden möglich. Der empfohlene Volumenanteil der Antikörpermenge an der Mischung mit Blut beträgt 9 %; bei weit geringeren Volumenanteilen wird noch eine fast gleich gute Anfärbung erreicht. Zu hohe Reagenzienmengen bergen die Gefahr einer unspezifischen Anfärbung anderer Leukozytenpopulationen.

### Mathematik und Technologietransfer

Der Fachbereich *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* wurde 2004 als Ergebnis der im Jahr 2002 durchgeführten Evaluation der PTB neu gegründet. Ziele des Fachbereichs sind die stärkere Verankerung mathematischer Expertise in der PTB und entsprechende Forschungsaktivitäten bei der Entwicklung neuer Messverfahren in der PTB.

In den letzten Jahren sind dabei einige Projekte zusammen mit experimentellen Fachbereichen der PTB durchgeführt worden, die

mittlerweile auch einen wichtigen Beitrag zum Technologietransfer und zur Zusammenarbeit der PTB mit der Industrie liefern. Methodisch stehen dabei virtuelle Experimente, d. h. Simulationen zur Entwicklung neuer Messmethoden, mathematische Auswertverfahren, die Lösung inverser Probleme sowie die Bestimmung von Messunsicherheiten und Datenanalyse im Vordergrund. Im Folgenden wird dieser Arbeitsschwerpunkt anhand einiger Beispiele illustriert.

### Neues Verfahren zur Topographiebestimmung: Das Traceable Multi Sensor System (TMS)

Das TMS-Verfahren ist ein optisches, Mathematik-gestütztes Messverfahren zur hochgenauen Topographiemessung von gekrümmten optischen Oberflächen (Asphären), das gemeinsam in den Arbeitsgruppen 4.21 und 8.42 entwickelt wurde. Der Einsatzbereich solcher Asphären erstreckt sich von Hochleistungsoptiken, wie sie z. B. in der EUV-Lithographie eingesetzt werden, bis hin in den Endanwenderbereich (z. B. Kameraobjektive).

Um den nötigen Dynamikbereich abzudecken, wird die Topographie mit einem kompakten Interferometer in mehreren sich überlappenden Bereichen gemessen. Herkömmliche Stitchingverfahren kompensieren lediglich die Höhenabweichungen der Führung sowie deren Verkippungsfehler (Bild 5 links). Durch eine mathematische Modellierung des Messvorganges ist es jedoch möglich, die Höhenabweichungen der Führung sowie die systematischen Fehler der Referenzfläche und damit die Topographiewerte mit höchster Genauigkeit zu berechnen (Bild 5 rechts).

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Programms zur Unterstützung kleiner und mittlerer Unternehmen bei der Umsetzung von Innovationen in den Bereichen Messen, Normen, Prüfen und Qualitätssicherung („MNPQ-Transfer“) wird die in der PTB entwickelte TMS-Messtechnik zum Projektpartner TRIOPTICS GmbH transferiert.

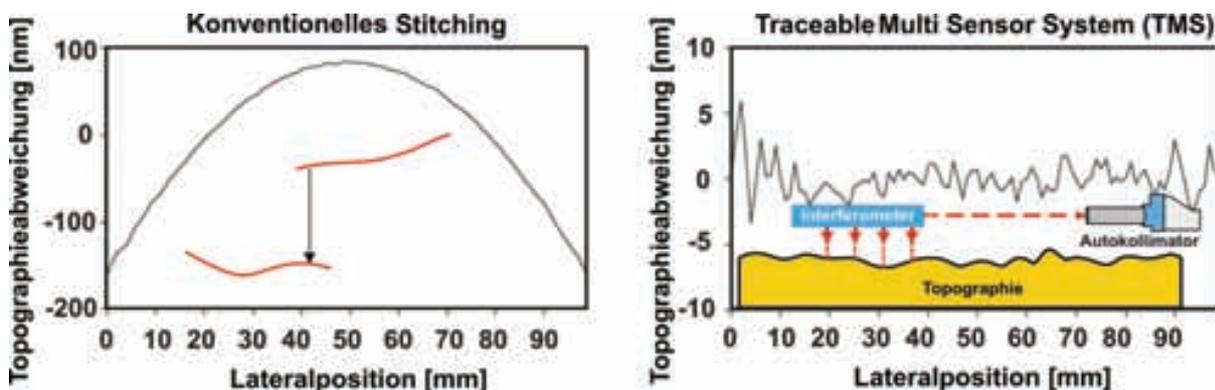


Bild 5: Rekonstruktionsfehler von konventionellem Stitching und TMS im Vergleich für eine Topographie mit einer Höhe von 1500 nm

*Analyse dynamischer Messungen: Kalibration von Beschleunigungsaufnehmern*

Ebenfalls im Rahmen des MNPQ-Transfer-Programms des BMWi wird das Projekt „Modellgestützte Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern“ gefördert, das die PTB gemeinsam mit der SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH Dresden durchführt. Gegenstand dieses Technologietransfers sind neuartige Messverfahren und Auswertemethoden zur Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern, wie sie in den letzten Jahren in der PTB in den beiden Arbeitsgruppen 1.31 und 8.42 entwickelt wurden. Im Gegensatz zu den gegenwärtigen Kalibrierverfahren erlauben die neuen Verfahren die Bestimmung des Übertragungsverhaltens eines Aufnehmers auch für transiente Signale, die in der industriellen Messpraxis dominieren.

*Inverses Verfahren zur Charakterisierung nanostrukturierter Photomasken mit Hilfe scatterometrischer Messungen*

Scatterometrie ist eine indirekte Messmethode zur Bestimmung von Oberflächenprofilen im Mikro- und Nanometerbereich, wie sie in typischer Weise auf Fotolithographiemasken auftreten. Dabei wird aus UV-Lichtbeugungseffizienzen auf die periodische Geometrie der Photomasken zurückgeschlossen. Mit Hilfe mathematischer Analysen konnten die relevanten Geometriegrößen nicht nur bestimmt werden, sondern auch gezeigt werden, dass ihre numerischen Werte mit einer Messunsicherheit von höchstens 2 % behaftet sind.

### Sichere Messdaten in verteilten Messsystemen des gesetzlichen Messwesens

In den zurückliegenden Jahren sind vom Fachbereich *Metrologische Informationstechnik* verschiedene Forschungsvorhaben zu sicheren Messdatenübertragungsverfahren durchgeführt worden. Das im Jahre 2004 abgeschlossenen Vorhaben SELMA (Sicherer elektronischer Messdatenaustausch) war das erste und prominenteste Vorhaben dieser Art. Im Berichtszeitraum wurde das SIMEDAKO-Vorhaben abgeschlossen, in dem sichere, industrietaugliche WLAN-Module für messtechnische Anwendungen mit einer Ende-zu-Ende-Sicherung entwickelt worden sind.

Inzwischen haben Entwickler von Messsystemen die Ansätze aufgegriffen und entsprechende neuartige, anwendungsreife Produkte entwickelt. Der Fachbereich wurde im Rahmen von Zulassungsverfahren oder als Berater in Entwicklungsprojekten mit unterschiedlichen Lösungsansätzen konfrontiert. Dazu zählen

- ein verteiltes Gaszählersystem mit einer zentralen Datenhaltung
- ein neuartiger Lastgangelektrizitätszähler mit verteilten, miteinander kommunizierenden Komponenten
- eine direkte Implementation des SELMA-Konzeptes für Gaszähler
- Abgasmessstationen, die über Funk mit einer Datensammelstelle kommunizieren
- Übertragung und Speicherung gerichtsrelevanter Vorfallsdaten bei der Verkehrsüberwachung.

Die Messsysteme sind unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Besonderheiten auf Konfor-

mität mit den einschlägigen Anforderungen bewertet worden. Das betrifft insbesondere die Verfahren zur Kommunikation, die Sicherheit der Messdaten und die Zuverlässigkeit der Software.

Im Bereich der Energiemessung, vor allem bei Elektrizität und Gas, haben veränderte gesetzliche Rahmenbedingungen dazu geführt, dass bei den Versorgern neue kommerzielle Rollen entstanden sind und die Handelsbeziehungen insgesamt sich geändert haben. Dadurch entstand der Bedarf für neue Messsysteme, bei denen abrechnungsrelevante Daten nicht mehr am Messort, sondern zentral gespeichert werden (symbolisch dargestellt in Bild 6). Um die gesetzlichen Anforderungen des Eichrechts zu erfüllen, wurden hierfür unter Beteiligung des Fachbereichs in den letzten Jahren internationale Leitfäden erarbeitet. Aktuell besteht die Aufgabe des Fachbereichs darin, die neuen informationstechnischen Komponenten wie Kryptographie oder sicheres Laden von Programmen in den Konzepten dieser Messsysteme zu bewerten und zu prüfen und die erforderlichen Prüfverfahren zu entwickeln.

In der Kombination aus Beteiligungen in Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, der Erarbeitung von Leitfäden auf europäischer und nationaler Ebene, der Aufbereitung der Prüfverfahren und der Durchführung von Prüfungen und Begutachtungen sowie mit der fachlichen Expertise auf den Gebieten der Datensicherheit und der Softwarevalidierung ist über die Jahre im Fachbereich eine allseits anerkannte, umfassende Kompetenz für diesen Bereich des gesetzlichen Messwesens entstanden.



Bild 6: Dezentrale Energiemessgeräte, zentrale Verarbeitung der Messwerte

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Freie Spinpräzession von hyperpolarisierten Edelgasen mit ultralangen Relaxationszeiten

In einer Zusammenarbeit mit der Forschergruppe um Prof. W. Heil (Uni Mainz) wurde in der magnetisch geschirmten Kabine BMSR2 der PTB die SQUID-detektierte freie Spinpräzession von hyperpolarisierten Edelgaskernen untersucht. So konnte diese Präzession in einem Magnetfeld von 400 nT über einen Zeitraum von bis zu 18 Stunden beobachtet und  $^3\text{He}$ -Spin-Spin-Relaxationszeiten ( $T_2$ -Zeit) von bis zu 60 Stunden gemessen werden. Des Weiteren konnte erstmals die freie Spinpräzession von  $^3\text{He}$  und  $^{129}\text{Xe}$  in ein und der selben Glaszelle simultan beobachtet werden. Derartige Messungen könnten für einen Test der Lorentz-Invarianz verwendet werden. (W. Kilian, FB 8.1, [wolfgang.kilian@ptb.de](mailto:wolfgang.kilian@ptb.de), M. Burghoff, FB 8.2, [martin.burghoff@ptb.de](mailto:martin.burghoff@ptb.de))

#### Evaluierung optisch gepumpter Magnetometer für die Magnetenzephalographie

Die Leistungsfähigkeit moderner optisch gepumpter Magnetometer hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Um die Eignung derartiger Sensoren für den Einsatz in der Hirnforschung zu bewerten, wurden optische Magnetometer der Universität Fribourg/Schweiz zusammen mit dem 304-Kanal-SQUID-Magnetometer der PTB im BMSR II eingesetzt. Die Ergebnisse zeigten, dass optische Sensoren speziell bei Frequenzen  $< 0,1$  Hz ein geringeres Rauschen als SQUIDs aufweisen. (T. Sander-Thömmes, FB 8.2 und Universität Fribourg, [tilmann.sander-thoemmes@ptb.de](mailto:tilmann.sander-thoemmes@ptb.de))

#### Kooperation zur Entwicklung von Messverfahren zur Detektion einzelner Biomoleküle mit dem National Physical Laboratory aufgenommen

Ziel von Einzelmolekül-Messtechniken ist es, u. a. biologische Größen auf die Eigenschaften einzelner Moleküle zurückzuführen und durch die Einführung einer kleinsten Einheit (ein Molekül) zu quantifizieren. Um die Aktivitäten der PTB und des National Physical Laboratory (NPL) auf diesem Gebiet zu vertiefen, wurde zur Aufnahme einer diesbezüglichen Kooperation Steffen Rüttinger (PTB) sechs Monate an das NPL nach Teddington, England entsandt, wo er zusammen mit Alex Knight (NPL) einen Messplatz zur Detektion von einzelnen biologisch relevanten Molekülen weiterentwickelt hat. (S. Rüttinger, FB 8.3, [steffen.ruettinger@ptb.de](mailto:steffen.ruettinger@ptb.de); R. Macdonald, FB 8.3, [rainer.macdonald@ptb.de](mailto:rainer.macdonald@ptb.de))

#### Berücksichtigung von zusätzlicher Information bei der Bestimmung von Messunsicherheiten

Der „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) regelt die Bestimmung von Messunsicherheiten für den Fall, dass Information über die die Messgröße beeinflussenden Größen vorhanden ist. Mitunter ist aber zusätzliches Vorwissen über den Wert der Messgröße selbst bekannt, z.B. dass dieser nicht-negativ ist, oder es liegt aus früheren Messungen bereits ein Schätzwert und dessen beigeordnete Unsicherheit vor. Im GUM sowie in dessen aktuellen Ergänzungsdokumenten wird dieser Fall nicht behandelt. In Übereinstimmung mit den Grundprinzipien des GUMs wurde daher eine Bayes'sche Methode entwickelt, die es erlaubt, solche zusätzliche Information adäquat zu nutzen. (C. Elster, FB 8.4, [clemens.elster@ptb.de](mailto:clemens.elster@ptb.de))

### Scatterometrie an EUV-Photolithographiemasken

Eine Computersimulationsanalyse in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich 4.2, auf der Grundlage rigoroser Methoden zur Lösung der Maxwell-Gleichungen, konnte nachweisen, dass sich die Absorberstruktur von EUV-Masken unabhängig von der Güte des darunter liegenden Vielfachschichtsystems durch Scatterometrie im tiefen ultravioletten Spektralbereich bestimmen lässt. Damit ist eine wesentliche Fehlerquelle ausgeschlossen und eine präzise Bestimmung von Strukturbreiten und -höhen möglich. (R. Model, FB 8.4, regine.model@ptb.de)

### Internationaler Workshop über IT in der Metrologie von der PTB durchgeführt

Die Fachbereiche *Metrologische Informationstechnik* und *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* haben zusammen mit dem Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) den internationalen Workshop „Impact of Information Technology in Metrology“ in Verbindung mit zwei eintägigen Satellitenworkshops „Trends in Uncertainty Evaluation and Interlaboratory Comparison Analysis“ und „Quality and Security of Metrological Software and Data“ in der Woche vom 4. bis 8. Juni 2007 durchgeführt (siehe [www.ptb-bipm-workshop.de](http://www.ptb-bipm-workshop.de)). (D. Richter, FB 8.5, dieter.richter@ptb.de)

### Metrologie für die Wirtschaft

#### Erste DKD-Akkreditierung der Messgröße „rotatorische Leistung“

Der Deutsche Kalibrierdienst (DKD) hat 2007 erstmals die Messgrößen „rotatorische Leistung“ bei einem thüringischen KMU akkreditiert. Die fachliche Begutachtung erfolgte durch die Arbeitsgruppe *Normale für die medizinische Messtechnik*. Die kleinsten erreichbaren Messunsicherheiten im Bereich bis 1000 W liegen nur wenig über denen des nationalen Normals der PTB. Die DKD-Akkreditierung beendet das bisherige Monopol der PTB für die Kalibrierung dieser Messgröße. (H. Pfeiffer, FB 8.1, harald.pfeiffer@ptb.de)

### PTB Fluoreszenz-Mammograph mit hoher Empfindlichkeit

Die PTB hat im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes FLUOROMAMM (Zeitaufgelöste Fluoreszenzmammographie) einen Fluoreszenz-Mammographen entwickelt, bei dem die zu untersuchende Brust zwischen zwei Glasplatten positioniert und leicht komprimiert wird. Vergleichende Untersuchungen an Phantomen für die Fluoreszenzmammographie haben gezeigt, dass das PTB-Verfahren gegenüber tomographischen Anordnungen mit allseitig an der Brust positionierten Detektoren eine höhere Empfindlichkeit erreicht. (D. Grosenick, FB 8.3, dirk.grosenick@ptb.de)

### Erfolgreicher Abschluss eines Projektes zum frühen Nachweis rheumatischer Erkrankungen mittels Laser-induzierter Fluoreszenz

Das im Rahmen einer Kooperation mit der Bayer Schering Pharma, dem Institut für Radiologie, CC 6 der Charité und der Fa. Lasertechnik Berlin (LTB) GmbH bearbeitete und von der Investitionsbank Berlin (IBB) finanziell unterstützte Projekt zur Früherkennung von Rheuma wurde termingerecht und erfolgreich abgeschlossen. Wesentliche Ergebnisse des Projektes wurden als Patent eingereicht (PCT Anmeldung: WO2007000349 Priodatum: 29.06.2006). (B. Ebert, FB 8.3, bernd.ebert@ptb.de, joern.berger@ptb.de)

### Weiterentwicklung eines Routine-Durchflusszytometers zur Präzisionsbestimmung von Zellkonzentrationen

Zur externen Qualitätssicherung hämatologischer Laboratorien werden von medizinischen Standesorganisationen Ringversuche zum Kleinen Blutbild durchgeführt, für die die PTB Referenzwerte ermittelt. In einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Projektes wird die Entwicklung eines kommerziell verfügbaren Referenzinstrumentes zur Blutzellzählung durchgeführt, mit dem Ziel, den Aufbau von Referenz- und Kalibrierlaboratorien außerhalb der PTB zu ermöglichen. (M. Kammel, FB 8.3, martin.kammel@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

### **Datenanalyse zur Kalibrierung von Vektor-Netzwerkanalysatoren**

Gemeinsam mit der Arbeitsgruppe 2.22 wurde ein Verfahren zur Bestimmung der komplexen Restfehlerparameter eines Vektornetzwerkanalysators untersucht. Das Verfahren beruht auf der Auswertung einer Reflexionsmessung einer Luftleitung mithilfe von Methoden der Signalverarbeitung wie z. B. linearer Prädiktion und Bandpassfilterung. Eine erste Publikation dieser Arbeiten wurde mit dem „ARFTG award for best paper“ ausgezeichnet. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de)

### **Neuartiges Zählerkonzept bestätigt**

Der Fachbereich 8.5 hat das Konzept eines neuartigen Messsystems zur Lastgangmessung, das in dem Forschungs- und Entwicklungsprojekt „taktsynchroner Lastgangzähler – tLZ“ von der Industrie entwickelt worden ist, bewertet. Dabei ging es unter anderem um die Zeitsynchronisierung und Anbindung an die gesetzliche Zeit, die sichere Datenübertragung, die Authentizität und Integrität der Messwerte, Messwertanzeigen sowie um das Firmware-Downloadkonzept. (U. Grottker, FB 8.5, ulrich.grottker@ptb.de)

### **NRW-Sicherheitspreis 2006 an das SELMA-Konsortium**

Am 23. November 2006 nahmen Vertreter der Universität Siegen und der PTB auf dem „5. IT-Sicherheitstag NRW“ in Hagen vom Wirtschafts- und Innovationsminister des Landes Nordrhein-Westfalen, Prof. Dr. Andreas Pinkwart, stellvertretend für das SELMA-Konsortium den „Sicherheitspreis NRW 2006“ in der Kategorie Mittelstand entgegen. Mit der SELMA-Technik lassen sich Daten von dezentralen Messstellen sicher über offene Netze übertragen. Begründet wurde die Entscheidung der Jury mit dem großen wirtschaftlichen Nutzen, den auch viele kleine und mittlere Unternehmen damit erzielen können.

Siehe auch [http://www.secure-it.nrw.de/wettbewerb/it\\_si\\_pr\\_2006.php](http://www.secure-it.nrw.de/wettbewerb/it_si_pr_2006.php). (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)

## **Metrologie für die Gesellschaft**

### **Magnetresonanz-Radar-Kombination für biomedizinische Messungen**

Das interdisziplinäre Forschungsvorhaben ultraMEDIS innerhalb des DFG-Schwerpunktprogramms 1202 „Ultrabreitband-Funktechniken für Kommunikation, Lokalisierung, Sensorik“ zielt auf den Einsatz von Ultrabreitband-(UWB)-Radar für die Detektion von Tumoren sowie als Navigatortechnik für bildgebende Magnetresonanz-Verfahren (MR) ab. In Kooperation mit der TU Ilmenau und der Universität Jena wurde in der PTB ein Demonstrator zur Evaluierung der prinzipiellen Durchführbarkeit einer MR-UWB-Kombination realisiert. (F. Thiel, FB 8.1, florian.thiel@ptb.de)

### **7-Tesla-Initiative nimmt Gestalt an**

Zwei wichtige Meilensteine für die Errichtung eines Ultrahochfeld-MRT-Zentrums auf dem Gelände des Max-Delbrück-Centrum (MDC) für Molekulare Medizin wurden im Jahr 2007 passiert. Am 19.03. wurde in einem kleinen Festakt mit der Firma Siemens AG ein Vertrag über die Lieferung eines 7-Tesla-MRT unterzeichnet. Er hat ein Finanzvolumen von fast 8 Millionen Euro und schließt eine intensive Forschungskoooperation aller beteiligten Partner mit ein. Das Gerät soll ab Sommer 2008 betriebsbereit sein und gleichermaßen für die Hirn-, Krebs- und Herz-Kreislauf-Forschung eingesetzt werden. Neben MDC, PTB und Siemens AG sind auch die Charité Universitätsmedizin Berlin und das Forschungszentrum für Molekulare Pharmakologie (FMP), Berlin-Buch, in die Kooperation eingebunden. Am 31.10. erfolgte dann die Grundsteinlegung für einen Neubau, der neben dem 7-Tesla-Ganzkörper-MRT auch einen 9,4-Tesla-Kleintierscanner beherbergen wird.

(B. Ittermann, FB 8.1, bernd.ittermann@ptb.de)

### **Hyperpolarisiertes Xenon in Molekülkäfigen eingefangen**

Zusammen mit der Arbeitsgruppe „Protein Engineering“ des Leibniz-Institut für Molekulare Pharmakologie (FMP) Berlin-Buch (Dr. C. Freund) arbeiten Wissenschaftler der AG 8.11 am Nachweis von Immunzellproteinwechselwirkungen durch hyperpolarisiertes  $^{129}\text{Xe}$ . Ziel ist die Entwicklung von Methoden der MR-Bildgebung und -Spektroskopie zur Charakterisierung der Immunantwort auf zellulärer Ebene mittels hyperpolarisierten Xenons (HpXe) als höchstempfindlicher Sonde. Als wichtiger Zwischenschritt ist jetzt der dazu erforderliche Nachweis von hyperpolarisiertem Xenon, das in wässriger Lösung in funktionalisierten Molekülkäfigen eingeschlossen ist, gelungen. (L. Mitschang, FB 8.1, lorenz.mitschang@ptb.de)

### **NMR-Messungen im Erdfeld mit Hoch-Tc-SQUIDS**

Gemeinsam mit Kollegen vom Forschungszentrum Jülich wurden Kernresonanzspektren von Flüssigkeiten mit Stickstoff-gekühlten SQUIDS im natürlichen Magnetfeld der Erde aufgenommen. Durch die breitbandige Empfangscharakteristik der SQUIDS konnten dabei z.B. die Resonanzlinien von Fluor und von Wasserstoff in Trifluorethanol gleichzeitig in einem einzigen Spektrum gemessen werden. (M. Burghoff, FB 8.2, martin.burghoff@ptb.de)

### **Fensterfunktionen für hochauflösende Messungen**

Fensterfunktionen werden verwendet, um aus einem Signal einen Abschnitt für die Spektralanalyse auszuschneiden. Es wurde ein Algorithmus zum Entwurf von Fenstern entwickelt, der für nahezu alle hochauflösenden Messungen einsetzbar ist. Mit dieser Methode wurden Fenster entworfen, die für Spektren mit einer Signaldynamik von bis zu 17 Größenordnungen geeignet sind. (H.-H. Albrecht, FB 8.2, hans-helge.albrecht@ptb.de)

### **EKG-Datenanalyse für die klinische Medikamentensicherheit**

Einen neuen Ansatz zur Beurteilung der Auswirkung von Medikamenten auf das Herz stellt das durch die PTB entwickelte Verfahren des EKG-Signalmustervergleiches dar, mit welchem insbesondere auch eine Bewertung einer kardiologischen Nebenwirkung von Medikamenten in Richtung eines konkreten Befundes erfasst werden kann. Im Rahmen eines von einem Industriepartner finanzierten Projektes wurde eine Untersuchung der Eignung des PTB-Verfahrens auf Basis einer klinischen Studie des Medikaments Moxifloxacin durchgeführt. (R. Boussejot, D. Kreiseler, FB 8.4, Ralf.Boussejot@ptb.de, Dieter.kreiseler@ptb.de)

### **Untersuchungen zum Hämstoffwechsel und zum Anreicherungsmechanismus von Protoporphyrin IX in Kolontumoren**

In Zusammenarbeit mit der Robert-Roessle-Klinik und dem Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin wurde der Hämstoffwechsel kolorektaler Karzinome untersucht. Zur Lösung dieser Problemstellung wurde eine Fluoreszenzapparatur entwickelt, die eine Bestimmung geringer Protoporphyrin IX (PpIX)-Konzentration in Zellpellets erlaubt sowie eine Apparatur zur Zwei-Photonen Fluoreszenz-Mikroskopie für die Lokalisierung des Farbstoffs in den Zellen eingesetzt. Es wurde nachgewiesen, dass durch Ruhigstellung (Silencing) eines bestimmten Enzyms (Ferrochelatase) mit Hilfe von siRNA die Bildung von PpIX in Tumorzellen gezielt verstärkt werden kann. (B. Ebert, FB 8.3, bernd.ebert@ptb.de)

**Deutsch-polnisches Verbundprojekt zur klinischen Evaluation eines Nahinfrarot-Spektroskopischen Messverfahrens für Anwendungen des Perfusions-Monitorings bei Schlaganfallpatienten**

Durch ps-zeitaufgelöste Messung der diffusen Reflexion oder der Fluoreszenz gelingt die Beobachtung der Passage eines Kontrastfarbstoff-Bolus im Gehirn Erwachsener bei Unterdrückung von Signalanteilen aus darüber liegenden Gewebeschichten. In einem neuen, vom BMBF-geförderten Verbundprojekt soll das Verfahren nunmehr gemeinsam mit der Charité und Partneereinrichtungen in Warschau im Rahmen einer klinischen Studie bei Schlaganfallpatienten erprobt werden. (H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

**Entwicklung von Referenzverfahren zur Blutzellzählung unter Verwendung immunologischer Markierungen**

Für die zuverlässige Ermittlung von Zellkonzentrationen im Vollblut ist eine Kombination von Streulichtmessungen mit immunochemischen Färbemethoden notwendige Voraussetzung. Hierbei nutzt man die Spezifität von Antikörpern, um die Zellen anhand ihrer auf der Oberfläche befindlichen, zelltypischen Antigene zu identifizieren. Zur Entwicklung einer Referenzmethode für die Messung der Zellkonzentration von z. B. Blutplättchen mit Hilfe derartiger Färbemethoden wurden erste Untersuchungen durchgeführt, um die Kinetik der Antikörpermarkierungen von Zellen zu charakterisieren. (S. Schädel, FB 8.3, sandra.schaedel@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

**Datenanalyse und Modellrechnungen des Oberflächen-EKGs beim Kaninchenherzen**

Im Zusammenarbeit mit der Universität Leipzig wurden Daten zum zeitlichen Verlauf des Oberflächen-EKGs auf einem isolierten Kaninchenherzen mit Hilfe von vier Feldern mit je 64 Elektroden aufgenommen und im Hinblick auf Kenngrößen wie QRS-Zeit und mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit der Anregung des Muskelgewebes analysiert. Diese Größen werden mit Simulationsrechnungen in einem Modell eines Kaninchenventrikels verglichen. Die Änderung der Kenngrößen in Folge der Zugabe eines antiarrhythmischen Medikamentes wird quantitativ korrekt im Modell reproduziert. (I. Romero, S. Bauer, FB 8.4, steffen.bauer@ptb.de, inaki.romero@ptb.de)

**Simulationsrechnungen zum Einsatz magnetischer Nanopartikel in der Krebstherapie**

Die Verwendung magnetischer Nanopartikel als Wirkstoffträger stellt eine viel versprechende Methode in der Krebstherapie dar. Eine Ortung und Quantifizierung der Nanopartikel kann aus ihrem Magnetfeld mit Hilfe geeigneter Modelle erfolgen. Dazu werden Simulationsrechnungen vorgenommen, denen außer einzelnen Dipolen auch ausgedehnte Quellenmodelle und die Multipolentwicklung zur Beschreibung der Partikelverteilungen zugrunde liegen. (W. Haberkorn, G. Lindner, FB 8.4, wolfgang.haberkorn@ptb.de, gert.lindner@ptb.de)

**Richtlinie für das „Digitale Wahlstiftsystem“ erarbeitet**

Gemeinsam mit dem Hamburger Landeswahlamt sind die technischen Anforderungen an ein spezielles Wahlsystem, das „digitale Wahlstiftsystem“, das ab 2008 bei der Bürgerschaftswahl in der Freien und Hansestadt Hamburg zur Anwendung kommen soll, erarbeitet worden. Diese Anforderungen bilden sowohl die Grundlage für die Ausschreibung, für die Entwicklung sowie die Prüfung des Wahlsystems. Sie sind Bestandteil einer neuen Hamburger Wahlgeräteverordnung geworden. (N. Greif, FB 8.5, norbert.greif@ptb.de)

### **Verfahren zur Zulassung von Inspektionsstellen für Spielgeräte etabliert**

Mit der Novelle der Spielverordnung ist der PTB die Aufgabe übertragen worden, Stellen für die im zweijährigen Zyklus erforderliche Überprüfung von Geldspielgeräten zuzulassen. Neben der Stellenzulassung sieht die Verordnung die Überprüfung der Geräte durch öffentlich bestellte und vereidigte Sachverständige vor. Einige Gesprächsrunden zum Feststellen der besonderen Fachkunde von Antragstellen auf öffentliche Bestellung haben unter Mitwirkung der PTB stattgefunden, für mehr als zehn Sachverständige ist die Bestellung und Vereidigung bereits vollzogen. Damit sind die Voraussetzungen hergestellt, dass das neue System der Geräteüberprüfung wie vorgesehen ab Frühjahr 2008 seinen Betrieb in breitem Umfang aufnehmen kann. (H. Moeck, FB 8.5, hartmut.moeck@ptb.de)

# Der Deutsche Kalibrierdienst

## Aufgaben des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) in der PTB

In Deutschland ist die PTB zentraler Ansprechpartner für die Industrie in Fragen der Messtechnik. Die Weitergabe der Einheiten wird durch die Akkreditierungen des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) größtenteils auf die Ebene der industriellen Messtechnik verlagert. Die 400 DKD-Kalibrierlaboratorien werden durch die DKD-Akkreditierungsstelle kompetent überwacht und in nationalen und internationalen Gremien vertreten.

DKD-Kalibrierscheine gewährleisten den Nachweis für die messtechnische Rückführung auf nationale oder internationale Normale.

Vor dem Hintergrund der Globalisierung und der stark exportorientierten deutschen Wirtschaft muss die weltweite Anerkennung der DKD-Kalibrierscheine gewährleistet sein. Hierzu ist die Mitgliedschaft und Anerkennung in der EA (European co-operation for Accreditation) und der ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation) notwendig.

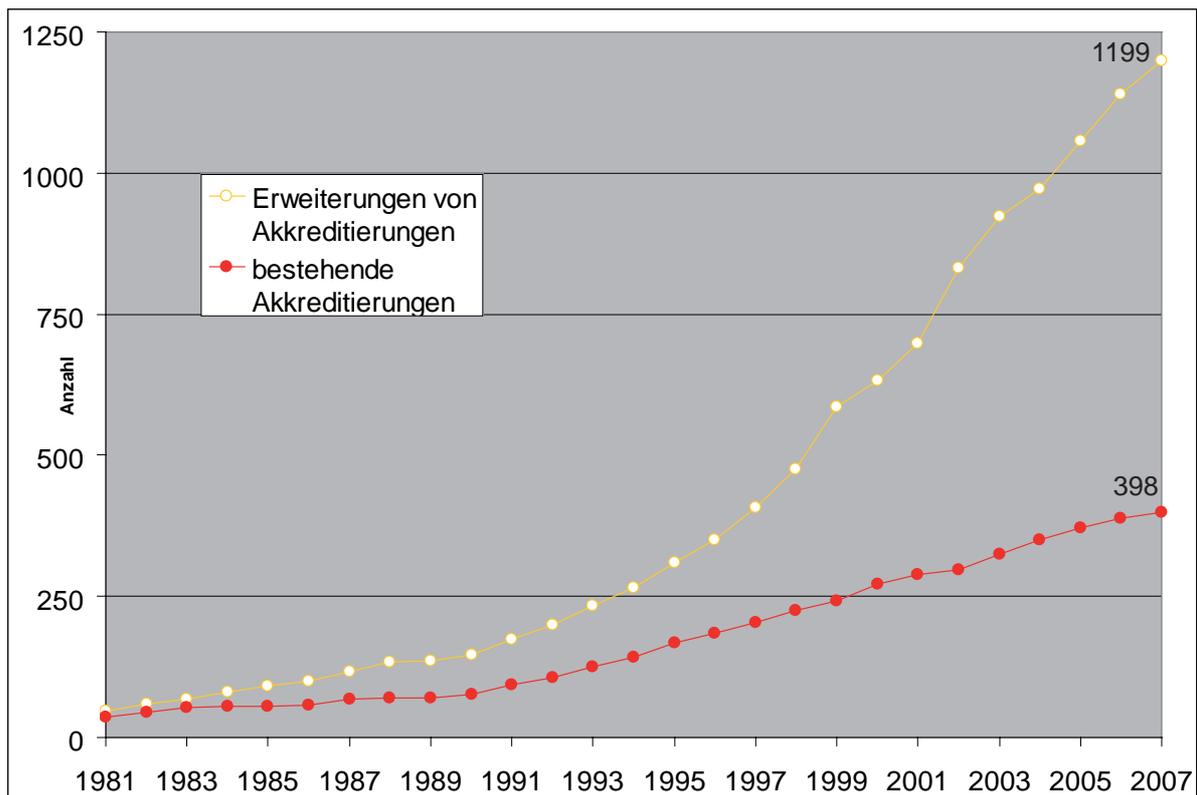
Im September 2007 konnte die EA-Evaluierung des DKD aus dem Jahre 2006 nach diversen organisatorischen Veränderungen erfolgreich abgeschlossen werden. Die Dienstaufsicht des Leiters DKD liegt jetzt beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

Das DKD-System ist mit derzeit etwa 360 akkreditierten Kalibrierlaboratorien in Deutschland ein wesentlicher Bestandteil des Technologietransfers auf dem Gebiet der Metrologie.

Im Ausland sind derzeit über 40 Laboratorien (z. T. nationale Metrologieinstitute, NMIs) durch den DKD akkreditiert. Durch die zunehmende Zahl von Auslandsanfragen und die verstärkte Notwendigkeit der Ressourcenschonung wurde die Auslandsstrategie des DKD verändert. Zukünftig werden hauptsächlich Anträge aus NMIs angenommen, sofern keine anerkannte nationale Akkreditierungsstelle im jeweiligen Land vorhanden ist. Als eine Ausnahme gelten Tochterunternehmen von DKD-akkreditierten deutschen Firmen.

Ende 2006 wurde dem DKD als zusätzliche Aufgabe die Akkreditierung und Überwachung von benannten Stellen nach der europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) übertragen, sodass der DKD nun auch im gesetzlich geregelten Bereich arbeitet. Zwar wird die Zahl der Akkreditierungen deutlich unter dem Umfang der staatlich anerkannten Prüfstellen bleiben, aber diese zusätzliche Fachaufgabe bedeutet eine erhebliche Erweiterung des bisherigen Arbeitsgebietes „Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien“. Zukünftig werden die benannten Stellen durch den DKD nach den einschlägigen Normen für Prüflaboratorien, Inspektionsstellen und Zertifizierungsstellen begutachtet und akkreditiert. Voraussetzung hierfür ist allerdings die Einhaltung verschiedener Unabhängigkeitskriterien, die organisatorische Maßnahmen in den bisherigen Prüfstellen nach sich ziehen.

In Kürze ist mit einer europäischen Richtlinie zu rechnen, in der die Akkreditierung als ein hoheitlicher Akt festgeschrieben wird. Dies wird auch Rückwirkungen auf das deutsche Akkreditierungssystem haben. Geplant ist für das Jahr 2010 die Errichtung einer deutschen Akkreditierungsstelle.



Die Entwicklung des DKD und seine Akzeptanz bei den beteiligten Industriefirmen lässt sich nicht nur an der nach wie vor wachsenden Anzahl der akkreditierten Laboratorien ablesen, sondern auch an deren Erweiterungen. Die DKD-Laboratorien passen ihre Kalibriermöglichkeiten laufend den Erfordernissen des Marktes bzw. den gestiegenen Anforderungen an die Messgenauigkeit an. Die derzeitige Gesamtzahl akkreditierter DKD-Laboratorien resultiert aus 17 Neuakkreditierungen im Berichtsjahr, denen sieben Rücknahmen der Akkreditierungen, meistens durch Firmenzusammenschlüsse, gegenüberstehen.



# Kuratorium

## Mitglieder

Präsident des Kuratoriums

**Ministerialdirigent Detlef Dauke**

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin

Stellvertretender Präsident des Kuratoriums

**Prof. Dr. h. c. Dr. rer. nat. Klaus von Klitzing**

Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

**Dr.-Ing. Axel Anderlohr**

Geschäftsführer TÜV Pfalz GmbH, Kaiserslautern

**Prof. Dr. rer. nat. Gisela Anton**

Physikalisches Institut IV der Universität Erlangen

**Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Auweter-Kurtz**

Präsidentin der Universität Hamburg

**Prof. Dr. Christian Paul Beckervordersandforth**

Direktor E.ON Ruhrgas AG

**Dr. rer. nat. Markus Gerhard Dilger**

Leiter Corporate Research  
Carl Zeiss, Oberkochen

**Prof. Dr. rer. nat. Olaf Dössel**

Institut für Biomedizinische Technik  
Universität Karlsruhe

**Prof. Dr. Theodor W. Hänsch**

Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching  
und Ludwig-Maximilians-Universität, München

**Prof. Dr. Axel Haase**

Präsident der Julius-Maximilian Universität,  
Würzburg

**Prof. Dr. Klaus-Peter Jäckel**

BASF SE, Ludwigshafen

**Dipl. Phys. Veronica Martens**

Leiterin des Metrologiezentrums  
Sartorius AG

**Prof. Dr. Rainer Metternich**

Vizepräsident Basic Research  
Merck & Co., Inc., West Point (USA)

**Prof. Dr. rer. nat. Jüßen Mlynek**

Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft, Berlin

**Prof. Dr.-Ing. Joachim Scheuren**

Geschäftsführer der Müller-BBM GmbH, Planegg

**Prof. Dr. sc. nat. Joachim P. Schoenes**

Technische Universität, Braunschweig

**Prof. Dr. Hans Schuler**

Vice President Engineering Service,  
BASF SE, Ludwigshafen

**Dr. rer. nat. Wolfgang Schwitz**

Direktor des Bundesamtes für Metrologie  
Bern-Wabern (Schweiz)

**Dr. rer. nat. Thomas Sesselmann**

Geschäftsführer  
Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut

**Dr. rer. nat. Augustin Siegel**

Leiter Forschung und Technologie  
Carl Zeiss, Oberkochen

**Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. Lothar Siekmann**

Institut für Klinische Biochemie, Universität Bonn

**Ind.-Kfm. Peter von Siemens**

Mitglied des Aufsichtsrats  
Siemens AG, München

**Dr.-Ing. Peter Maximilian Stehle**

Bad Homburg

**Prof. Dr. h. c. Dr. rer. nat. Joachim Treusch**

Präsident der Jacobs Universität Bremen gGmbH

**Prof. e. h. Dr. rer. nat. Martin Winterkorn**

Vorstandsvorsitzender der Volkswagen AG,  
Wolfsburg

**Dr.-Ing. Klaus Rudolf Wurster**

Geschäftsführer  
National Rejectors Inc. GmbH, Buxtehude

Ehrenkurator

**Prof. Dr. h. c. mult. Dr. rer. nat. Heinz-Georg  
Wagner**

Institut für Physikalische Chemie  
Universität Göttingen

Präsidium		
Präsident	Vizepräsident	Mitglied des Präsidiums
Prof. Dr. E. O. Göbel ☎ 1000	Prof. Dr. M. Peters ☎ 2000	Prof. Dr. M. Kühne ☎ 3000

Abteilung 1  
**Mechanik und Akustik**

Dr. R. Schwartz  
☎ 1010

Abteilung 2  
**Elektrizität**

Dr. H. Bachmair  
☎ 2010

Abteilung 3  
**Chemische Physik u.  
Explosionsschutz**

Dr. K.-D. Sommer  
☎ 3010

Abteilung 4  
**Optik**

Dr. F. Riehle  
☎ 4010

Abteilung 5  
**Fertigungsmesstechnik**

Dr. G. Wilkening  
☎ 5010

Fachbereich 1.1  
Masse

Dr. P. Zervos  
☎ 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  
Nano- und  
Mikrometrologie

Dr. L. Koenders  
☎ 5100

Fachbereich 1.2  
Festkörpermechanik

Dr. R. Kümme  
☎ 1120

Fachbereich 2.2  
Hochfrequenz und  
Felder

Dr. T. Schrader  
☎ 2200

Fachbereich 3.2  
Analytische Mess-  
technik und Druck

Dr. P. Ulbig  
☎ 3200

Fachbereich 4.2  
Bild- und Wellenoptik

Dr. E. Buhr  
☎ 4200

Fachbereich 5.2  
Längen- und  
Winkelteilungen

Dr. H. Bosse  
☎ 5200

Fachbereich 1.3  
Kinematik

Dr. F. M. Jäger  
☎ 1300

Fachbereich 2.3  
Elektrische  
Energietechnik

Dr. M. Kahmann  
☎ 2300

Fachbereich 3.3  
Chemisch-physikal.  
Stoffeigenschaften

Dr. H. Bauer  
☎ 3300

Fachbereich 4.3  
Quantenoptik und  
Längeneinheit

Dr. P. Becker  
☎ 4300

Fachbereich 5.3  
Koordinatenmess-  
technik

Dr. F. Härtig  
☎ 5300

Fachbereich 1.4  
Gase

\*Dr. R. Schwartz  
☎ 1010

Fachbereich 2.4  
Quantenelektronik

Dr. A. Zorin  
☎ 2420

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. A. Abou-Zeid  
☎ 5400

Fachbereich 1.5  
Flüssigkeiten

Dr. G. Wendt  
☎ 1500

Fachbereich 2.5  
Halbleiterphysik und  
Magnetismus

Dr. U. Siegner  
☎ 2500

Fachbereich 3.5  
Zünddurchschlags-  
prozesse

Dr. U. Klausmeyer  
☎ 3500

Fachbereich 4.5  
Optische Technologien

\*Dr. F. Riehle  
☎ 4010

Fachbereich 5.5  
Wissenschaftlicher  
Gerätebau

Prof. Dr. F. Löffler  
☎ 5500

Fachbereich 1.6  
Schall

Dr. Ch. 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  
Angewandte Akustik

Prof. Dr. W. Scholl  
☎ 1700

Fachbereich 3.7  
Zündquellensicherheit

Dr. M. Beyer  
☎ 3700

## Deutscher Kalibrierdienst

Akkreditierungsstelle des  
Deutschen Kalibrierdienstes

**DKD**

Dr. W. Bosch  
☎ 1900      Aufsicht: BMWi

## Benannte Stellen nach europäischen Richtlinien (Nummer: 0102)

Zertifizierungsstelle für  
Messgeräte  
EG-Richtlinie 2004/22/EG  
Dr. H. Stolz  
im Fachbereich Q.3  
☎ 8320

Zertifizierungsstelle für  
nichtselbsttätige Waagen  
EG-Richtlinie 90/384/EWG  
Dr. P. Zervos  
im Fachbereich 1.1  
☎ 1100

Zertifizierungsstelle für  
Explosionsschutz  
EG-Richtlinie 94/9/EG  
Dr. U. Johannsmeyer  
im Fachbereich 3.6  
☎ 3600

# Organigramm

Stand: 1. Dezember 2007

**Fachbereich PSt  
Präsidentialer Stab**  
  
Dr. J. Stenger  
☎ 1009

**Presse- und  
Öffentlichkeitsarbeit**  
  
Dr. Dr. J. Simon  
☎ 3005

**Vertreter d. Präsidenten  
in Berlin**  
  
Dr. W. Buck  
☎ (Ch) 7454

**Qualitätsmanager**  
  
Dr. A. Odin  
☎ 8330

**Abteilung 6  
Ionisierende Strahlung**  
  
Dr. H. Janßen  
☎ 6010

**Abteilung 7  
Temperatur und  
Synchrotronstrahlung**  
  
Dr. W. Buck  
☎ (Ch) 7454

**Abteilung 8  
Medizinphysik und  
metrologische  
Informationstechnik**  
Prof. Dr. H. Koch  
☎ (Ch) 7343

**Abteilung Q  
Wissenschaftlich-  
technische  
Querschnittsaufgaben**  
Dr. R. Weiß  
☎ 8010

**Abteilung Z  
Verwaltungsdienste**  
  
C. Tampier  
☎ 9010

**Fachbereich 6.1  
Radioaktivität**  
  
Dr. D. Arnold  
☎ 6100

**Fachbereich 7.1  
Photonenradiometrie**  
  
Dr. G. Ulm  
☎ (Ch) 7312

**Fachbereich 8.1  
Medizinische  
Messtechnik**  
  
Dr. B. Ittermann  
☎ (Ch) 7318

**Referat Q.11  
Wissenschaftliche  
Bibliotheken**  
  
Dr. J. Meier  
☎ 8131

**Referat Z.11  
Haushalt**  
  
M. Wasmuß  
☎ 9110

**Fachbereich 6.2  
Dosimetrie für die  
Strahlentherapie**  
  
Dr. H.-M. Kramer  
☎ 6200

**Fachbereich 7.2  
Detektorradiometrie**  
  
Dr. J. Seidel  
☎ (Ch) 7418

**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  
Hochtemperatur- und  
Vakuumphysik**  
  
Dr. J. Hollandt  
☎ (Ch) 7369

**Fachbereich 8.3  
Biomedizinische Optik**  
  
Prof. Dr. R. Macdonald  
☎ (Ch) 7542

**Fachbereich Q.3  
Gesetzl. Messwesen  
u. Technologietransfer**  
  
Dr. W. Schulz  
☎ 8300

**Referat Z.13  
Beschaffung,  
Justitiariat**  
  
M. Gahrens  
☎ 9130

**Fachbereich 6.4  
Ionenbeschl. u. Refe-  
renzstrahlungsfelder**  
  
Dr. F. Wismann  
☎ 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  
Tiefemperaturthermo-  
dynamik u.-technologie**  
  
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. B. Großwendt  
☎ 6600

**Fachbereich 7.6  
Wärme**  
  
Dr. T. Lederer  
☎ (Ch) 7230

**Fachbereich 8.6  
Metrologische  
Informationstechnik**  
  
Prof. Dr. D. Richter  
☎ (Ch) 7479

**Fachbereich Q.61  
Technischer Dienst**  
  
M. Frühauf  
☎ 9170

**Referat Z.16  
Innerer Dienst**  
  
M. List  
☎ 9160

**Fachbereich 6.71  
Betrieblicher  
Strahlenschutz**  
  
Dr. R. Simmer  
☎ 6710

**Fachbereich IB.T  
Technisch-wissensch.  
Infrastruktur Berlin**  
  
Dr. F. Melchert  
☎ (Ch) 7446

**Fachbereich 8.7  
Metrologische  
Informationstechnik**  
  
Prof. Dr. D. Richter  
☎ (Ch) 7479

**Fachbereich Q.62  
Technischer Dienst**  
  
M. Frühauf  
☎ 9170

**Referat Z.17  
Ausbildung**  
  
P. J. Dickers  
☎ 9240

## Ausschüsse

Personal	A-PE	Dr. Weiß	☎ 8010
Investitionen	A-IV	Prof. Dr. Peters	☎ 2000
IT-Infrastruktur	A-IT	Dr. Hackel	☎ 8400
Metrologische Dienstleistungen	A-MD	Prof. Dr. Peters	☎ 2000
Internationale Zusammenarbeit	A-IZ	Prof. Dr. Kühne	☎ 3000
Qualitätsmanagement	A-QM	Dr. Odin	☎ 8330
Forschungsprogramme	A-FP	Dr. Stenger	☎ 1009

## Gesamtpersonalrat

R. Thomas ☎ (Ch) 7360

## Örtlicher Personalrat Braunschweig

U. Meyer ☎ 1090

## Örtlicher Personalrat Berlin

R. Thomas ☎ (Ch) 7360

## Gleichstellungsbeauftragte

C. Krügener ☎ 9133

## Gesamtvertretung der Schwerbehinderten

T. Quandt ☎ 1097

## Vertretung der Schwerbehinderten Braunschweig

T. Quandt ☎ 1097

## Vertretung der Schwerbehinderten Berlin

I. Wichmann ☎ (Ch) 7448

## Zeichenerklärung

☎ (05 31) 592-0 Braunschweig

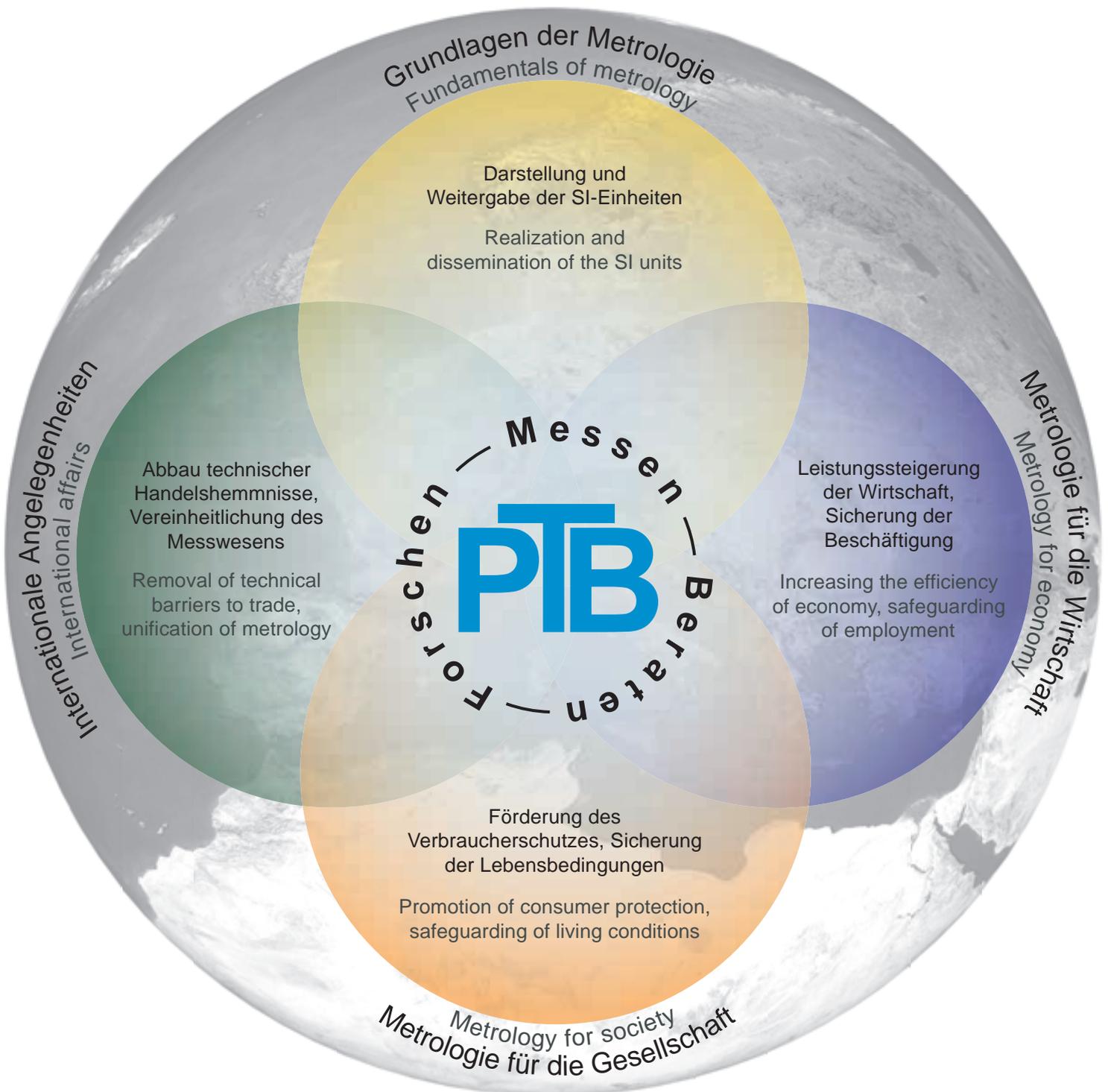
Durchwahl 592 ...

☎ (030) 34 81-1 Berlin Charlottenburg

(Ch) Durchwahl 34 81 ...

\* 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, so dass 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 metrologischer 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) größtenteils auf die Ebene der industriellen Messtechnik verlagert. Die DKD-akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden durch die DKD-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 genom-

men werden können. Eine wichtige Rolle im Knowhow-Transfer von der PTB in die deutsche Wirtschaft übernehmen Seminare und Fachtagungen, die wissenschaftlich-technische Entwicklungen wichtiger Arbeitsgebiete der PTB zum Thema haben. Speziell auf die Bedürfnisse von kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) ist das Mittelstandsforum der PTB ausgerichtet. Es stellt eine Internet-Plattform dar, welche die Dienstleistungsangebote der PTB einschließlich der Patentdatenbank in übersichtlicher Form aufzeigt und insbesondere auch Kunden, die mit der Struktur der PTB nicht vertraut sind, Navigationshilfen anbietet, die zu den richtigen Informationen und Ansprechpartnern führen.

### **Metrologie für die Gesellschaft**

In weiten Bereichen des täglichen Lebens besteht ein besonderes öffentliches Interesse an richtigen Messergebnissen und zuverlässigen Messeinrichtungen. Die Metrologie für die Gesellschaft umfasst daher überwiegend Aufgaben, die gesetzlich geregelt sind. In einer Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen sind der PTB verschiedene Tätigkeiten zugewiesen; in den meisten dieser Rechtsvorschriften wird sie als einzige Stelle genannt. Hierin liegt eine besondere Verantwortung. Es ist Aufgabe der PTB, „Messtechnik und -verfahren zum angemessenen Schutz der Verbraucher im geschäftlichen und amtlichen Verkehr, der arbeitenden Bevölkerung im beruflichen Umfeld, zum Erhalt und der Wiederherstellung der Gesundheit, für die persönliche und industrielle Sicherheit sowie zum Schutz der Natur und Umwelt“ zur Verfügung zu stellen und einzusetzen.

Ein Schwerpunkt in diesem Bereich ist die Bauartzulassung bzw. Baumusterprüfung von Messgeräten im Rahmen nationaler oder europäischer Rechtsvorschriften, zum Beispiel auf den Gebieten Energiemesstechnik für elektrische Energie, Gas und Wasser (Wärme, Kälte), Sicherheit im Straßenverkehr (Geschwindigkeitsüberwachung, Atemalkohol), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und Umweltmesstechnik (Absolutmessungen in der Schadstoff- und Spurenanalyse, Lärmschutz etc.). Die meisten Bauartzulassungen erfüllt die PTB auf der Grundlage des Eichgesetzes. Bedingt durch die Umsetzung der Europäischen Messgeräte-

richtlinie (MID) werden das Eichgesetz und die Eichordnung novelliert. Die PTB ist inzwischen als benannte Stelle nach europäischem Recht anerkannt, so dass den Kunden aus der Industrie die von der MID geforderten Konformitätsbewertungsverfahren angeboten werden können.

Die PTB ist gemäß Medizinproduktegesetz zuständig für die Sicherstellung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Medizin. So entwickelt die PTB neue oder verbessert bereits existierende Messverfahren für Diagnostik und Therapiekontrolle. Zum anderen leistet die PTB entscheidende Beiträge durch Entwicklung von Normalen und Normalmesseinrichtungen, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung oder für medizinische Geräte mit Messfunktion sowie durch Arbeiten zur Rückführung von analytischen Messungen in der klinischen Chemie auf die SI-Einheiten bzw. Normalmessverfahren.

In Absprache und Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ist die PTB auf den wirtschaftlich und vor allem gesellschaftlich wichtigen Gebieten der physikalischen Sicherheitstechnik und des Explosionsschutzes elektrischer Betriebsmittel tätig. Auf Grund ihrer Kompetenz fällt ihr dabei eine internationale Referenzfunktion zu. Gleiches gilt für die Arbeiten auf dem Gebiet des Strahlenschutzes.

### Internationale Angelegenheiten

Mit der Gründung der Meterkonvention im Jahre 1875 wurde auf höchster staatlicher Ebene manifestiert, dass Metrologie eine internationale Angelegenheit ist. Durch die zunehmende Globalisierung von Wirtschaft und Handel hat diese Aufgabe in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Im Geschäftsbereich „Internationale Angelegenheiten“ ist es Aufgabe der PTB, „zur internationalen Einheitlichkeit des Messwesens und damit zum Abbau nicht tarifärer Handelshemmnisse beizutragen“. Hierzu dienen Kooperationen mit anderen nationalen Metrologieinstituten, maßgebliche Mitarbeit in den internationalen Gremien und technisch-ökonomische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern.

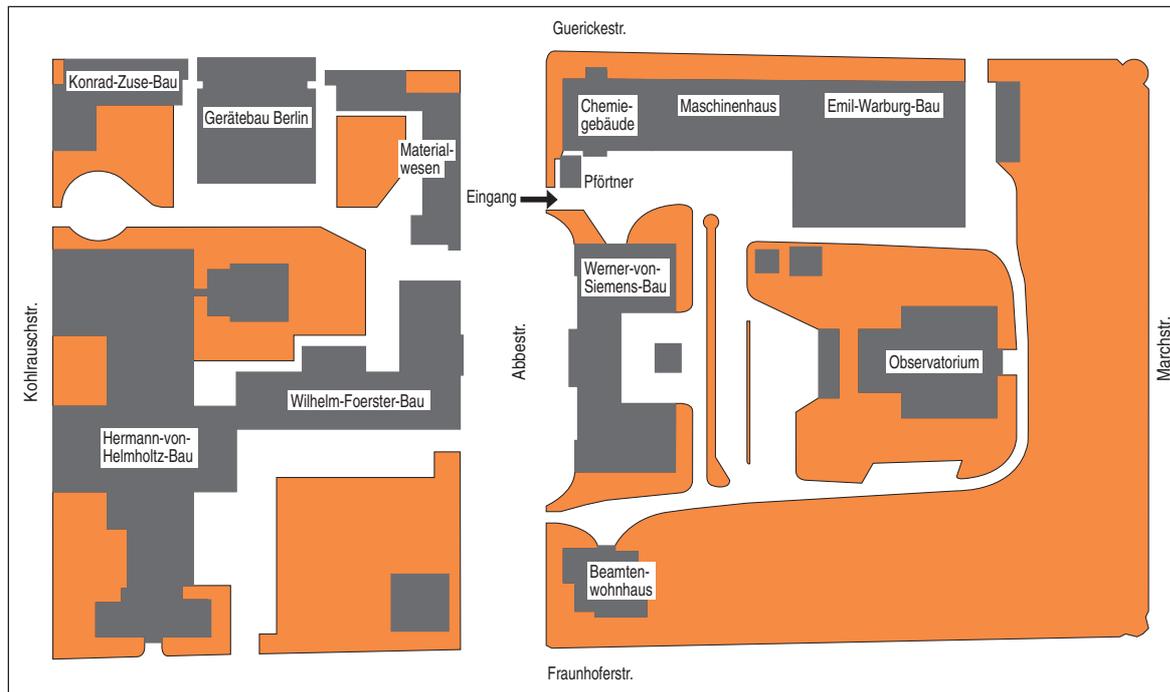
Wesentliches Element der Kooperation mit Partnerinstituten sind internationale „Key Comparisons“ von Normalen und Normalmesseinrichtungen und sich daraus ableitende F&E-Arbeiten. Im Rahmen der internationalen Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Messergebnissen und Zertifikaten der nationalen Metrologieinstitute und der akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien kommt diesen Vergleichen besondere Bedeutung zu.

Die Anforderungen an die Metrologie werden in Zukunft sowohl vom Umfang als auch von der Komplexität her stetig wachsen, so dass ein einzelnes Institut nicht sämtlichen Ansprüchen auf Dauer genügen kann. Koordination und Kooperation bei F&E und Dienstleistungen sind daher unumgänglich. Die rechtsfähige europäische Metrologieorganisation EURAMET stellt hier die erforderlichen Strukturen zur Durchführung eines europäischen Metrologieforschungsprogramms zur Verfügung.

Neben ihrem europäischen Engagement arbeitet die PTB ebenfalls maßgeblich in allen internationalen Metrologieorganisationen mit, zu einem erheblichen Teil in leitender Funktion. Außerdem leistet die PTB einen wesentlichen Beitrag zur internationalen Normung durch Mitarbeit in Gremien von ISO, IEC, CEN, CENELEC. Die weltweite Angleichung von Anforderungen und Prüfvorschriften im gesetzlichen Messwesen dient dem Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse und damit der exportorientierten deutschen Messgeräteindustrie. Mit diesen Zielen arbeitet die PTB aktiv in OIML und WELMEC mit.

Einen erheblichen Umfang nimmt die Technische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern ein. Die PTB gibt ihre Erfahrungen weiter und leistet aktive Hilfe beim Aufbau der technischen Infrastruktur für die Metrologie sowie für das Normen-, Prüf- und Qualitätswesen einschließlich der Akkreditierung und der Zertifizierung. Die finanziellen Mittel werden überwiegend vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) sowie weiteren nationalen und internationalen Gebern, wie der EU und der Weltbank, zur Verfügung gestellt.

# Geländeplan Berlin-Charlottenburg



100 Meter

Legende zum Geländeplan Braunschweig

## Präsidium

Zentralgebäude

## Abteilung Z

**Verwaltung und Betrieb**  
Annahme- und Versandgebäude  
Fahrbereitschaft  
Gästehaus  
Hauptwerkstatt mit Materiallager  
Kasino  
Kohlrausch-Bau  
Vieweg-Bau  
Wache  
Wirtschaftsgebäude  
Zentralgebäude

## Abteilung 1

**Mechanik und Akustik**  
Abbe-Bau  
Bessel-Bau  
Bunsen-Bau  
Gauß-Bau  
Helmholtz-Bau I  
Helmholtz-Bau II  
Leibniz-Bau  
Prandtl-Bau  
Schlichting-Bau  
Willy-Wien-Turm

## Abteilung 2

**Elektrizität**  
Heisenberg-Bau  
Hertz-Bau  
Kohlrausch-Bau  
Meißner-Bau  
Ohm-Bau  
Prandtl-Bau  
Reinraumzentrum  
Schering-Bau  
Gumlich-Haus

## Abteilung 3

**Thermodynamik und  
Explosionsschutz**  
Abbe-Bau  
Bunsen-Bau  
Explosionsprüfstand  
Nernst-Bau  
Planck-Bau  
Raumzellen-Bau IV  
Sicherheitstechnik  
Weber-Bau

## Abteilung 4

**Optik**  
Bessel-Bau  
Einstein-Bau  
Giebe-Bau  
Kopfermann-Bau  
v.-Laue-Bau  
Paschen-Bau  
Reinraumzentrum  
Vieweg-Bau

## Abteilung 5

**Fertigungsmesstechnik**  
Abbe-Bau  
Bessel-Bau  
Bothe-Bau  
Hauptwerkstatt  
Kohlrausch-Bau  
Meißner-Bau  
Meitner-Bau  
Ohm-Bau  
Paschen-Bau  
Reinraumzentrum

## Abteilung 6

**Ionisierende Strahlung**  
Bothe-Bau  
Chadwick-Bau  
Elster-Geitel-Bau  
Geiger-Bau  
Hahn-Bau  
Meitner-Bau  
Röntgen-Bau

## Abteilung Q

**Wissenschaftlich-technische  
Querschnittsaufgaben**  
Annahme- und Versandgebäude  
Betriebswerkstätten  
Bibliothek  
Elektrozentrale  
Feuerwehr  
Kohlrausch-Bau  
Vieweg-Bau  
Zentralgebäude

## PÖ

Zentralgebäude

unterstrichen: Sitz Abteilungsleitung