

# Physikalisch- Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin

## Jahresbericht 2006



# Vorwort

Braunschweig ist Stadt der Wissenschaft 2007, so hat es der Wettbewerb des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft beschieden. Natürlich ist das auch für die PTB Verpflichtung und Gelegenheit, sich noch stärker als bisher in der Öffentlichkeit zu präsentieren. Als Auftakt zu einer umfangreichen Veranstaltungsserie in 2007 organisierte die PTB daher im vergangenen Jahr, sozusagen als Vorspeise zur Stadt der Wissenschaft, die „Lange Nacht der Zeit“ vom 28. auf den 29. Oktober. Dieses – auch im wahrsten Sinne – Feuerwerk aus Wissenschaft, Kultur, Kunst und Spaß lockte über 10 000 Besucher an. Ein unglaublicher Erfolg, der uns und die Stadt über die Maßen freut.

Basis für diese und andere zum Teil durchaus spektakuläre Aktionen ist natürlich die fachliche Arbeit der PTB als Forschungseinrichtung und als nationale und teilweise auch internationale Dienstleisterin. Als Forschungseinrichtung haben wir uns im Rahmen der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder massiv eingebracht, leider aber nicht immer mit dem erhofften Erfolg. Unabhängig davon bemühen wir uns weiter, die Verbindungen zu unseren universitären und außeruniversitären Partnern zu festigen und zu vertiefen; das Berliner Neuro Imaging Center, die unter Führung des Max-Delbrück-Zentrums für molekulare Medizin nun anlaufende 7-T-Kernspintomographie-Kooperation und die mit der TU Braunschweig erfolgten Gründungen des „Joint Optical Metrology Center“ sowie des „Terahertz Communications Lab“ sollen hier beispielhaft genannt sein. Weiterhin bearbeitet die PTB zurzeit über 300 Forschungsvorhaben von öffentlichen oder industriellen Auftraggebern aus dem In- und Ausland.

Die Ablösung des nationalen Eichgesetzes durch die europäische Messgeräte-Richtlinie am 30. Oktober ist in der PTB aufgrund der guten internen Vorbereitung und gezielter Informationsveranstaltungen für unsere Kunden geräuschlos und glatt verlaufen. Pünktlich zum 30. Oktober wurde die erste Konformitätsbescheinigung gemäß der MID ausgestellt, und wir werden auch weiterhin – davon sind wir überzeugt – trotz der durch die MID geänderten Rahmenbedingungen den Schutz des Verbrauchers und Bürgers als hochwertiges Ziel vorrangig im Auge haben, dabei aber der Wirtschaft und insbesondere den Herstellern und Vertreibern von Messgeräten ein wertvoller und geschätzter Partner bleiben.

Der vorliegende Jahresbericht gibt neben den Zahlen und Fakten wie gewohnt einen repräsentativen Querschnitt über die Arbeit der PTB wieder. Weitere und detaillierte Informationen finden sich im Internet unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de), wobei ich insbesondere auf die für den Mittelstand (KMUs) konzipierte Informationsplattform „PTB – Partner des Mittelstandes“ hinweisen möchte.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der PTB danke ich für die geleistete Arbeit und das ungebrochene Engagement.

Ernst O. Göbel



# Foreword

Braunschweig is the City of Science 2007; this was the outcome of the competition held by the Stifterverband für die deutsche Wissenschaft (Founders' Federation for Science in Germany). Naturally, this is an obligation and opportunity also for the PTB to present itself still more intensively than up to now in the public eye. As a prelude to an extensive series of events in 2007, the PTB thus last year organised – so-to-say as a starter to the City of Science – the Long Night of Time (Lange Nacht der Zeit) from 28 to 29 October. This – also in the truest sense of the word – fireworks of science, culture, art and fun attracted more than 10 000 visitors – an unbelievable success which has given us and the city enormous pleasure.

The basis for these and other, in part, truly spectacular events is naturally the scientific and technical work of PTB as research institution and as national and partly also international service provider. As research institution we have become massively involved within the framework of the Initiative for Excellence of the Federation and the federal states, but unfortunately not always with the success hoped for. Independent of this, we further endeavour to reinforce and deepen the association with our university and university-external partners: the Berlin Neuro Imaging Center, the 7-T magnetic resonance imaging cooperation which, under the auspices of the Max Delbrück Center for Molecular Medicine, is now being launched, and the founding of the "Joint Optical Metrology Center", effected jointly with the TU Braunschweig, as well as the "Terahertz Communications Lab" are to be named here exemplarily. Furthermore, the PTB is currently working on more than 300 research projects for public or industrial customers, both domestic and foreign.

The replacement of the national Verification Act by the European Measuring Instruments Directive on 30 October went smoothly and silently in the PTB for our customers as a result of the good internal preparation and the well-targeted informational events. Punctually on 30 October, the first conformity certificate was issued in accordance with the MID, and we will also in future – of this we are convinced – have, in spite of the framework conditions altered by the MID, mainly the safety of the consumer and citizen in view as a premium goal, but thereby remaining a valuable and esteemed partner of the economy and particularly of the manufacturers and distributors of measuring instruments.

In addition to the facts and figures, the present annual report gives an account, as usual, of the work of the PTB in a representative cross section. Additional detailed information is to be found in the Internet under [www.ptb.de](http://www.ptb.de), whereby I would particularly like to point out the information platform "PTB – Partner des Mittelstandes" (PTB – partner of SMEs), designed for small- and medium-sized businesses (SMEs).

I thank all employees of the PTB for the work accomplished and for their enduring commitment.

Ernst O. Göbel

## Inhaltsverzeichnis

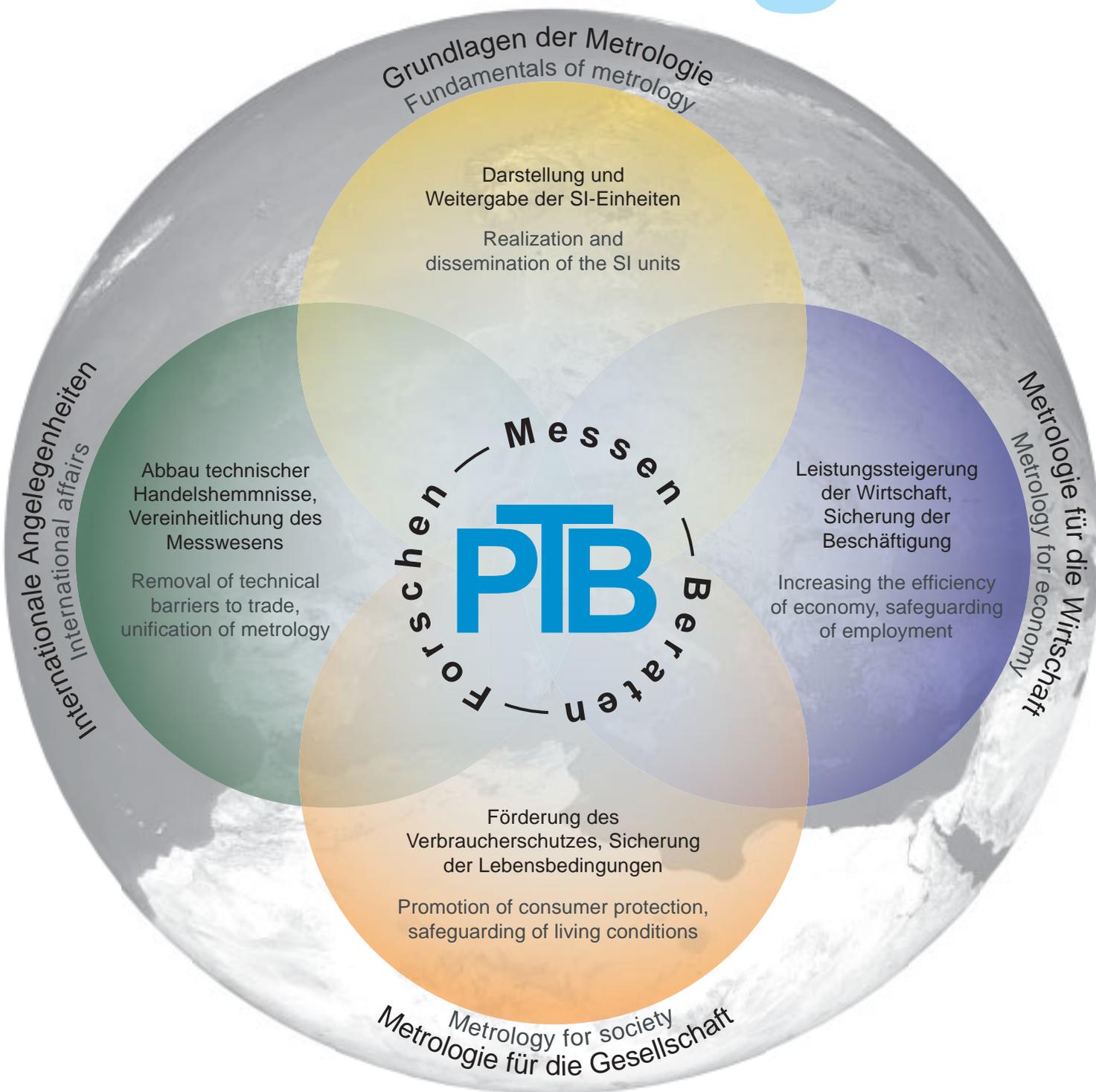
Vorwort • Foreword

Die PTB	5
Arbeitsgebiete und Ziele • Fields of work and objectives	6
Nachrichten des Jahres • News of the year	18
Zahlen und Fakten • Figures and facts	42
Die Abteilungen	52
Mechanik und Akustik	53
Elektrizität	69
Chemische Physik und Explosionsschutz	85
Optik	97
Fertigungsmesstechnik	111
Ionisierende Strahlung	123
Temperatur und Synchrotronstrahlung	135
Medizinphysik und metrologische Informationstechnik	149
Wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben	163
Der Deutsche Kalibrierdienst	173
Qualitätsmanagement	174
Die Anlagen	176
Kuratorium	177
Organigramm	178
Organisatorisches	180
Jahresbericht im Internet	181
Geländepläne	182



**PTB**  
**Die**

# Arbeitsgeb



# iete

**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* 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 nebenstehend graphisch dargestellten Arbeitsgebiete der PTB betrug im Berichtsjahr nahezu unverändert zum Vorjahr 65 %.

**The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) – the National Metrology Institute of Germany – providing scientific and technical services**

An efficient infrastructure for metrology, standardization, testing and quality assurance is a fundamental prerequisite for a modern industrial state. Only an optimized metrological infrastructure makes the proper use of technology for the benefit of man, for the efficient and ecologically compatible use of energy and raw materials and for the exchange of goods possible, even across borders. The Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig and Berlin, which comes under the auspices of the *Federal Ministry of Economics and Technology*, has been entrusted with this task in the Federal Republic of Germany.

The existence of federal institutes is based on a mandate given by the state and laid down in laws and ordinances. As regards the PTB, this mandate is of a constitutional nature, derived from the State's original responsibility for uniformity in metrology and for the safety and protection of the citizen. This concerns also the confidence which each individual, be it as a consumer, an authority or company, must have in the reliability and impartiality of measurements. It is the PTB's specific task, entrusted to it by the State, to make available to the society and to trade and industry an efficient metrological infrastructure recognized on international level. Research work and technological development serve to accomplish this task with competence and a sense of responsibility.

The percentage of research and development in all four fields of activity of the PTB, represented graphically opposite, amounted to 65 % in the year under report and was thus nearly unchanged with respect to the previous year.



## 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. Zentraler Ausgangspunkt ist dabei die präzise Bestimmung der Werte der zu Grunde liegenden Fundamentalkonstanten. Auch hier trägt die PTB mit sehr aufwendigen Experimenten (Avogadro-Konstante, Boltzmann-Konstante) wesentlich bei. 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

## Fundamentals of Metrology

The area “Fundamentals of Metrology” covers the work as defined in the Statutes for the realization and dissemination of the SI units and of legal time. These activities encompass in particular the development and provision of primary standards and standard measuring devices as well as of the secondary and transfer standards needed for the dissemination of the units. The mission is “to provide the foundation for the national metrology system, which meets the present and foreseeable future requirements”.

Especially challenging is the task to provide traceability of the SI units to fundamental constants, as has already succeeded for the second, the metre, the volt and the ohm, because, at least in our present understanding of physics, it can then be assumed that the individual units have been realized independently of location and time. The decision of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) to initiate preparatory measures for the redefinition of the units ampere, kelvin, kilogram and mole on the basis of natural constants has conferred additional topicality and importance to these activities. The central point of origin, thereby, is the precise determination of the values of the underlying fundamental constants. Here, too, the PTB makes a considerable contribution in the form of very complex experiments (Avogadro constant, Boltzmann constant). But also for the realization of units on the basis of classical principles, e.g. for dimensional metrology, the requirements for tolerable uncertainties increase permanently so that the existing technologies must be improved or new technologies be developed. Of increasing importance is the traceability of measurements in analytical and especially in clinical chemistry to internationally recognized standards or standard measuring devices developed and operated at the PTB and by its cooperation partners (BAM, UBA, DGKL) for selected organic and inorganic analytes. Of particular importance to society is the development of standards and standard measuring devices for medical diagnostics and therapy follow-up, for example for the dosimetry of ionizing radiation, ultrasound diagnostics or optical, bioelectric, biomagnetic and NMR diagnostic methods.

Ultraschall-Diagnostik oder optische, bioelektrische, biomagnetische und NMR-Diagnoseverfahren.

Nicht nur aus Sicht moderner Fertigungstechnik gewinnt das Gebiet der Nanometrologie zunehmend an Bedeutung, wobei dies nicht nur die quantitative dimensionelle Messung von Mikro- oder Nanostrukturen mit Auflösungen im Bereich einiger Atomdurchmesser beinhaltet, sondern auch von makroskopischen Objekten, z. B. Linsen- oder Spiegelsystemen für die Lithografie mit atomarer Auflösung. Hierzu werden in der PTB verschiedene, sich teilweise ergänzende Messverfahren entwickelt bzw. weiter entwickelt, wie z. B. Rastersondenmikroskopie, optische Mikroskopie einschließlich der optischen Nahfeldmikroskopie, Elektronenmikroskopie und Interferometrie.

Die Entwicklung und Herstellung von Normalen für die elektrische Spannung auf der Basis von Supraleitern (Josephson-Effekt) wurde ganz wesentlich durch Arbeiten in der PTB voran gebracht. Durch erfolgreichen Technologietransfer wurde Freiraum für neue Herausforderungen geschaffen, wie z.B. die Entwicklung programmierbarer Spannungsnormale für AC-Anwendungen oder die Entwicklung von Elementen und Schaltungen für quantenlimitierte Messprozesse. Nachdem der PTB mit ihren internationalen Kooperationspartnern (NRC (Kanada) und METAS (Schweiz)) auch mit dem AC-Quanten-Hall-Effekt ein Durchbruch gelungen ist, kann auch die elektrische Impedanzmessung bis zu Frequenzen in den kHz-Bereich mit fundamentaler Genauigkeit auf die Von-Klitzing-Konstante zurückgeführt werden.

Die Liste von zukunftsweisenden Themen aus dem Bereich der „Grundlagen der Metrologie“ ließe sich fast unbegrenzt fortsetzen, von der Darstellung der Kraftskala im Bereich kleinster und extrem großer Kräfte über Frequenzstandards für künftige optische Atomuhren, verbesserte Normale für die Photometrie, die Dosimetrie ionisierender Strahlung bis zu der Realisierung der Temperaturskala bei sehr tiefen und sehr hohen Temperaturen.

Not only in the case of modern production engineering is the field of nanometrology gaining increasingly in importance, encompassing not only the quantitative dimensional determination of micro or nanostructures with a resolution in the range of a few atomic diameters but also that of macroscopic objects, e.g. lens or mirror systems for lithography with atomic resolution. For these applications, the PTB develops and advances various measurement procedures such as scanning probe microscopy, optical microscopy including optical near field microscopy, electron microscopy and interferometry, which partly supplement one another.

The development and manufacture of standards for electric voltage on the basis of superconductors (Josephson effect) was moved forward very significantly due to ongoing work in the PTB. Through successful technology transfer, space for expansion was created for new challenges such as, e.g., the development of programmable voltage standards for ac applications or the development of elements and circuits for quantum-limited measurement processes. Now that the PTB, with its cooperation partners (NRC (Canada) and METAS (Switzerland)), has achieved a breakthrough also with the ac quantum Hall effect, the electric impedance measurement up to frequencies into the kHz range can also be traced back with fundamental accuracy to the von Klitzing constant.

The list of promising topics from the field of “Fundamentals of Metrology” could be continued almost endlessly – from the realization of the force scale in the range of very small and extremely great forces to frequency standards for future optical atomic clocks, enhanced standards for photometry and the dosimetry of ionizing radiation to the realization of the temperature scale at very deep and very high temperatures.

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.

In the area “Fundamentals of Metrology”, the share of research and development is very large, covering essential fields of modern natural and engineering sciences. The results not only provide the prerequisite for the development and realization of precise standards but also furnish – often in cooperation with university and non-university partners – important findings for the natural and engineering sciences in general.

## 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.

Sie hat immer darauf hingearbeitet, die ihr vom Staat oder anderen Drittmittelgebern zur Verfügung gestellten Ressourcen (Geld) in messtechnisches Know-how (Wissen) umzusetzen und in vielfältiger Form für die Wirtschaft bekannt zu machen. 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 annähernd 400 DKD-akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden durch die DKD-Akkreditierungsstelle kompetent überwacht und in nationalen und internationalen Gremien vertreten. Im vergangenen Jahr stellten die Kalibrierlaboratorien etwa 300 000 DKD-Kalibrierscheine aus, die den Nachweis der messtechnischen Rückführung auf nationale und internationale Normale gewährleisten. Ergänzend wurden etwa 2,3 Millionen Werkskalibrierscheine ausgestellt.

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

## Metrology for Economy

For an export-oriented national economy (as is the case with the Federal Republic of Germany), a highly developed metrological infrastructure and availability of metrological know-how on the highest level to support the development of new technologies is an indispensable prerequisite.

Since its foundation in 1887, for the benefit of German industry, the PTB has not only realized the base units through basic metrological research but also provided the bases for accurate and reliable measurements and tests in industry and trade by developing standards, standard measuring devices and well-proven measurement methods.

It has always aimed at translating the resources (money) placed at its disposal by the state or other parties into metrological know-how (knowledge) and at making this know-how available to economy. The application of measuring techniques meeting all international demands is a decisive prerequisite for reliable quality systems in economy. In this respect, it is indispensable to trace all measurement results back to the SI.

The dissemination of the units is – due to the accreditations of the German Calibration Service (DKD) – being shifted largely to the level of industrial metrology. The nearly 400 DKD-accredited calibration laboratories are competently monitored by the DKD accreditation body and represented in national and international bodies and committees. In the past year, the calibration laboratories issued approx. 300 000 DKD calibration certificates which ensure the evidence for the metrological traceability to national and international standards. In addition, approx. 2.3 million calibration certificates without accreditation logo were issued.

To interlock science and economy more closely is a political demand which is taken seriously by the PTB. For all research and development results obtained, the PTB checks whether these can also be used as trademark rights, patents/registered designs or through know-how-agreements for marketing innovations.

Know-how-Verträge für eine Vermarktung durch Innovationen in Anspruch genommen werden können.

Eine wichtige Rolle im Know-how-Transfer von der PTB in die deutsche Wirtschaft übernehmen Seminare und Fachtagungen, die wissenschaftlich-technische Entwicklungen wichtiger Arbeitsgebiete der PTB zum Thema haben. Speziell auf die Bedürfnisse von kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) ist das Mittelstandsforum der PTB ausgerichtet. Es stellt eine Internet-Plattform dar, welche die Dienstleistungsangebote der PTB einschließlich der Patentdatenbank in übersichtlicher Form aufzeigt und insbesondere auch Kunden, die mit der Struktur der PTB nicht vertraut sind, Navigationshilfen anbietet, die zu den richtigen Informationen und Ansprechpartnern führen.

An important role in the know-how transfer from the PTB to the German economy is taken on by seminars and symposia whose subject is the scientific-technical development in important fields of activity of the PTB. PTB's *Forum for Small and Medium-sized Businesses* ("Mittelstandsforum") is directed particularly to the needs of small and medium-sized businesses (SMEs). It presents an Internet platform which shows the range of services offered by the PTB, including the patent database, in a clear form, and which also offers navigational aid particularly to customers not familiar with the structure of the PTB, to enable them to find the correct information and contacts.

## 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 (Mission), „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)
- 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) erfolgt eine Novellierung des Eichgesetzes und der Eichordnung, deren Veröffentlichung für Januar 2007 erwartet wird. Die PTB hat die Vorarbeiten hierzu maßgeblich unterstützt und 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.

Der Erhalt bzw. die Wiederherstellung der Gesundheit der Bürger ist ein elementares Bedürfnis der Gesellschaft. Die PTB ist gemäß Medizinproduktegesetz zuständig für die

## Metrology for Society

In wide areas of everyday life, the public has a great interest in correct measurement results and reliable measuring facilities. „Metrology for Society“ thus encompasses predominantly tasks which are regulated by law. In a multitude of laws and regulations, PTB has been assigned various tasks; in most of these legal provisions the PTB is the only authority named. Herein lies a special responsibility. It is the task of the PTB (its mission) “to make available and use measuring techniques and procedures for the reasonable protection of the consumers in commercial and official transactions and of the active population in their job environment, for the conservation and restoration of health, for personal and industrial security as well as for the conservation of nature and the protection of the environment”. One focal point in this area is the type approval and type examination of measuring instruments within the context of national or European laws and regulations, for example in the fields of

- energy measuring technique for electrical energy, gas and water (heat, cold)
- security in road traffic (speed monitoring, breath alcohol control)
- electromagnetic compatibility (EMC)
- environmental measuring techniques (absolute measurements in pollutant and trace analysis, noise protection, etc.).

Most of the type approvals are executed by the PTB on the basis of the Verification Act. Due to the coming into force of the European Measuring Instruments Directive (MID), an amendment to the Verification Act and the Verification Ordinance is effected whose publication is expected in January 2007. The PTB has significantly assisted the preliminary work hereto and has meanwhile been recognised as notified body in accordance with European law so that customers from industry can be offered the conformity assessment procedures required by the MID.

The conservation and restoration of the citizens' health is an elementary need of society. Under the Medical Devices Act, the PTB is responsible for safeguarding the uniformity of measurement in medicine to which it makes an important contribution by providing a highly developed and reliable metrology

Sicherstellung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Medizin. Sie leistet hierzu durch die Bereitstellung eines hoch entwickelten und zuverlässigen Messwesens für die Medizin einen entscheidenden Beitrag. Dazu zählen zum einen die Entwicklung neuer oder die Verbesserung bereits existierender Messverfahren für Diagnostik und Therapiekontrolle. Zum anderen leistet die PTB entscheidende Beiträge durch Entwicklung von Normalen und Normalmessenrichtungen, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung oder für medizinische Geräte mit Messfunktion sowie durch Arbeiten zur Rückführung von analytischen Messungen in der klinischen Chemie auf die SI-Einheiten bzw. Normalmessverfahren.

In Absprache und Kooperation mit der *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung* (BAM) ist die PTB auf den wirtschaftlich und vor allem gesellschaftlich wichtigen Gebieten der physikalischen Sicherheitstechnik und des Explosionsschutzes elektrischer Betriebsmittel tätig. Auf Grund ihrer Kompetenz fällt ihr dabei eine internationale Referenzfunktion zu. Gleiches gilt für die Arbeiten auf dem Gebiet des Strahlenschutzes. Hier hat sich die PTB über die eichrechtlich gebotenen Tätigkeiten hinaus eine Kernkompetenz erworben, die national und international anerkannt und genutzt wird.

Die Arbeiten in dem Geschäftsbereich „Metrologie für die Gesellschaft“ sind vielfach geprägt durch Kooperation, Koordination und Kontakte mit anderen Instituten, Einrichtungen, Behörden und Ministerien. Darüber hinaus ist die PTB neutrale Schiedsstelle bei gerichtlichen Verfahren und anderen metrologischen Kontroversen mit oft erheblicher gesellschaftlicher Relevanz, beispielsweise bei Fragen der Strahlenbelastung von Personen bei Flügen, Castor-Transporten oder in der Umgebung von Kernkraftwerken.

system. These include the development of new or the improvement of already existing measuring methods for diagnostics and therapy control. On the other hand, the PTB makes vital contributions through the development of standards and standard measuring devices, for example for the dosimetry of ionising radiation or for medical equipment having measuring functions, as well as through studies on the traceability of analytical measurements – in clinical chemistry – to the SI units and standard measuring methods.

In agreement and in cooperation with the *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung* (BAM), the PTB pursues activities in the fields of physical safety engineering and explosion protection for electrical equipment, which are of economic and, above all, social importance. Due to its competence, it here fulfils an international reference function. The same applies to the work in the field of radiation protection. Here the PTB has acquired key competence which goes far beyond the activities under verification law and is recognized and used both on national and international level.

The work in the field of “Metrology for Society” is in various ways characterized by cooperation, coordination and contacts with other laboratories, institutes, authorities and ministries. Beyond this, the PTB is a neutral arbitral body in judicial proceedings and other metrological controversies of often considerable societal relevance, for example when it comes to questions of radiation exposure of passengers during flights or Castor transports or in the surroundings of nuclear power stations.

## Internationale Angelegenheiten

Durch die zunehmende Globalisierung von Wirtschaft und Handel wächst auch die internationale Bedeutung der Metrologie. Im Geschäftsbereich „Internationale Angelegenheiten“ ist es Aufgabe der PTB (Mission), „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 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. Ein internationales Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Bauartprüfungen (Mutual Acceptance Arrangement (MAA) ist 2003 von der OIML verabschiedet und 2006 durch die Unterzeichnung zweier „Declarations of Mutual Confidence“ (DoMC) für nichtselbsttätige Waagen und Wägezellen erstmals wirksam geworden. Die existierenden bilateralen Abkommen sind hiervon zum Vorteil der Wirtschaft noch nicht betroffen.

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 PTB arbeitet deshalb mit großem Engagement in EUROMET, der Organisation der nationalen

## International Affairs

As a consequence of the increasing globalization of trade and economy, the international importance of metrology is increasing as well. In the field “International Affairs”, it is the task of the PTB (its mission) “to contribute to the international uniformity of metrology and thus to removing non-tariff barriers to trade”. To carry out this task, it cooperates with other national metrology institutes, makes substantial contributions to the work of international bodies and cooperates both in the technical and in the economic field with developing and newly industrialized countries.

One essential element of the cooperation with partner institutes are international key comparisons for standards and standard measuring devices and derived research and development work. Within the scope of the international agreements concluded recently with a view to achieving mutual recognition of measurement results and certificates of the national metrology institutes and accredited test and calibration laboratories, these comparisons are of particular importance.

The global harmonization of requirements and testing regulations in legal metrology serves to remove non-tariff barriers to trade and thus also serves the export-oriented German measuring instrument industry. With these objectives, the PTB actively cooperates in the OIML and in the WELMEC. An international agreement for the mutual recognition of type tests (Mutual Acceptance Arrangement (MAA) was adopted by the OIML in 2003 and became effective for the first time in 2006 through the signing of two “Declarations of Mutual Confidence” (DoMC) for non-automatic weighing instruments and load cells. The existing bilateral agreements have not yet been affected by this – to the advantage of the economy.

The requirements to be met by metrology will in future continuously increase as regards their scope and complexity so that an individual institute cannot satisfy all demands in the long run. Therefore, the PTB cooperates with great commitment with EUROMET, the organisation of the National Metrology Institutes (NMI) in Europe, and has since the summer of 2006 also provided its president.

Metrologieinstitute (NMI) in Europa mit und stellt seit Sommer 2006 auch deren Vorsitzenden.

Kernziel von EUROMET ist derzeit, die vorhandene Zusammenarbeit bei F&E zu einer koordinierten metrologischen Gemeinschaftsaufgabe zu entwickeln. Im Rahmen eines von der EU geförderten ERANET-Projektes bereiten die NMI ein europäisches Metrologieforschungsprogramm vor, das zu einer koordinierten strategischen Zusammenarbeit der Metrologieinstitute führen soll. Die Finanzierung des Programms soll gemeinsam durch die teilnehmenden Mitgliedsländer der EU (hier handelt es sich nicht um neue Forschungsmittel, sondern um Einbringung eines Teils der Forschungsmittel der NMI) und durch die EU erfolgen (Artikel 169 Initiative). Bei Entwicklung und Aufbau der erforderlichen Strukturen (Schaffung einer rechtsfähigen Durchführungsorganisation) ist die PTB federführend tätig. Die neue, rechtsfähige europäische Metrologieorganisation EURAMET, die auch Nachfolger von EUROMET werden soll, wird am 11. Januar 2007 als eingetragener Verein (e.V.) nach deutschem Recht in Berlin gegründet werden. Damit werden in 2007 die erforderlichen Strukturen zur Durchführung eines europäischen Metrologieforschungsprogramms zur Verfügung stehen. Da voraussichtlich eine endgültige Entscheidung über eine europäische Förderung nach Artikel 169 erst in 2008 fallen wird, sind von der europäischen Kommission Überbrückungsmittel in Höhe von 21 Millionen Euro für die Forschungsförderung in Aussicht gestellt worden.

Neben ihrem europäischen Engagement arbeitet die PTB ebenfalls maßgeblich in allen internationalen Metrologieorganisationen mit, zu einem erheblichen Teil in leitender Funktion. Die PTB betrachtet dies als unverzichtbaren Beitrag zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft und Wahrung der Interessen und Bedürfnisse der Gesellschaft.

Die PTB leistet einen wesentlichen Beitrag zur internationalen Normung durch Mitarbeit in Gremien von ISO, IEC, CEN, CENELEC. Im Jahre 2006 war sie in mehr als 300 Vorhaben eingebunden. Die PTB sieht dies als wichtige

The target of EUROMET is currently to develop the existing cooperation in R&D to form a coordinated joint metrological task. Within the framework of an ERANET project promoted by the EU, the NMIs are preparing a European research programme in metrology which is to result in a coordinated strategic cooperation of the metrology institutes. The financing of the programme is to be effected jointly by the participating Member States of the EU (these are no new funds but rather funds made available and contributed to the programme by the NMIs from their own funds) and by the EU (Article 169 Initiative). For the development and set-up of the necessary structures (creation of an implementing organisation having legal capacity) the PTB is in charge of operations. The new European metrology organisation EURAMET – having legal capacity – which is also to succeed EUROMET, will be founded on 11 January 2007 in Berlin as registered association (e.V.) in accordance with German law. Thus the necessary structures for the implementation of a European research programme in metrology will be available in 2007. As it is anticipated that a final decision on European funding according to Article 169 will not be made until 2008, the European Commission has announced the payment of bridging funds amounting to 21 million euros for research funding.

In addition to its European involvement, the PTB works also actively in all international metrology organisations, to a considerable extent in a leading function. It considers this to be an indispensable contribution to assuring the competitiveness of the German economy and to safeguarding the interest and needs of society.

The PTB also makes a substantial contribution to international standardization by cooperating in the bodies of ISO, IEC, CEN and CENELEC. In 2006, PTB was involved in more than 300 projects. The PTB views this as an important task in the service of the society and economy.

Great importance is attached to technical cooperation with developing and newly industrialized countries. The PTB passes on its experience and lends active support in the

Aufgabe im Dienste der Gesellschaft und Wirtschaft an.

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.

Im Berichtsjahr wurden 21 Länder in vier Kontinenten durch 25 bilaterale Projekte beim Aufbau ihrer MNPQ-Infrastruktur unterstützt. Weitere Länder profitieren von insgesamt 15 regionalen und sektoralen Projekten. Der finanzielle deutsche Beitrag betrug ca. 4 Mio. Euro.

setting-up of the technical infrastructure for metrology as well as for standardization, testing and quality assurance, including accreditation and certification. The funds are provided chiefly by the *Federal Ministry for Economic Cooperation and Development* (BMZ) and other national and international donors such as the EU and the World Bank.

In the year under report, 21 countries in four continents have been supported in the establishment of their MSTQ structure by 25 bilateral projects. Additional countries profit from a total of 15 regional and sectoral projects. The financial contribution of Germany amounted to 4 million euros.

# Nachrichten

## Breitbandige Referenzhydrophone für Ultraschall

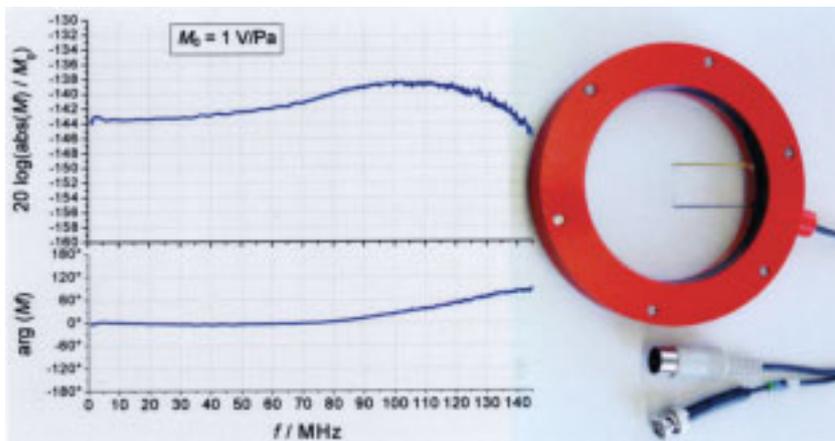
## Broadband reference hydrophones for ultrasound

Hydrophonmessungen sind fundamental, um die Schallabgabe von medizinischen Ultraschallgeräten zu bestimmen. Die korrekte Messung von breitbandigen Impulsen, wie sie von diagnostischen Schallköpfen emittiert werden, erfordert Hydrophone mit einer flachen Übertragungsfunktion innerhalb eines sehr großen Frequenzbereichs. Mehrere Kalibrierlaboratorien arbeiten daher zurzeit daran, die Frequenzbereiche der Hydrophonkalibrierung zu erweitern.

Hydrophone measurements are fundamental for the determination of the acoustic output of medical ultrasound equipment. The correct measurement of broadband pulses as emitted by diagnostic ultrasound heads requires hydrophones with a flat transfer function within a very large frequency range. Several calibration laboratories are therefore presently working on the expansion of the frequency ranges of hydrophone calibration.

Um die verschiedenen weiter- und neuentwickelten Kalibrierverfahren der PTB untereinander und international mit Verfahren anderer Metrologieinstitute vergleichen zu können, wurden in der Arbeitsgruppe „Ultraschall“ spezielle breitbandige Referenz-Membranhydrophone mit deutlich größerem nutzbaren Frequenzbereich als bei zurzeit kommerziell erhältlichen Hydrophonen und mit geringem Empfängerdurchmesser konstruiert und hergestellt. So ist der Frequenzgang bis 40 MHz extrem glatt und es deutet sich eine nutzbare Bandbreite bis über 140 MHz an, wobei die primäre Rückführung von Kalibrierdaten bereits bis zu etwa 70 MHz gelungen ist. Damit steht ein entscheidendes Hilfsmittel zur Erweiterung und Verifikation der Kalibrierverfahren im Ultraschallbereich bereit.

In order to be able to compare the different calibration procedures that have been developed further or newly by PTB with each other and, on an international scale, with procedures developed by other metrology institutes, the Working Group “Ultrasound” has designed and produced special broadband reference membrane hydrophones with a usable frequency range which is much larger than that of the hydrophones currently commercially available and with a small sensor diameter. Thus, the frequency response up to 40 MHz is extremely smooth and it seems that a usable bandwidth of more than 140 MHz can be achieved, whereby calibration data up to approx. 70 MHz have already been successfully traced back to the primary standard. Thus, an important auxiliary means is now available for the extension and verification of the calibration procedures in ultrasonic metrology.



PTB-Breitband-Membranhydrophon und zugehöriger komplexwertiger Frequenzgang.

PTB broadband membrane hydrophone and its complex-valued frequency response.

## DAGA tage in Braunschweig

Nach über 20 Jahren war in diesem Jahr der größte nationale Kongress der Akustiker, die DAGA, wieder in Braunschweig zu Gast. Die 32. Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA'06), eine Gemeinschaftsveranstaltung von TU Braunschweig und PTB (Fachbereich *Angewandte Akustik*), stieß mit etwa 900 Teilnehmern, 360 Fachvorträgen aus allen Gebieten der Akustik sowie mit 32 Ausstellern auf erfreulich große Resonanz. Neben den eigentlichen Fachbeiträgen gab es Vorkolloquien zu den Themen Bauakustik und Ultraschall sowie eine große Eröffnungsveranstaltung mit der Verleihung der wichtigsten Preise aus dem Bereich Akustik. Glanzpunkte waren die eingeladenen Plenarvorträge als Spiegelbild für die akustischen Aktivitäten in der Braunschweiger Region zu den Themen „Numerik: Brauchen wir demnächst keine Messungen mehr?“ (O. v. Estorff), „Strömungslärm bei Verkehrsflugzeugen“ (R. Ewert), „Der lange Weg der Mikrofone vom analogen Wackelkontakt zum digitalen ja/nein“ (W. Niehoff), „Die Musik spielt im Gehirn: Erkenntnisse zum neurobiologischen Ursprung der Musikwahrnehmung“ (E. Altenmüller). Schnell ausgebucht waren auch die Exkursionen zu Firmen in der Umgebung: Sennheiser Elektronik, VW Akustik-Forschung sowie die Klavierbauer Schimmel und Steinweg-Grotian. Das Fachprogramm wurde durch ein Abendkonzert im Dom mit Fachvortrag zur Kirchenakustik (J. Meyer) und einen geselligen Abend unter Mitgestaltung von Musikern aus der PTB abgerundet.

Professor Dr.-Ing. Werner Scholl, Leiter des Fachbereichs „Angewandte Akustik“, bei der Eröffnung der DAGA '06

Professor Dr.-Ing. Werner Scholl, Head of the “Applied Acoustics” Department, on the occasion of the DAGA '06 opening event.

## DAGA met in Braunschweig

After more than 20 years, the largest national congress of acousticians, the DAGA, met again in Braunschweig this year. With about 900 participants, 360 technical lectures from all fields of acoustics as well as 32 exhibitors, the 32nd German Annual Meeting for Acoustics (DAGA'06) – a joint event of the Braunschweig Technical University and PTB (Department “Applied Acoustics”) – met with gratifyingly great response. In addition to the technical contributions, preliminary colloquia were held on the subjects “Building Acoustics” and “Ultrasound”, and a big opening session was celebrated as well, which included the awarding of the most important prizes from the field of acoustics. Highlights were the invited plenary lectures on the subjects “Numerics: Will measurements soon become unnecessary?” (O. v. Estorff), “Current noise of commercial aircrafts” (R. Ewert), “The long route of microphones from the analog loose contact to the digital yes/no” (W. Niehoff), “The music plays in the brain: Cognitives regarding the neurobiological origin of musical perception” (E. Altenmüller) which reflected the activities in the field of acoustics in the Braunschweig region. The visits to the companies in the surrounding area – Sennheiser Elektronik, VW Akustik-

Forschung, as well as to the piano designers Schimmel and Steinweg-Grotian – were also rapidly booked up. The technical program was rounded off by an evening concert in the Braunschweig cathedral which included a technical lecture on acoustics in churches (J. Meyer) and a convivial evening accompanied by PTB musicians.



## Erste programmierbare 10-V-Josephson-Reihenschaltung

Bei der Herstellung von Josephson-Reihenschaltungen hat die PTB einen Durchbruch erzielt. Erstmals ist es gelungen, programmierbare Josephson-Arrays mit einer Ausgangsspannung von 10 V zur hochgenauen Reproduzierung von Gleich- und Wechselspannungen zu fertigen.

In den letzten Jahren wurden kontinuierlich das Design und der Herstellungsprozess für programmierbare Spannungsnormale weiterentwickelt. Die nun hergestellten Serienschaltungen mit 70 000 Josephson-Kontakten in SINIS-Technologie zeigen bei Mikrowellenfrequenzen um 70 GHz über einen weiten Strombereich (mehr als 600  $\mu\text{A}$ ) Stufen konstanter Spannung bei 10 V, die exakt quantisiert sind. In einem weltweit erstmalig durchgeführten direkten Vergleich zwischen einer programmierbaren 10-V-Schaltung mit einem konventionellen 10-V-Josephson-Spannungsnormale konnte die einwandfreie Funktionalität der Schaltungen demonstriert werden.

Die große Stufenbreite der binär geteilten 10-V-Schaltung macht sie für den Einsatz als Josephson Arbitrary Waveform Synthesiser (JAWS) besonders geeignet. Damit ist die Tür für eine ganze Reihe neuer Anwendungsmöglichkeiten in der Wechselstrommesstechnik aufgestoßen, bei denen die programmierbaren 10-V-Schaltungen eine substantielle Reduzierung der Messunsicherheit versprechen. Erste Anwendungen, an denen gegenwärtig gearbeitet wird, sind ein Quantenvoltmeter für Wechselspannung und das primäre Normal der PTB für die elektrische Wechselleistung.

Programmierbare 10-V-Schaltung mit 69 632 Josephson-Kontakten in SINIS-Technologie

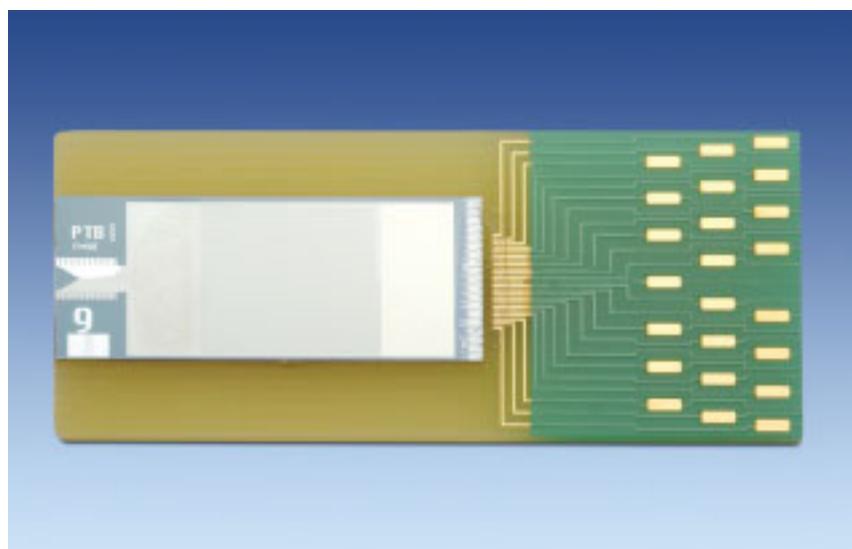
Programmable 10-V array with 69,632 Josephson contacts in SINIS technology

## First programmable 10-V Josephson series array

PTB has achieved a breakthrough in the manufacturing of Josephson series arrays. For the first time it was possible to manufacture programmable Josephson series arrays with an output voltage of 10 V for the high-precision reproduction of DC and AC voltages.

In the past years, the design and production methods for programmable voltage standards have constantly been developed further. The series arrays with 70,000 Josephson contacts in SINIS technology that have now been produced generate, at microwave frequencies of approx. 70 MHz over a large current range (more than 600  $\mu\text{A}$ ), steps of constant voltage at 10 V that are exactly quantised. In a worldwide, first-time direct comparison between a programmable 10-V array with a conventional 10-V Josephson voltage standard, it could be demonstrated that the arrays work perfectly.

The large step width of the binarily divided 10-V arrays makes them especially suited to be used as Josephson Arbitrary Waveform Synthesiser (JAWS). This opens the door to a whole series of new applications in AC techniques in which programmable 10-V arrays promise to significantly reduce the measurement uncertainty. First applications that are being carried out at the moment are a quantum voltmeter for AC voltage and PTB's primary standard for electric power.



## IEC-Norm über die Zündquelle „optische Strahlung“ veröffentlicht

Die neue internationale Norm IEC 60079-28 „Protection of equipment and transmission systems using optical radiation“ ist im August 2006 veröffentlicht worden. Sie enthält Explosionsschutzanforderungen an Geräte und Einrichtungen zum Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen, die optische Strahlung benutzen. Die Anforderungen erfassen im wesentlichen die Zündquelle „optische Strahlung“. Beispiele für solche Geräte sind Analyse-, Mess- oder Überwachungsgeräte für Füllstandmessungen in Tanks für brennbare Flüssigkeiten oder zur Bestimmung der Zusammensetzung von Gasgemischen sowie Lichtschranken, Laserscanner, Tankinspektionsgeräte, Endoskope und Datenübertragungsgeräte mittels Lichtwellenleiter.

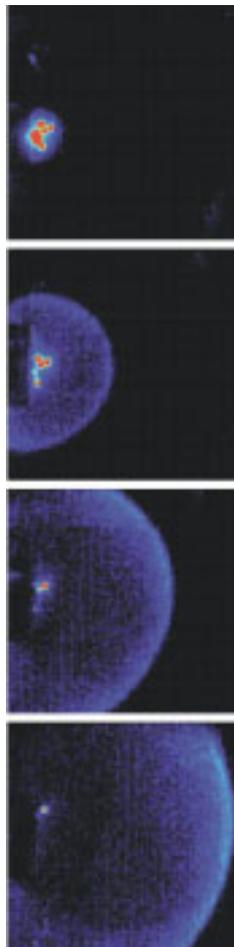
Die Norm beruht ganz wesentlich auf Grundlagenforschungsarbeiten und Normungsaktivitäten, die in den Explosionsschutzfachbereichen der PTB durchgeführt wurden. Die Norm enthält zunächst eine Bewertung der tatsächlich vorliegenden Zündgefahr durch optische Strahlung und gibt im Weiteren unterschiedliche Schutzmaßnahmen an: Schutz durch Eigensicherheit der optischen Strahlung, Schutz durch eine Umschließung der optische Strahlung (Strahlung, die in einer optischen Faser oder einem anderen Übertragungsmedium eingeschlossen ist oder aber durch druckfeste oder überdruckgekapselte Gehäuse geschützt ist) oder Schutz durch eine Abschaltung bei freierwerdender Strahlung („interlock cut-off“). Die Maßnahmen werden nach vorliegender Explosionsschutzzone und Art der explosionsfähigen Atmosphäre ausgewählt und können auch kombiniert werden.

Hochgeschwindigkeitsaufnahme der Entzündung einer explosionsfähigen Atmosphäre durch einen optischen Strahlungspuls, der auf einem Absorber zündfähige Teilchen erzeugt.

## Publication of an IEC standard on the ignition source “optical radiation“

The new international standard IEC 60079-28 “Protection of equipment and transmission systems using optical radiation“ was published in August 2006. It contains explosion protection requirements for equipment and facilities for use in potentially explosive areas which use optical radiation. The requirements are basically valid for the ignition source “optical radiation“. Examples of such devices are analysing, measuring or monitoring devices for level measurements in tanks for flammable liquids, or devices for the determination of the composition of gas mixtures, as well as light barriers, laser scanners, tank inspection equipment, endoscopes and data transmission equipment based on optical waveguides.

Essentially, the standard is based on basic research activities and standardisation work carried out in the explosion protection departments of PTB. The standard starts with an evaluation of the ignition hazard actually prevailing due to optical radiation. In the following, it lists different protection measures: protection through intrinsic safety of the optical radiation, protection through an encapsulation of the optical radiation (radiation enclosed in an optical fibre or in another transmission medium or radiation which is protected by a flameproof or pressurised enclosure) or protection through cut-off whenever radiation is released (“interlock cut-off“). The measures are selected according to the existing explosion protection zone and the type of explosive atmosphere, and may also be combined.



High-velocity recording of the ignition of an explosive atmosphere by an optical radiation pulse which generates ignition-capable particles on an absorber.

### Höchstgenaue Frequenz- und Wellenlängenübertragung über Telekommunikationsfasern

Die Genauigkeit und Kurzzeitstabilität optischer Atomuhren ist gegenwärtig schon so hoch, dass räumlich weit auseinander stehende optische Uhren mit den besten Satellitenvergleichsmethoden nicht mehr mit kleinstmöglicher Unsicherheit verglichen werden können. Die PTB untersucht daher, mit welcher Genauigkeit dieser Vergleich zukünftig über Lichtfasern möglich ist. Der Vergleich optischer Atomuhren, die sich in verschiedenen Gebäuden auf dem PTB-Gelände befinden, wird bereits über spezielle Lichtleitfasern ohne Einbuße an Genauigkeit und mit höchster Kurzzeitstabilität routinemäßig durchgeführt. Zusätzlich wurde jetzt in der PTB ein Verfahren entwickelt, mit dem eine beliebige optische Frequenz im infraroten Spektralbereich ebenfalls ohne Genauigkeitsverlust mit Hilfe eines optischen Frequenzkammgenerators an die Frequenz einer optischen Atomuhr angeschlossen wird.

Gegenwärtig wird erforscht, wie diese Strahlung in das bestehende Telekommunikationsnetz eingespeist, an einem beliebigen Ort ausgekoppelt und wieder auf eine zu messende Frequenz umgesetzt werden kann. Die PTB betreibt dazu jetzt einen Testring, der aus Faserstrecken um Braunschweig mit einer Gesamtlänge von etwa 50 km geschaltet wurde, und hat die prinzipielle Eignung des Konzepts demonstriert. Von diesem Netz, kann auch ein Anschluss an das deutsche Forschungsdatennetz geschaltet werden. Langfristig wird damit sowohl der direkte Vergleich entfernter optischer Uhren als auch die breite Verteilung genauester Frequenzen und Wellenlängen an beliebige Nutzer in Forschung und Industrie möglich.

50 km langer Testring (um Braunschweig) aus Telekommunikationsfaserstrecken

50 km long test ring (around Braunschweig) composed of telecommunication fibre sections

### High-precision frequency and wavelength transmission via telecommunication fibres

At present, the accuracy and short-term stability of optical atomic clocks is already so high that even the best satellite comparison methods available today no longer allow optical atomic clocks situated at great distances to be compared with the best measurement capability. PTB therefore investigates with which accuracy this comparison will in future be possible using optical fibres. The comparison of optical atomic clocks located in different buildings on the premises of PTB is already being performed routinely via special light-conducting fibres without loss of accuracy and with highest short-term stability. In addition, a method has now been developed at PTB by which any optical frequency in the infrared spectral range can also be linked up with the frequency of an optical atomic clock – without accuracy loss – with the aid of an optical frequency comb.

It is being investigated at present in which way this radiation can be fed into the existing telecommunication network, coupled out at any place desired and converted again into a frequency to be measured. For this purpose, PTB is now operating a test ring – switched from fibre sections with a total length of approx. 50 km – around Braunschweig and has demonstrated the basic suitability of the concept. From this network, a connection can also be established to the German Research Data Network. In the long term, both the direct comparison of optical clocks situated at

large distances and the broad distribution of the most precise frequencies and wavelengths to any user in research and industry will be possible.



## EFTF: Europäisches Frequenz- und Zeitforum

Einmal mehr war Braunschweig Dreh- und Angelpunkt beim Thema Zeit: Vom 27. bis 29. März trafen sich in der Stadthalle Braunschweig mehr als 270 Wissenschaftler und Ingenieure aus über 30 Nationen zum 20. Europäischen Frequenz- und Zeit-Forum (EFTF), um ihre neuesten Forschungsergebnisse auszutauschen. Die Veranstaltung wurde von der PTB unter Federführung der Abteilung *Optik* organisiert.

Das Tagungsprogramm spannte den Bogen von neuesten Systemen und Bauteilen bis hin zu Atomuhren und der Weiterentwicklung von Zeitskalen und Zeitvergleichen. Mit der Satellitenzeitverteilung und mit optischen Frequenznormalen standen dabei zwei aktuelle Forschungsschwerpunkte auf der Tagungsagenda. Im Rahmen von Galileo, dem zukünftigen europäischen Satellitennavigationssystem, werden beispielsweise neue Methoden der Zeitverteilung entwickelt, an deren Konzeption und Ausbau die PTB an prominenter Stelle beteiligt ist.

Ebenfalls auf dem Konferenzprogramm standen eine Industrieausstellung, auf der Hersteller aus aller Welt dem Fachpublikum ihre aktuellen Entwicklungen vorstellten, verschiedene Workshops zu speziellen Themen und natürlich eine Besichtigung der Zeit- und Frequenzlaboratorien der PTB.

## EFTF: European Frequency and Time Forum

Once again Braunschweig was the centre of the subject of “time”: Between March 27 and 29, more than 270 scientists and engineers from more than 30 nations met at the Braunschweig Civic Hall to celebrate the 20th European Frequency and Time Forum (EFTF) and to exchange their latest research results. The event was organised by PTB under the auspices of the “Optics Division”.

The program of the meeting spanned the entire range from the latest systems and components to atomic clocks and the further development of time scales and time comparisons. Satellite time distribution and the optical frequency standard were two of the research priorities on the agenda. Within the scope of Galileo – the future European satellite navigation system – new time distribution methods are, for example, being developed and PTB plays a prominent role in their elaboration and development.

The conference program also comprised an industrial exhibition (at which manufacturers from all over the world presented their latest developments to the technical audience), various workshops on special subjects and, of course, a visit to PTB’s time and frequency laboratory.



Prof. Dr. Ernst O. Göbel (Mitte), Präsident der PTB und Vorsitzender des Helmholtz-Fonds, mit den Empfängern der beiden vom Helmholtz-Fonds gesponserten Forschungspreise: Dr. Pierre Lemonde (links), „EFTF Young Scientist Award“, und Prof. Dr. Raymond Besson, „European Frequency and Time Award“

Prof. Dr. Ernst O. Göbel (centre), President of PTB and Chairman of the Helmholtz Foundation, with the recipients of the two research awards sponsored by the Helmholtz Foundation: Dr. Pierre Lemonde (left-hand side), “EFTF Young Scientist Award“, and Prof. Dr. Raymond Besson, “European Frequency and Time Award“

## Mikrotaster für komplexe Mikro- und Nanostrukturen

Mit einem neuartigen mikromechanischen Sensor können jetzt Maß, Form, Lage und sogar Rauheit auch auf senkrechten Wänden von kleinsten Strukturen messtechnisch erfasst werden. Herzstück der zum Patent angemeldeten Sensoren sind Mikrobiegebalken (Cantilever), wie sie aus der Rasterkraftmikroskopie bekannt sind. Neu an diesen Sensoren ist, dass am Cantilever ein senkrechter Tasterschaft angebracht ist, an dessen Ende erst die Tasterspitze befestigt ist. Die bei Berührung eines Messobjektes entstehenden Bewegungen des Biegebalkens bzw. die Veränderungen der Tasterschwingung im dynamischen Betrieb werden optisch über die Lichtzeigermethode mit Hilfe einer Quadrantenphotodiode erfasst.

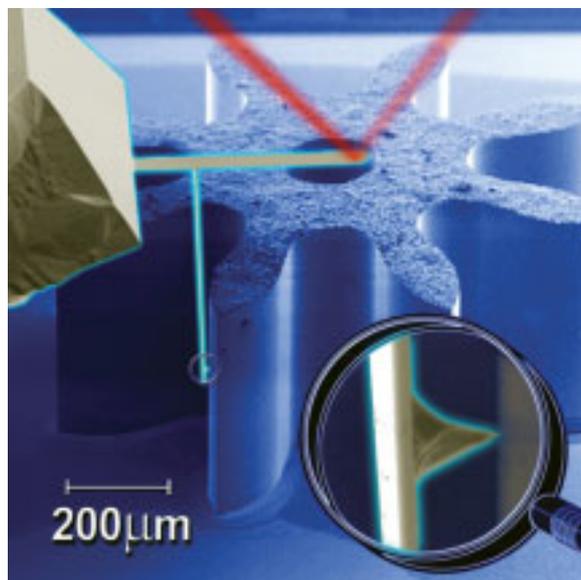
Die laterale Auflösung der neuen Sensoren, die als ACPs (assembled cantilever probes) bezeichnet werden, ist wegen des sehr kleinen Radius der Tasterspitzen von etwa 20 nm sehr hoch. Geringe Auflagekräfte von  $< 0,01 \mu\text{N}$  verhindern zudem ein Zerkratzen empfindlicher Oberflächen. Ein weiterer Vorteil dieser Sensoren liegt darin, dass sie aus kommerziell erhältlichen, massengefertigten Mikrokomponenten zusammengesetzt und an die jeweilige Messaufgabe angepasst werden können. Bei Anwendungen an Mikrozahnradern sowie an Kantenlinien von Leiterbahnen konnten bereits Standardabweichungen von etwa 1 nm erreicht werden. Durch einen sternförmigen Taster an Stelle der bisher eingesetzten einfachen Tasterspitze können die ACP-Sensoren zukünftig auch in 3D-Messsystemen eingesetzt werden.

Ein Mikrotaster, dessen Bewegung optisch ausgelesen wird, misst die vertikale Flanke eines Mikrozahnrades.

## Microsensors for complex micro- and nanostructures

A novel micro-mechanical sensor now allows the position, form, measure – and even the roughness – to be metrologically determined also on vertical walls of smallest structures. Core piece of the sensors – for which a patent has been applied for – are cantilevers as they are also known from scanning force microscopy. A novelty of these sensors is that a vertical probe shaft is attached to the cantilever, with the probe tip at its end. The movements of the cantilever, which occur when the measurement object is touched, or (in dynamic operation) the changes in the probe oscillation are determined by the optical beam deflection method with the aid of a quadrant photodiode.

Due to the very small radius of the probe tips of approx. 20 nm, the lateral resolution of the new sensors – which are referred to as “ACPs” (Assembled Cantilever Probes) – is very high. Moreover, small contact forces of  $< 0.01 \mu\text{N}$  prevent a scratching of delicate surfaces. Another advantage of these sensors is that they are composed of commercially available mass-produced microcomponents and can be adapted to the respective measurement task. For applications to microgears and to line edges of printed circuit boards, standard deviations of approx. 1 nm have already been achieved. A star-shaped probe instead of the simple probe tip used so far will allow the ACP sensors to be used in future also in 3D measuring systems.



A microprobe whose movement is optically read measures the vertical flank of a microgear.

## Neue Kalibrieranlage für die Brachytherapie

Die vorhandenen Möglichkeiten der PTB zur Kalibrierung von Strahlungsquellen für die Brachytherapie konnten mit einer neuen Kalibrieranlage, die jetzt in Betrieb genommen wurde, wesentlich verbessert werden. Bei der Brachytherapie wird eine radioaktive Strahlungsquelle über Körperöffnungen oder durch Hohlnadeln möglichst nahe am Tumor bzw. direkt im Tumorgewebe platziert. Typischerweise werden hier Iridium-192-Quellen von ca. 5 mm Länge und 1 mm Durchmesser verwendet, die in einem Katheter in die Bestrahlungsposition gebracht werden.

Die neue Anlage kalibriert die Brachytherapiequellen in einem kollimierten Strahlungsfeld. Hierzu wurde in einem speziell eingerichteten Strahlenschutzbereich eine Bleikammer aufgebaut, in deren Zentrum die zu kalibrierende Brachytherapiequelle platziert wird. Das Sekundärnormal wird mit einem handelsüblichen Industrieroboter auf der zentralen Achse des durch eine Blende definierten Strahlungsfeldes mit einer Unsicherheit von weniger als 0,1 mm positioniert. Durch die Kollimierung wird der unerwünschte Streuanteil aus der Luft – und damit die notwendige Korrektur – erheblich (auf unter 1 %) reduziert. Unsicherheiten in der Positionierung der Strahlungsquelle (ca. 0,3 mm) werden durch mehrere Messungen in unterschiedlichen Abständen zwischen Strahlungsquelle und Sekundärnormal weitgehend eliminiert. Diese deutlich geringeren Unsicherheiten kommen direkt den Herstellern der Strahlungsquellen zugute und damit letztendlich dem Patienten.

Messanordnung zur Kalibrierung von  $^{192}\text{Ir}$ -Brachytherapiequellen in kollimierter Strahlungsgeometrie.

Measuring set-up for the calibration of  $^{192}\text{Ir}$  brachytherapy sources in collimated radiation geometry.

## New calibration facility for brachytherapy

The possibilities available at PTB for the calibration of radiation sources for brachytherapy could be essentially improved with a new calibration facility which has now been put into operation. In brachytherapy, a radioactive radiation source is placed as close as possible to the tumour or directly in the tumour tissue via body openings or through hollow needles. Typically, iridium-192 sources approx. 5 mm in length and 1 mm in diameter are used which are brought into irradiation position in a catheter.

The new facility calibrates the brachytherapy sources in a collimated radiation field. For this purpose, in an especially established radiation protection area, a lead box is installed, in the centre of which the brachytherapy source to be calibrated is placed. With a commercial industrial robot, the secondary standard is positioned on the central axis of the radiation field defined by a diaphragm with an uncertainty of less than 0.1 mm. Due to the collimation, the undesired scattered radiation component from the air – and thus the necessary correction – is considerably reduced (to below 1%). Uncertainties in the positioning of the radiation source (approx. 0.3 mm) are largely eliminated through several measurements at different distances between radiation source and secondary standard. These clearly reduced uncertainties directly benefit the manufacturers of the radiation sources and thus ultimately the patient.



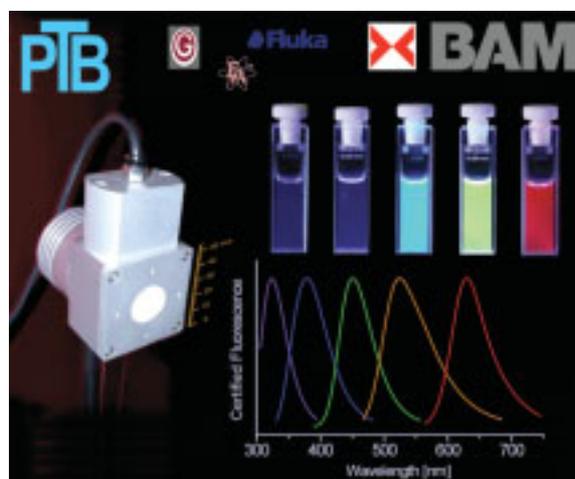
## Fluoreszenz weltweit vergleichbar

In einer Kooperation zwischen PTB, BAM sowie zwei Industriepartnern wurden spektrale Fluoreszenzstandards entwickelt, charakterisiert und zertifiziert, mit denen sich gerätespezifische Einflüsse auf das Fluoreszenzsignal eliminieren lassen. So werden Fluoreszenzmessungen weltweit vergleichbar.

Die Rückführungskette besteht aus drei wesentlichen Elementen: erstens aus einem kompakten, homogen leuchtenden Ulbrichtkugelstrahler. Das zweite Element ist ein Referenzfluorometer mit minimalen optischen Abbildungsfehlern, das die Zertifizierung von Fluoreszenzspektren mit ausreichend kleinen radiometrischen Messunsicherheiten ermöglicht. Als dritter Teil der Rückführungskette dient der Kalibriersatz „Spektrale Fluoreszenzstandards BAM-F001 – BAM-F005“, dessen korrigierte Emissionsspektren im Januar 2006 von der BAM zertifiziert wurden.

Die Fluoreszenz ist eine breit eingesetzte Analyseverfahren, deren Anwendungen vom Umweltschutz (z. B. Schadstoffbestimmung) über die klinisch-chemische Analytik (z. B. Protein- und DNA-Analytik) bis zum empfindlichen Nachweis für chromatographische Trennverfahren (z. B. Hochleistungs-Dünnschichtchromatographie) reichen. Fluoreszenz wird also mit einer Vielzahl von völlig unterschiedlichen Systemen gemessen. Um die Ergebnisse trotzdem miteinander vergleichen zu können, muss man gerätespezifische Einflüsse auf das Fluoreszenzsignal ermitteln und korrigieren. Genau dies wurde in einer vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Kooperation zwischen der PTB, der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) sowie den Firmen Gigahertz-Optik GmbH und Sigma-Aldrich GmbH mit Hilfe einer radiometrischen Rückführungskette erreicht.

Miniatur-Ulbrichtkugelstrahler (links) und Fluoreszenzstandards mit den korrigierten Fluoreszenzspektren (rechts)



## Fluorescence globally comparable

Within a cooperation between PTB, BAM and two partners from industry, spectral fluorescence standards have been developed, characterised and certified which allow instrument-specific influences on the fluorescence signal to be eliminated. Thus, fluorescence measurements can now be compared worldwide.

The traceability chain comprises three essential elements: first, a compact, homogeneously radiating integrating sphere source. The second element is a reference fluorometer with minimal optical imaging errors which allows the certification of fluorescence spectra with sufficiently small radiometric measurement uncertainties. The third element of the traceability chain is the calibration set "Spectral fluorescence standards BAM-F001 – BAM-F005" whose corrected emission spectra were certified by the BAM in January 2006.

Fluorescence is a widely used analysis method whose applications range from environmental protection (e.g. pollutant determination) and clinical-chemical analysis (e.g. protein and DNA analysis) to the sensitive detection of chromatographic partition processes (e.g. high-performance thin-film chromatography). Fluorescence is thus measured by means of numerous and various instrumental systems. In order to enable a mutual comparison of the results, it is necessary to detect and correct instrument-specific influences on the fluorescence signal. A cooperation programme between PTB, the Federal Institute of Materials Research and Testing (BAM) and the companies Gigahertz-Optik GmbH and Sigma-Aldrich GmbH, sponsored

by the Federal Ministry of Economics and Technology, has achieved exactly these goals by means of a radiometric traceability chain.

Miniature integrating sphere radiator (left-hand side) and fluorescence standards with the corrected fluorescence spectra (right-hand side)

## Emil Warburg – Vision und Präzision

Die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), ihr Berliner Regionalverband (PGzB), die Emil-Warburg-Stiftung und die PTB haben am 6. Oktober 2006 den herausragenden Forscher und Lehrer und den äußerst erfolgreichen – heute würde man sagen – Forschungsmanager Emil Warburg mit einem gemeinsamen Festkolloquium geehrt. Anlass war das 160. Geburts- und das 75. Todesjahr. Emil Warburg bekleidete den Vorsitz der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin seit 1895 und erweiterte diese 1899 zur Deutschen Physikalischen Gesellschaft und wurde somit deren Gründungspräsident. Ab 1905 übernahm er im Alter von 59 Jahren das Amt des Präsidenten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) und steuerte diese bis 1922 durch schwierige Zeiten.

Nach ausführlichen Grußworten der Staatssekretäre Peter Hintze vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und Dr. Hans-Gerhardt Husung von der Berliner Senatsverwaltung für Wissenschaft, Forschung und Kultur zeichneten Prof. Dr. Dieter Kind, der ehemalige Präsident der PTB, das Bild des Präsidenten Warburg und sein Enkel Dr. Peter Meyer-Viol das Bild des Menschen und Großvaters Warburg. Dr. Sebastian Gönnerwein vom Walther-Meissner-Institut der Bayerischen Akademie der Wissenschaften folgte den Spuren des Forschers Emil Warburg und Prof. Dr. Eberhard Umbach, Präsident der DPG, würdigte Emil Warburg als einen seiner die DPG bis heute spürbar prägenden Vorgänger.



Prof. Dr. Ernst O. Göbel, Präsident der PTB, erhält von Dr. Peter Meyer-Viol, einem Enkel Emil Warburgs, ein Relief des jungen Warburg zum Geschenk

Prof. Dr. Ernst O. Göbel, PTB's president, receives from Dr. Peter Meyer-Viol, one of the grandsons of Emil Warburg, a relief of the young Warburg as a gift

## Emil Warburg – Vision and Precision

On the 6th of October 2006, the Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG, German Physical Society), its Regional Berlin Association (PGzB), the Emil Warburg Foundation and PTB honoured the outstanding researcher and teacher and the extremely successful – today one would say: “research manager” – Emil Warburg with a joint ceremonial colloquium. The event was celebrated in honour of his 160th birthday and the 75th year of his death. Since 1895, Emil Warburg had presided over the Physikalische Gesellschaft zu Berlin (Physical Society of Berlin) which he then expanded in 1899 into the Deutsche Physikalische Gesellschaft of which he was a founding member. From 1905 (at the age of 59), he assumed the office of the President of the Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR) which he navigated through difficult times until 1922.

After extensive words of welcome by the State Secretaries Peter Hintze from the Federal Ministry of Economics and Technology and Dr. Hans-Gerhardt Husung from the Berlin Senate Administration for Science, Research and Culture, Prof. Dr. Dieter Kind, Ex-President of PTB, described Emil Warburg in his function as President, and his grandson, Dr. Peter Meyer-Viol, described him as a private individual and grandfather. Dr. Sebastian Gönnerwein from the Walther-Meissner-Institute of the Bavarian Academy of Sciences followed the footsteps of the researcher Emil Warburg, and Prof. Dr. Eberhard Umbach, president of the DPG, honoured Emil Warburg as one of his predecessors whose influence is noticeable at the DPG until today.

## TEMPERATUR 2006

Die Tagungsreihe TEMPERATUR hat sich im deutschsprachigen Raum als die nationale Tagung zu Verfahren und Geräten der Temperatur- und Gasfeuchtemessung etabliert. Nach 1998 und 2003 fand die Tagung am 16. und 17. Mai 2006 zum dritten Mal in Folge organisiert durch die PTB im Hermann-von-Helmholtz-Bau des Instituts Berlin statt. Die große Zahl von 160 Teilnehmern aus fünf Ländern zeigt die Aktualität und die Attraktivität der Fragestellungen und das anhaltend große Interesse aus Industrie und Forschung an den Messmethoden der Temperatur und der Feuchte. Unterstrichen wurde dies durch den hohen Anteil von Teilnehmern aus der Industrie (über 50 %), insbesondere von kleinen und mittelständischen Unternehmen, aber auch aus dem Bereich von DKD-Kalibrierlaboratorien, bei denen diese Tagung große Bedeutung für die fachliche Fortbildung hat.

In 27 Vorträgen und 7 Posterbeiträgen wurden sowohl neue wissenschaftliche Ergebnisse als auch moderne Verfahren und Geräte in der Temperatur- und Gasfeuchtemesstechnik sowie der Bestimmung thermophysikalischer Stoffeigenschaften vorgestellt. Methoden der berührungslosen Temperatur- und Emissionsgradmessung bildeten einen Schwerpunkt der Veranstaltung. Anwendungsorientierte Neuentwicklungen von verbesserten Temperatur-Fixpunkten sowohl auf der Grundlage von Reinstmetallen als auch von Metall-Kohlenstoff-Eutektika wurden intensiv diskutiert.

## TEMPERATURE 2006

In the German-speaking countries, the series of "TEMPERATURE" meetings has established itself as the national conference on procedures and devices for temperature and gas humidity measurements. For the third time in succession (after 1998 and 2003), PTB was the organiser of this meeting, which took place on May 16 and 17, 2006, at the Hermann-von-Helmholtz Building of the Berlin Institute. The great number of participants (160) from five countries reflected the topicality and attractiveness of the questions and the persistently great interest of industry and research in the methods of temperature and humidity measurement. This was accentuated by the great number of participants from industry (above 50 %), in particular from small and medium-sized enterprises, but also from the field of DKD calibration laboratories, for which this meeting is of great importance as regards their technical advanced training.

In 27 lectures and 7 poster contributions, not only new scientific results, but also modern procedures and devices in temperature and gas humidity technology as well as in the determination of thermo-physical material properties were presented. One of the focal points of the event was composed of methods of non-contact temperature and emissivity measurements. User-oriented new developments of improved temperature fixed points on the basis of ultrahigh-purity metals and of metal-carbon eutectic alloys were discussed intensively.

Prof. Frank Bernhard von der TU Ilmenau eröffnet die erste Sitzung

Prof. Frank Bernhard from Ilmenau Technical University opens the first meeting



## Nach 10 Jahren 3-Tesla-MRT: die 7-Tesla-Ära kommt

Die Magnetresonanzbildgebung (MRI) zählt zu den wichtigsten und innovativsten High-tech-Verfahren in der Medizin, dessen Forschungsrelevanz auch daran sichtbar wird, dass alle drei globalen Anbieter MR-Entwicklungsabteilungen in Deutschland unterhalten. Seit 1996 betreibt die PTB einen 3-Tesla-Ganzkörpertomographen, um daran innovative Messverfahren zu entwickeln mit den Zielen, neue Diagnoseverfahren zu erschließen, Patientensicherheit zu gewährleisten und F&E für zukünftige MR-Technologien durchzuführen. So wurden parallele Anregungstechniken ebenso wie Verfahren zur MR-Thermometrie entwickelt, Studien zur Biochemie psychischer Erkrankungen und theoretische Arbeiten zur Spinmanipulation durchgeführt; multimodale Bildgebungsverfahren und hyperpolarisierte Edelgase eingesetzt.

Mit diesem Erfahrungshintergrund hat sich die PTB als ein Zentrum für technisches MR-Know-how etablieren können. Als physikalisch-technischer Partner bildet sie deshalb eine tragende Säule des Berliner Konsortiums zur Einrichtung eines Ultrahochfeld-MR-Zentrums, dessen Kerninvestitionen ein 7-Tesla-Ganzkörpertomograph und ein 9,4-Tesla-Tierscanner sein werden. Unter Führung des Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin stellte sich die Berliner Initiative einer kompetitiven, internationalen Begutachtung und erhielt die Unterstützung zur Einrichtung dieses Ultrahochfeld-Zentrums.

Aus Anlass des 10-jährigen Jubiläums des 3-Tesla-Labors, aber mit Blick bereits auf die neuen Herausforderungen der 7-Tesla-Technologie, wurde im Frühjahr das 214. PTB-Seminar mit dem Titel „High-field MR imaging and spectroscopy – 3 T and beyond“ veranstaltet, bei dem es gelang, Spitzenvertreter aus MR-Industrie und -Forschung in Berlin zu versammeln und mit ihnen in einen intensiven und anregenden Gedankenaustausch zu treten.

Numerische Simulation einer HF-Feldverteilung (links) und experimentelle Verifikation (Mitte) bei 3-Tesla, numerische Extrapolation für 7-Tesla (rechts).

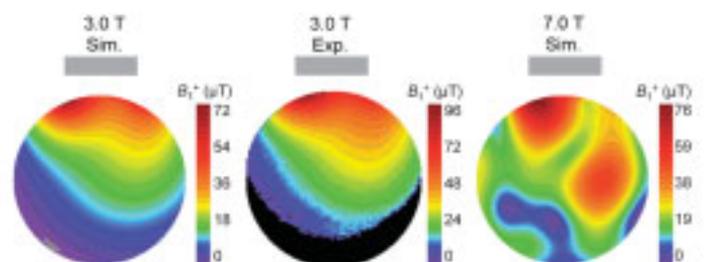
Numeric simulation of an RF field distribution (left) and experimental verification (centre) at 3 tesla, numeric extrapolation to 7 tesla (right).

## After 10 years of 3-tesla MRIs: now the 7-tesla era has commenced

Magnetic-resonance imaging (MRI) is one of the most important and most innovative hi-tech modalities in medicine whose relevance for research can also be seen by the fact that all of the three global suppliers maintain MR Development Departments in Germany. Since 1996, PTB has been operating a 3-tesla whole-body tomograph in order to develop measuring methods aimed at discovering new diagnostic procedures, ensuring the safety of the patients and realising R&D for future MR technologies. Thus, parallel excitation techniques and procedures for MR thermometry have been developed, studies on the biochemistry of mental disorders and theoretical work on spin manipulation has been carried out, and multimodal imaging methods and hyperpolarised rare gases have been used.

With this experimental background, PTB has been able to establish itself as a centre of technical MR know-how. As a physical-technical partner, it therefore forms one of the pillars of the Berlin Consortium for the establishment of an ultra-high-field MR centre whose core investments will be a 7-tesla full-body tomograph and a 9.4-tesla animal scanner. Headed by the Max Delbrück Centre for Molecular Medicine, the Berlin initiative subjected itself to a competitive international assessment and obtained support for the establishment of this ultra-high-field centre.

On the occasion of the 10th anniversary of the 3-tesla laboratory – but already focussed on the future challenges of the 7-tesla technology – the 214th PTB Seminar entitled “High-field MR imaging and spectroscopy – 3 T and beyond” was hosted in the spring of 2006; at this seminar, it was possible to gather in Berlin top representatives of the MR industry and research and to have an intense and inspiring exchange of ideas and opinions.

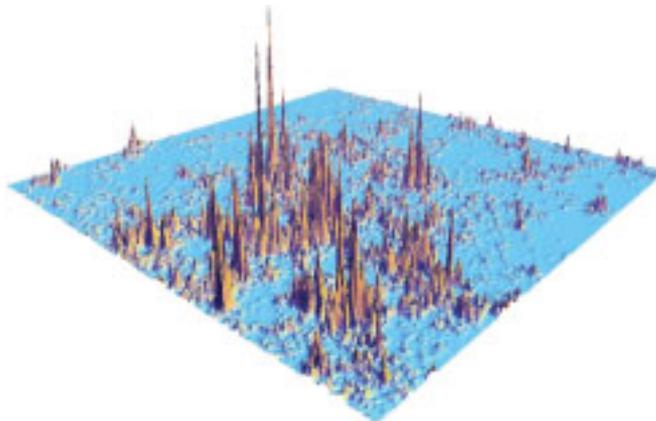


## Universeller Leitwert an quantenkritischen Punkten

Für den dissipativen elektrischen Transport in Quanten-Hall-Systemen konnte ein quantitativer Zusammenhang mit den multifraktalen elektronischen Eigenzuständen hergestellt werden. Quantenmechanische Modellrechnungen ergaben einen universellen Leitwert. Bislang war  $1/2 e^2/h$  für die nur an den Stufen der quantisierten Hall-Plateaus auftretenden Maxima des Längsleitwertes vorhergesagt worden, was auch durch frühere Experimente gestützt wurde. Allerdings ergaben neuere quantenmechanische Modellrechnungen sowohl für den Zweipunkt-Leitwert als auch für die longitudinale Leitfähigkeit einen universellen Wert von  $0,6 e^2/h$ . Dieses Ergebnis zeigte sich unabhängig von den gewählten mikroskopischen Parametern.

Als Ursache für die unerwartete Diskrepanz konnte die skaleninvariante räumliche Struktur der elektronischen Wellenfunktion bei speziellen Energien, den so genannten quantenkritischen Punkten, dingfest gemacht werden. Obwohl deren multifraktale Eigenschaften schon seit einiger Zeit bekannt waren, konnte erst jetzt ein Zusammenhang zwischen dem experimentell zugänglichen Leitwert und den theoretisch berechneten fraktalen Dimensionen quantitativ hergestellt werden. Dieser neue Befund wurde ebenfalls für den kritischen Leitwert am Metall-Isolator-Übergang von zweidimensionalen ungeordneten Systemen mit Spin-Orbit-Wechselwirkung bestätigt. Letztere werden derzeit verstärkt im Zusammenhang mit Spintronic-Anwendungen untersucht. Die Verknüpfung zwischen kritischem Leitwert und den fraktalen Dimensionen scheint eine universelle Eigenschaft von Quanten-Phasenübergängen zu sein.

Die räumliche (200 nm x 200 nm) Aufenthaltswahrscheinlichkeit (Ordinate) eines Elektrons, welches am Stromtransport beim Quanten-Hall-Effekt teilnimmt. Die selbstähnliche Struktur der fraktalen Landschaft bestimmt den universellen Leitwert.



Spatial (200 nm x 200 nm) probability distribution (ordinate) of an electron participating in the current transport in the case of the quantum Hall effect. The self-similar structure of the fractal landscape determines the universal conductance.

## Universal conductance at quantum-critical points

For the dissipative electric transport in quantum Hall systems it has lately been possible to establish a quantitative relation with the multifractal electronic eigenstates. Quantum-mechanical model calculations yielded a universal conductance. Up to now,  $1/2 e^2/h$  had been predicted for the maxima of the longitudinal conductance which only occur at the steps of the quantised Hall plateau. This value has also been confirmed by former experiments. New quantum-mechanical model calculations have, however, shown a universal value of  $0.6 e^2/h$  for both the two-point conductance and the longitudinal conductivity. This result was independent of the microscopic parameters selected.

The cause of the unexpected discrepancy was found to be related with the scale-invariant spatial structure of the electronic wavelength function at special energies – the so-called quantum-critical points. Although their multifractal properties have already been known for some time, it has only now been possible to establish a quantitative relation between the experimentally accessible conductance and the theoretically calculated fractal dimensions. This new result has also been confirmed for the critical conductance at the metal-insulator-transition of two-dimensional disordered systems with spin-orbit interaction. The latter are at present being investigated in more detail in connection with spintronic applications. The linkage between critical conductance and the fractal dimensions seems to be a universal property of quantum phase transitions.

## In-vivo Arzneimitteltests im BMSR-2

Wollte man bisher in klinischen Studien den Weg einer Tablette durch den menschlichen Körper von außen verfolgen, musste man sie vorher radioaktiv präparieren. Ein neues Verfahren, das in der PTB, Institut Berlin, in Kooperation mit Prof. Weitschies von der *Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald* entwickelt worden ist, kommt ohne diese radioaktive Belastung der Probanden aus. Es beruht auf hochgenauen Magnetfeldmessungen, wie sie im Größtgerät „Berlin Magnetically Shielded Room – 2“ (BMSR-2) möglich sind.

Bei dem neuen Verfahren werden die Tabletten mit einem zugelassenen Lebensmittelfarbstoff versehen, dessen magnetische Eigenschaften dann in einem starken Magnetfeld aktiviert werden. Nach der Einnahme der Tablette wird der Proband in einen Messraum gebracht, in dem störende Magnetfelder aus der Umgebung nahezu völlig abgeschirmt sind. Das Magnetfeld der Tablette und damit ihr Weg durch den Körper und die Freisetzung ihres Wirkstoffs können nun verfolgt und sichtbar gemacht werden. Hierin liegt das Interesse der pharmazeutischen Industrie, insbesondere zur Optimierung der Darreichungsform.

Mit der Firma *SocraTec R&D GmbH*, Oberursel, wurde ein Kooperationspartner für die Nutzung in klinischen Phase-1-Studien gefunden. Ziel ist es, das schonende Verfahren zu einer anerkannten Ergänzung im Arzneimittelzulassungsverfahren zu machen. Bei Erfolg der auf zunächst drei Jahre befristeten Kooperation wird hier im Bereich der Arzneimitteltests ein weltweit einzigartiges Verfahren in die Praxis überführt.

Im Innern dieses Gebäudes befindet sich der magnetisch bestabgeschirmte Raum der Erde (ein Würfel der Kantenlänge 3 m). Der Faktor für die Gesamtabschirmung beträgt  $10^{-6}$ .

Inside the building is the magnetically shielded room (a cube of 3 m length) with a total shielding factor of  $10^{-6}$ , this is the best-shielded room of the earth.

## In-vivo medicine tests at BMSR-2

Up to now, if one wanted to track from outside the human body the path a tablet takes through it, one had to first prepare it radioactively. A new method, which was developed at the Berlin Institute of PTB in collaboration with Prof. Weitschies from the *Ernst Moritz Arndt University of Greifswald*, works without having to subject the test persons to this radioactive stress. It is based on high-precision magnetic field measurements as possible at the very large-scale facility “Berlin Magnetically Shielded Room – 2” (BMSR-2).

With this new method, an approved food colouring agent is added to the tablets and its magnetic properties are then activated in a strong magnetic field. After having taken the tablet, the test person is led to a measuring room which is practically fully shielded from interfering magnetic fields from the environment. The magnetic field of the tablet, and thus the path of the tablet through the body and the release of its active substance can be tracked and made visible. This is of particular interest to the pharmaceutical industry, especially for the optimisation of the pharmaceutical form.

With the *SocraTec R&D GmbH* company located at Oberursel, a cooperation partner for the use in clinical phase-1 studies has been found. The aim of this collaboration is to make this sparing method an approved complement in the drug approval procedure. If the cooperation, which is initially limited to 3 years, is successful, a worldwide unique test method in the field of drug testing would be ready for practical application.



## PTB ist Benannte Stelle nach der Europäischen Messgeräte-richtlinie (MID)

Die Europäische Messgeräte-richtlinie (MID) ist seit dem 30. Oktober 2006 im Europäischen Wirtschaftsraum anzuwenden. Die PTB wurde für die Durchführung der in der MID genannten Konformitätsbewertungsverfahren vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) benannt und stellt seit-her entsprechende Zertifikate für Messgeräte-hersteller aus.

Mit der MID werden die Anforderungen an Wasser-, Gas-, Elektrizitäts- und Wärmehähler sowie Messanlagen für Flüssigkeiten, selbsttätige Waagen, Taxameter, Maßverkörperungen, Längenmessgeräte und Abgasanalysatoren harmonisiert. Der Hersteller muss vor dem Inverkehrbringen für jedes Messgerät eine Konformitätserklärung ausstellen, nachdem ein Konformitätsbewertungsverfahren von einer Benannten Stelle durchgeführt wurde. Die Konformitätsbewertungsverfahren sind nach verschiedenen Modulen aufgebaut. Wesentliche Module sind die Baumusterprüfung (Modul B), die Anerkennung der Qualitätssicherung in der Fertigung (Modul D), die Entwurfsprüfung einschließlich Anerkennung der Qualitätssicherung in Entwicklung und Fertigung (Modul H1) sowie die Prüfung von Seriengeräten (Modul F).

Da die Umsetzung der MID ins nationale Eichrecht nicht rechtzeitig erfolgt ist, gilt die MID ab dem 30. Oktober 2006 in Deutschland direkt. Die PTB wurde mit der Kennnummer 0102 am 11. Juli 2006 für die Module B, D und H1 für alle in der MID genannten Messgerätearten vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie benannt. Für das Verfahren nach Modul F, das weitgehend der bisherigen Ersteichung entspricht, wurden Eichbehörden und staatlich anerkannte Prüfstellen benannt, so dass diese Aufgabe nicht von der PTB übernommen werden muss. Eine vollständige Liste der Benannten Stellen in Europa ist in dem Internet-Informationssystem NANDO der Europäischen Kommission aufgeführt.

Kennzeichnung eines Messgeräts im Jahr 2006 mit der Konformitätsbewertung durch die PTB

Conformity marking of a measuring instrument that was assessed by PTB in 2006

## PTB is now a Notified Body according to the European Measuring Instruments Directive (MID)

Starting October 30, 2006, the European Measuring Instruments Directive (MID) has to be applied within the European Economic Area. The Federal Ministry for Economics and Technology (BMWi) has assigned PTB the task of performing the conformity assessment procedures specified in the MID, and PTB has started to issue corresponding certificates for manufacturers of measuring instruments.

With the coming into force of the MID, the requirements for water meters, gas meters, electrical energy meters and heat meters, as well as for measuring systems for liquids, for automatic weighing instruments, taximeters, material measures, dimensional measuring instruments and exhaust analysers have been harmonised. Before placing a measuring instrument on the market, the manufacturer must issue a declaration of conformity after a conformity assessment procedure has been performed by a notified body. The conformity assessment procedures are composed of different modules. Essential modules are the type examination (Module B), the approval of the quality assurance in production (Module D), the design examination including approval of the quality assurance in development and production (Module H1), as well as the verification of serial instruments (Module F).

As the MID has not been transposed into the national Verification Law as of October 30, 2006, it applies directly now. Already on July 11, 2006, PTB was appointed – with the number 0102 – by the Federal Ministry for Economics and Technology as notified body for the modules B, D and H1 for all measuring instruments specified in the MID. For the procedure according to Module F, which more

or less corresponds to the “initial verification”, verification authorities and state-approved test centres were appointed as notified bodies so that this task does not have to be carried out by PTB. A comprehensive list of the Notified Bodies in Europe is available in the Internet Information System NANDO of the European Commission.



## Qualitätsinfrastruktur als Schlüssel zur Teilnahme am Welthandel

Am 11. und 12. September 2006 veranstaltete die *Technische Zusammenarbeit* der PTB einen Fachdialog zu Themen der Qualitätsinfrastruktur (QI). In den 40 Projekten der Technischen Zusammenarbeit geht es um den Aufbau von Qualitätsinfrastrukturen in Entwicklungs- und Schwellenländern. Mit der Veranstaltung unter dem Motto „angeMESSEN!“ sollte auch das erhebliche Potenzial und die Attraktivität der Region Braunschweig aufgezeigt werden. Die Braunschweiger QI-Tage wurden im Braunschweigischen Landesmuseum eröffnet und wurden am zweiten Tag in der Industrie- und Handelskammer fortgesetzt.

Es wurden qualitätsrelevante Themen und Arbeitsgebiete, die von der PTB national und international vertreten werden, behandelt. Neben eigenen Experten aus dem Bereich des Messwesens kamen auch Fachleute aus anderen QI-Bereichen – und den jeweiligen Fachinstitutionen – wie dem Prüfwesen, Normenwesen und der Konformitätsbewertung zu Wort. Das Programm stellte das vielfältige Zusammenwirken der qualitätsrelevanten Leistungen und Dienstleistungen aller QI-Akteure dar. Im Mittelpunkt standen der entwicklungspolitische Rahmen der technischen Zusammenarbeit und die global vorherrschenden sozialen und wirtschaftlichen Bedingungen.

In so genannten „Qualitätscafés“ wurden in Kleingruppen die entwicklungsrelevanten Möglichkeiten und Grenzen einer funktionierenden Qualitätsinfrastruktur vor dem Hintergrund globaler und regionaler Handels-, Integrations- und Harmonisierungstendenzen lebhaft und teils auch kontrovers diskutiert.

Am 12. September 2006 in der Industrie- und Handelskammer in Braunschweig: Dr. Arthur Lopian, Europäische Kommission; Henning Noske, Braunschweiger Zeitung; Dr. Mukayi Musarurwa, Southern African Development Community Cooperation

12th of September 2006 at the Chamber of Commerce and Industry in Braunschweig: Dr. Arthur Lopian, European Commission; Henning Noske, Braunschweiger Zeitung; Dr. Mukayi Musarurwa, Southern African Development Community Cooperation

## Quality infrastructure as the key to participation in international trade

On the 11th and 12th of September 2006, PTB's "Technical Cooperation" Department arranged a technical dialog on subjects of quality infrastructure (QI). The 40 technical cooperation projects of the Department are focussed on the establishment of quality infrastructures in developing and threshold countries. The event themed "FITTING!" was also intended to show the considerable potential and the attractiveness of the Braunschweig region. The Braunschweig QI days were opened at the State Museum of Braunschweig and continued on the second day at the Chamber of Commerce and Industry.

The event dealt with quality-relevant subjects and fields of work which PTB represents at the national and international level. In addition to PTB experts from the field of metrology, experts from other QI sectors – and the respective technical institutions – as, for example, from the testing and standardisation sector as well as from the field of conformity assessment, participated and had their say. The program represented the manifold interaction of quality-relevant services of all QI actors. Main focal points of the event were the framework of technical cooperation in terms of development policy and the globally prevailing social and economic conditions.

In so-called "quality cafés", the development-relevant possibilities and limits of a well-functioning quality infrastructure led to lively – and sometimes also controversial – discussions in small groups against the background of global and regional trade, integration and harmonisation tendencies.



## 57. Sitzung des Kuratoriums

Das Kuratorium traf sich am 4. und 5. Mai 2006 zu seiner 57. Jahrestagung in Berlin.

Die Tagung begann mit der Besichtigung ausgewählter Messplätze und setzte sich am Nachmittag mit den traditionellen Vorträgen dreier jüngerer Wissenschaftler fort, die über aktuelle wissenschaftliche Forschungsarbeiten berichteten. Daran schlossen sich Fachgespräche der Kuratoren und Gäste mit Vertretern aller Abteilungen an.



Dr. Lederer (links) erläutert den Kuratoren die Aufgaben der Messtechnik für den Verbraucherschutz bei Fernwärme und Fernkälte.

Dr Lederer (left) explaining to the Board of Consultants the tasks of metrology for consumer protection in the field of district heating and cooling.

Die Kuratoriumssitzung am 5. Mai 2006 wurde von Dr. Eckhard Franz, dem Präsidenten des Kuratoriums der PTB, eröffnet. Er informierte über den veränderten Ressortzuschnitt des BMWi, die Stärkung des Technologieaspektes im Aufgabenspektrum des Ministeriums und die Integration der PTB in die Abteilung „Mittelstandspolitik“ des BMWi. Im Bericht zur Haushaltssituation wies Dr. Franz auf den fortbestehenden Personalabbau sowie auf die für 2006 bis 2010 angestrebte Förderung der FuE-Bereiche im Rahmen der „High-Tech-Strategie Deutschland“ und die geplante Neuauflage der Fördermaßnahme „Leistungssteigerung“ für 2007 bis 2009 unter dem neuen Namen „MNPQ-Transfer“ hin. Die Mittel hierfür sollen im Wettbewerb für definierte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben vergeben werden. Nach Informationen über die Empfehlungen, die aus der Evaluation der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) folgen, einschließlich ihrer Auswirkungen auf die PTB, ging Dr. Franz auf die grundlegende Neurege-

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

The Board of Consultants met in Berlin on May 4 and 5, 2006 on the occasion of its 57<sup>th</sup> annual meeting.

The meeting began with a visit to selected measurement facilities and was followed in the afternoon by the traditional lectures by three young scientists who reported on their current scientific research work. These lectures were followed by technical discussions by the members of the Board and guests with representatives from all Divisions.



Dr. Berger (vorne) informiert die Anwesenden über die Möglichkeiten der fluoreszenzgestützten molekularen Bildgebung.

Dr Berger (front) informing the participants on the possibilities offered by fluorescence-assisted molecular imaging.

The meeting of the Board of Consultants was opened on May 5, 2006 by Dr Eckhard Franz, president of PTB's Board of Consultants. He reported on the changes in the distribution of responsibilities at the BMWi, on the increased emphasis which is now being placed on the aspect of technology within the scope of tasks of the ministry, and on the integration of PTB in BMWi's Division "SME Policy". In the report on the budgetary situation, Dr Franz pointed out the persisting cuts in staff as well as the promotion of the R&D sections envisaged for the years 2006 to 2010 within the scope of the "High-Tech Strategie Deutschland" programme, and the promotional measure "Leistungssteigerung" ("Performance Increase") which will be renewed in the years 2007 to 2009 under a new name: "MSTQ Transfer". The financial means for these initiatives are to be allocated within the scope of a competition for defined Research & Development projects. After outlining the recommendations resulting from the evaluation carried out by the Federal Institute of Material



Teilnehmer an der 57. Sitzung des Kuratoriums

Participants in the 57<sup>th</sup> meeting of the Board of Consultants

lung des gesetzlichen Messwesens im Zuge der Umsetzung der Europäischen Messgeräterichtlinie (MID), die künftige Rolle der PTB in dem System u. a. als Benannte Stelle, das Thema Privatisierung des Eichwesens und auf eventuelle Konsequenzen aus der Neuordnung des deutschen Anerkennungs- und Akkreditierungswesens ein.

Der Präsident der PTB, Prof. Dr. Ernst O. Göbel, bilanzierte in seinem Bericht die Arbeitsergebnisse der PTB. Er betonte Forschungsschwerpunkte, beschrieb die Personalentwicklung, zog eine Bilanz im Nachgang zur Evaluierung im Jahr 2002 und zu den aktuellen Zielvereinbarungen mit dem BMWi und beschrieb ausführlich die Entwicklungen innerhalb des iMERA-Projektes, das die PTB zusammen mit den wichtigsten europäischen Partnern durchführt.

Im weiteren Verlauf der Sitzung berichtete Dr. Wolfgang Buck, als Leiter des Instituts Berlin, über den derzeitigen Stand und die Aussichten des Boltzmann-Experiments. Dr. Bernhard Smandek, Beauftragter für Technologietransfer der PTB, informierte über die bisherige Entwicklung und das weitere Vorgehen der PTB in dem Bereich des Technologietransfers, und der Schatzmeister des Helmholtz-Fonds e. V., Ruprecht von Siemens, berichtete über die wirtschaftlichen Entwicklung des Helmholtz-Fonds e. V. .

#### **Persönliches:**

Im Berichtsjahr schieden die Mitglieder Prof. Dr. Pobell und Prof. Dr. Stock aus dem Kuratorium aus.

Research and Testing (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung –BAM) – as well as their impacts on PTB –, Dr Franz spoke on the fundamentally new regulation in legal metrology within the scope of the implementation of the European Measuring Instruments Directive (MID), the future role to be played by PTB in the new system – amongst others as a notified body, the topic of the privatisation of the verification system and the possible consequences resulting from the new regulation in the German recognition and accreditation system.

In his report, PTB's president, Prof. Dr Ernst O. Göbel, took stock of PTB's work results. He emphasised research focuses, described the staff development, commented on the evaluation of 2002 and on the joint target agreements between PTB and the BMWi, and described in detail the developments within the scope of the iMERA project which PTB is presently carrying out with the most important European partners.

Later during the session, Dr Wolfgang Buck reported, in his function as Head of the Berlin Institute, on the current status and the prospects of the Boltzmann experiment. Dr Bernhard Smandek, delegate for technology transfer at PTB, gave information on the previous development and the future process to be applied at PTB in the field of technology transfer; the treasurer of the Helmholtz Fund, Ruprecht von Siemens, reported on the economic development of the Helmholtz Fund.

#### **Personal matters:**

In the year under report, the members Prof. Dr Pobell and Prof. Dr Stock retired from the Board.

## Wechsel der Vizepräsidentschaft in der PTB

Am 7. Februar ging der bisherige Vizepräsident, Prof. Dr. Manfred Kochsiek, in den Ruhestand und übergab sein Amt an Prof. Dr. Manfred Peters, den bisherigen Leiter der Abteilung „Mechanik und Akustik“. Die Personalentscheidung zeugt von Kontinuität: Sowohl Kochsiek als auch Peters gelten als ausgewiesene Experten des deutschen und internationalen Messwesens.

Als junger, diplomierter Maschinenbauingenieur kam Manfred Kochsiek vor 40 Jahren in die PTB. Nach seiner Promotion auf dem Gebiet der Gewindemesstechnik wurde Kochsiek in der Folge Leiter der PTB-Laboratorien *Masseneinheit*, *Mechanische Waagen* sowie der Fachgruppe *Masse* und übernahm von 1985 bis 1993 die Abteilung *Technisch-Wissenschaftliche Dienste*. In dieser Zeit standen Fragen der internationalen Einbindung der PTB im Bereich des gesetzlichen Messwesens, der metrologischen, technischen Zusammenarbeit wie auch der Normung im Mittelpunkt seiner Arbeiten. 1993 wurde Manfred Kochsiek als Mitglied in das Präsidium der PTB berufen und 1998 Vizepräsident.

Kochsiek's erfolgreiches nationales und internationales Engagement, z. B. als Präsident der *Internationalen Organisation für Gesetzliches Messwesen* (OIML), spiegelte sich auch wider in den Vorträgen des internationalen Workshops, das die PTB ihm zu Ehren am Tag der Amtsübergabe veranstaltete. Die Redner, prominente Metrologie-Experten aus der ganzen Welt, gaben einen umfassenden Überblick über die Entwicklungslinien der europäischen und globalen Metrologie.



Prof. Dr. Manfred Kochsiek

## A change in the vice-presidency at PTB

On February 7, Prof. Dr. Manfred Kochsiek, the previous vice-president, retired and passed his office on to Prof. Dr. Manfred Peters, hitherto Head of the Department "Mechanics and Acoustics". This staff decision is evidence of continuity: Kochsiek and Peters are both renowned experts of German and international metrology.

Forty years ago, Manfred Kochsiek joined PTB as a young graduated mechanical engineer. After his PhD in the field of thread metrology, Mr Kochsiek was successively Head of the PTB laboratories "Mass Unit", "Mechanical Weighing Instruments", as well as of the Technical Group "Mass", and, from 1985 until 1993, headed the Department "Technical-Scientific Services". During that time, issues such as the international involvement of PTB in the field of legal metrology, metrological technical cooperation and standardisation were the focus of his work. In 1993, Manfred Kochsiek was appointed a member of PTB's Presidential Board and became Vice-President in 1998.

Mr Kochsiek's successful national and international work, e.g. as President of the International Organisation for Legal Metrology (OIML), was also reflected in the speeches that were held on the occasion of the international workshop PTB organised in his honour on the day of his leave-taking. The speakers, prominent metrology experts from all over the world, gave a comprehensive overview of the directions of development strategies of European and global metrology.



Prof. Dr. Manfred Peters

## PTB übernimmt EUROMET-Vorsitz

Die europäische Gemeinschaft der nationalen Metrologie-Forschungsinstitute (EUROMET) hat seit ihrer diesjährigen Jahreshauptversammlung (31. Mai bis 2. Juni) einen neuen Vorsitzenden: Professor Dr. Michael Kühne, Mitglied des Präsidiums der PTB, übernahm diese Aufgabe. Auch die Leitung des EUROMET-Sekretariats liegt nun in den Händen der PTB.

Bereits im Jahr 1987 hatten sich die europäischen nationalen Metrologieinstitute zusammengeschlossen, um in Europa die Einheitlichkeit im Messwesen zu gewährleisten und um gemeinsam Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Messtechnik zu betreiben. Angesichts schrumpfender öffentlicher Haushalte kommt dieser Koordination heute umso größere Bedeutung zu.

Zum jetzigen Zeitpunkt sind in EUROMET die Metrologieinstitute von 33 europäischen Ländern sowie das Institut für Referenzmaterialien der Europäischen Kommission vertreten. In diesen Instituten sind europaweit etwa 4000 Mitarbeiter beschäftigt, davon mehr als 2000 in Forschung und Entwicklung. Das Gesamtbudget der Institute lag 2005 bei rund 400 Millionen Euro. Deutschland ist in EUROMET durch die PTB vertreten. Als größtes europäisches Metrologieinstitut mit etwa 1400 Mitarbeitern nimmt die PTB eine wichtige Rolle in der Zusammenarbeit in Europa wahr, insbesondere bei der Weitergabe der Einheiten an Institute kleiner Länder, die selber keine vergleichbaren Einrichtungen betreiben können.

## PTB assumes EUROMET presidency

Since this year's Annual General Meeting (May 31-June 2, 2006), the European Community of National Metrology Research Institutes (EUROMET) has acquired a new president: Prof. Dr. Michael Kühne, Member of PTB's Presidential Board, has assumed this task. Also, the management of the EUROMET Secretariat now lies in the hands of PTB.



Already in 1987, the European National Metrology Institutes had formed an association with the aim of ensuring uniformity in metrology in Europe and promoting research and development in the field of metrology. In view of the reduction in public funding, this coordination has now gained in importance.

Currently, the Metrology Institutes of 33 European countries

and the Institute for Reference Materials of the European Commission are represented at EUROMET. Approximately 4,000 persons are employed at these institutes Europe-wide, amongst which more than 2,000 are dedicated to research and development. The total budget of the institutes amounted to approx. 400 million euros in 2005. At EUROMET, Germany is represented by PTB. As the largest European Metrology Institute, PTB, with its approx. 1,400 employees, plays an important role at the level of European cooperation, especially with regard to the dissemination of the legal units to the institutes of smaller countries which cannot run comparable facilities of their own.

## Lange Nacht der Zeit



Die Kultur- und Wissenschaftsnacht zum Ende der Sommerzeit am 28./29. Oktober war groß angelegt. Ging es doch darum, sozusagen die „Vorspeise“ zu allen Veranstaltungen in Braunschweig als „Stadt der Wissenschaft“ 2007 zu liefern und gleichzeitig die PTB als einen „Ort im Land der Ideen“ vorzustellen.



Dahinter verbirgt sich ein bundesweiter Wettbewerb, an dem die PTB erfolgreich teilgenommen hatte. Dass schließlich 10 000 Besucher durch die Tore strömen würden, damit hatten selbst Optimisten nicht gerechnet. Doch trotz oftmals langer Warteschlangen wanderten die Gäste in bester Stimmung über das illuminierte Gelände. Das Konzept, zusätzlich zur stets vorhandenen Portion Physik auch mal einen ganzen, langen Abend voller Kultur und Spaß anzubieten, hatte die Besucher von weit außerhalb des Braunschweiger Raumes angezogen.

## Long Night of Time

The Night of Science and Culture that took place at the threshold between summer and winter time on October 28/29, 2006 was a huge event. It was intended to provide the “starters” – so to speak – to all events which will be taking place in 2007 in Braunschweig as “City of Science” and to introduce, at the same time, the PTB as a location in the “Land of Ideas”.



The background of all this was a Germany-wide competition level in which PTB had taken part successfully. Even optimists could not foresee that in the end, 10,000 visitors would pass PTB’s gates that night. But in spite of the long waiting queues here and there, the guests wandered cheerfully about the illuminated grounds in the best of moods. The concept to offer – in addition – to the portion of physics that was present everywhere, also a really long night full of culture and entertainment had attracted visitors even

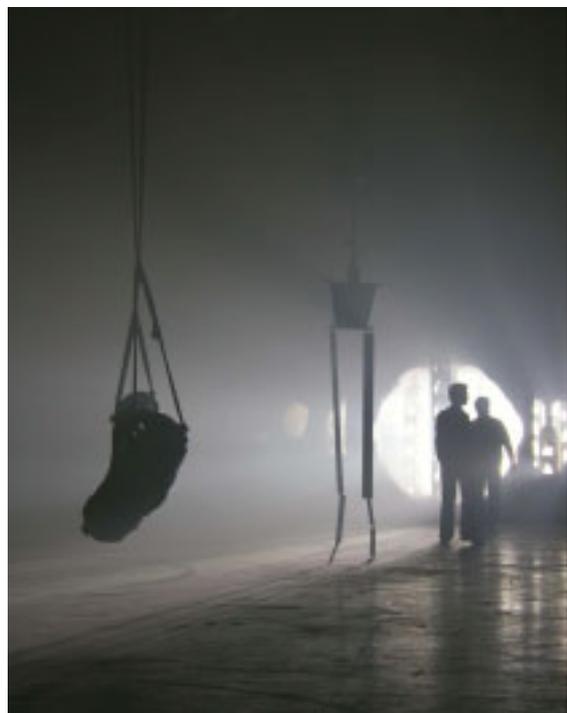


Sie konnten sich – stets die großen Uhren im Blick, die anzeigten, wie viele Stunden, Minuten und Sekunden bis zum Ende der Sommerzeit noch blieben – nach Herzenslust von Station zum Station treiben lassen: von der Cocktailbar zur Atomuhr, von der Lesung zur Tiefenentspannung, vom Stromzählermuseum bis zum kriminalistischen Vortrag. Selbst um zwei Uhr nachts, als drei Künstler der Hochschule für Bildende Künste Braunschweig ihre surreale Aktion im ehemaligen Reaktorgebäude der PTB starteten, waren immer noch viele Unermüdliche dabei. Als dann schließlich die Uhren von 3 Uhr auf 2 Uhr zurücksprangen, verfolgten noch Hunderte von Besuchern die Zeitumstellung per Liveschaltung zum Sender DCF77 in Mainflingen und konnten sich so persönlich davon überzeugen, dass die Nacht tatsächlich eine Stunde länger gedauert hatte – obwohl sie doch wie im Fluge vergangen war.



from far outside the region around Braunschweig itself.

They could just drift along – always with the large clocks in sight which indicated how many hours, minutes and seconds were still left until the end of summer time – from station to station according to their taste – from the cocktail bar to the atomic clock, from a lecture to a session of deep relaxation, from the power meter museum to the the criminological lecture. Even at 2.00 am, as three artists from the Academy of Visual Arts of Braunschweig started their surrealistic show in the former reactor building of PTB, untiring spectators were still to be found. When finally the clocks sprang back from 3.00 am to 2.00 am, hundreds of visitors were still following the time switching broadcast live from the DCF77 transmitter in Mainflingen. They could thus convince themselves personally that the night had indeed lasted one hour longer – although it had seemed to fly.



## EU-Forschungskommissar zu Gast in der PTB

Am 31. August besuchte der EU-Forschungskommissar Dr. Janez Potočnik anlässlich einer Informationsreise zu Highlights der niedersächsischen Forschungslandschaft auch die PTB. Begleitet wurde er von Bénédicte Caremier aus dem Büro des Forschungskommissars, Erika Mann, EU-Parlamentarierin, und Heiko Gevers, Abteilungsleiter für Forschung und Innovation im niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur. Hintergrund des PTB-Besuchs war vor allem eine Initiative der nationalen metrologischen Forschungsinstitute, sich in einem europäischen Netzwerk zusammenzuschließen. Eine europäische Förderung könnte dieser Initiative die nötige Schubkraft verleihen.

Die Zukunft der nationalen Forschungsinstitute der Metrologie – und damit auch der PTB – liegt in Europa. Eine stärkere Koordinierung der einzelnen Forschungsaufgaben ist das Gebot der Stunde. 20 Partner, darunter die wichtigsten metrologischen Staatsinstitute Europas, nehmen dieses Gebot besonders ernst und wollen sich um eine entsprechende europäische Förderung bewerben. Das diskutierte Förderungsmodell sieht eine Finanzierung zur einen Hälfte aus nationalen Mitteln sowie zur anderen Hälfte aus europäischen Mitteln vor. Angesichts des bedeutenden Umfangs der metrologischen Forschung in Europa geht es hierbei um eine Förderung in einer Höhe von insgesamt mehreren hundert Millionen Euro.

EU-Kommissar Dr. Janez Potočnik mit der EU-Parlamentarierin Erika Mann und dem Präsidenten der PTB, Prof. Dr. Ernst O. Göbel (von links).

EU Commissioner Dr Janez Potočnik with the EU parliamentarian Erika Mann and PTB's president, Prof. Dr Ernst O. Göbel (from left to right)

## EU Commissioner for Research is guest at PTB

On August 31, the EU Commissioner for Research, Dr. Janez Potočnik, visited also PTB, on the occasion of an informative trip to the highlights of the Lower Saxon research landscape. He was accompanied by Bénédicte Caremier from the Office of the Commissioner for Research, as well as by Erika Mann, member of the EU parliament, and Heiko Gevers, head of the Department for Research and Innovation at the Lower Saxon Ministry for Science and Culture. The background of his visit to PTB was, above all, an initiative of the National Metrology Research Institutes to form a European network. A European funding could give the necessary impetus to the initiative.

The future of the National Research Institutes of Metrology – and thus also of PTB – lies in Europe. A stronger coordination of the individual research tasks is essential at the moment. Twenty partners – among them the most important National Metrology Institutes in Europe – take this task very seriously and want to apply for a corresponding European funding. The promotion model discussed envisages a promotion based on 50 % national and 50 % European funds. In view of the significant volume of metrological research in Europe, the funding would thereby amount to several hundred million euros in total.



**Promotionen 2006 • Doctorates in 2006**

Oliver Mack (1.1)	Verhalten piezoelektrischer Kraftaufnehmer unter Wirkung mechanischer Einflussgrößen
Hermann Zangerle (2.45)	Behavior of single charge devices included in different electrical circuits
Jorge Koelliker Delgado (3.11)	Amount of carbon dioxide fraction determination by TDLAS: Evidences for a potential primary method directly applied in gas analysis.
Hartmut Illers (4.2)	Development of a Standardised Technique for the Measurement of the Detective Quantum Efficiency of Digital X-ray Imaging Systems
Claudio Dal Savio (5.15)	Spectroscopy of size dependent many-particle effects in single self-assembled semiconductor quantum dots
Guido Bartl (5.4)	Mitarbeit bei Untersuchung zum Einfluss von Wellenfrontaberration auf Durchmesserbestimmungen mit einem neu aufzubauenden Kugelinterferometer
Hans-Jürgen Altmeyer (5.4/3.2)	Realisierung eines Zweistrahl-Laser-Komparators zum Vergleich von Feuchtegeneratoren
Minja Gemisic Adamov (7.23)	Measurements of local electric fields by Doppler-free laser spectroscopy of hydrogen resonance lines
Gerardo Padilla Viquez (7.34, 7.23)	Investigation of TDLAS for its Application as Primary Standard for Partial Pressure Measurements
Nicolaus Mathies (7.6)	Messunsicherheit einer gravimetrischen Kalt- und Warmwasser-Normalmessanlage für große Volumenströme

**Habilitationen 2006 • Habilitations in 2006**

Alexander Zorin (2.45)	Coherence phenomena in small Josephson tunnel junctions and quantum devices on their basis
Hans Werner Schumacher (2.53)	Untersuchungen zur Dynamik der Magnetisierungsumkehr in magnetischen Speicherzellen

# Zahlen und

## Personal: Entwicklung • Staff: development

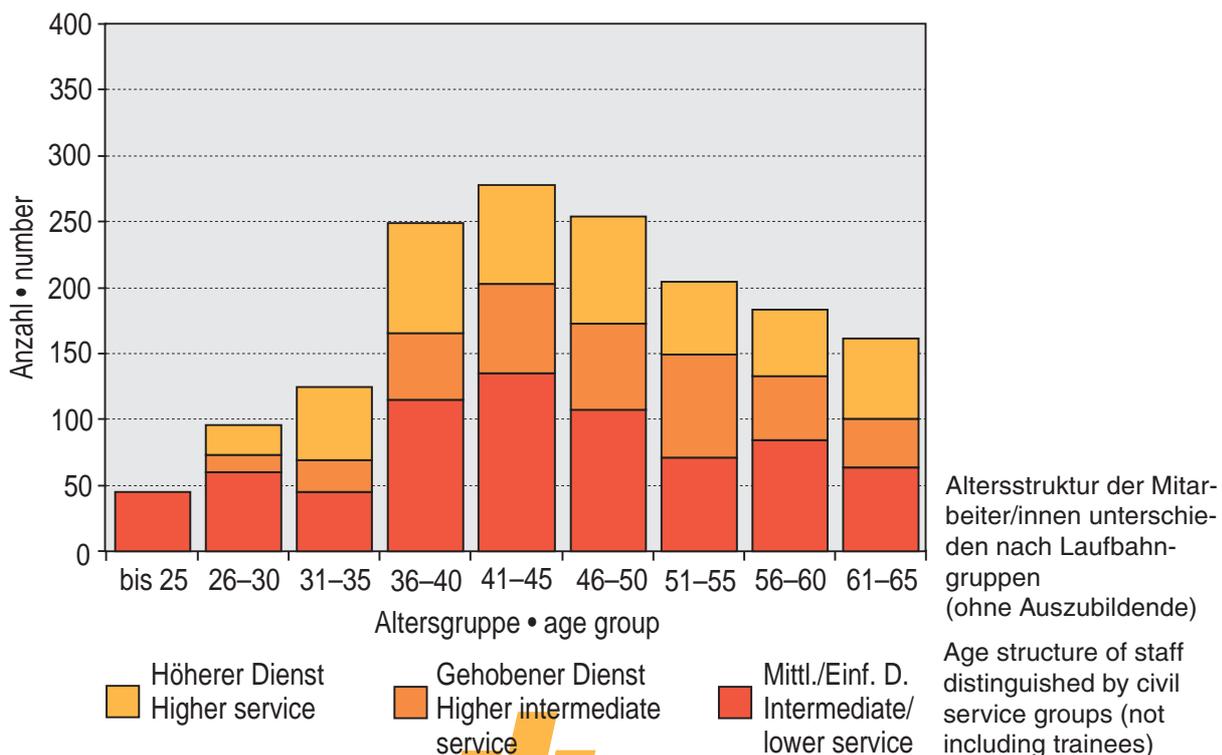
Personelle Entwicklung von 1997 bis 2006 (Stand: 31. Dezember 2006) • Development of staff

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

Beschäftigungsverhältnis	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
a)										
Beamte • civil servants	483	486	490	501	503	507	506	508	510	515
Angestellte • employees	850	827	821	808	786	767	744	727	692	863
Arbeiter • workers	234	227	223	201	204	201	201	193	196	—*
Kasino­personal • canteen staff	8	8	6	6	7	7	6	0	0	0
gesamt • total	1575	1548	1540	1516	1500	1482	1457	1428	1398	1378
b)										
Auszubildende • trainees	142	150	151	147	136	138	144	158	159	150
Aushilfskräfte temporary staff	19	35	32	44	52	53	52	61	69	66
Drittmittelpersonal staff members financed by third parties	85	110	70	92	104	106	122	105	109	169
Mitarbeiter gesamt staff member total	1821	1843	1793	1799	1792	1779	1775	1752	1735	1763

\* Mit 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



# Fakten

Ausbildung • Training (31. Dezember 2006)

	BS	Berlin	
Kommunikationselektroniker	– –	2 (0)	communication electronics technologists
IT-Systemelektroniker	20 (5)	– –	information and telecommunication technologists
Elektroniker/in für Geräte und Systeme	37 (7)	– –	electronics technician for devices and systems
Physiklaboranten	21 (5)	– –	laboratory technicians, physics
Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik	10 (3)	– –	electronics engineer for electrical and building services engineering
Elektroinstallateure	6 (0)	– –	electrical fitters
Feinwerkmechaniker			precision instrument maker
Fachrichtung Feinmechanik	14 (3)	6 (2)	speciality: precision mechanics
Feinwerkmechaniker			precision instrument maker
Fachrichtung Maschinenbau	5 (0)	– –	speciality: mechanical engineering
Fotografen	4 (1)	– –	photographers
Technische Zeichner	4 (1)	– –	draftsmen
Köche	1 (0)	– –	cooks
Mikrotechnologen	1 (0)	– –	microtechnologists
Tischler	– –	5 (2)	joiners
Systeminformatiker	– –	4 (2)	IT systems technicians
Fachangestellte für Bürokommunikation	– –	10 (3)	specialists in office communications
gesamt	123 (25)	27 (9)	total

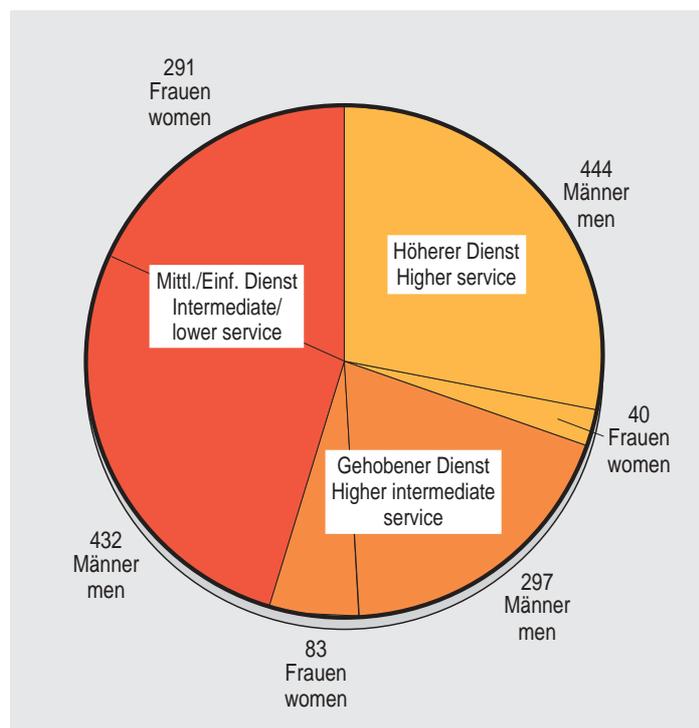
Die PTB gehört zu den größten Ausbildungsbetrieben in der Region. Gegenwärtig sind 150 Auszubildende bei der PTB angestellt. In Klammern sind die Neueinstellungen im Berichtsjahr angegeben.

The PTB is among the most important institutions of the region which provide training. 150 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)



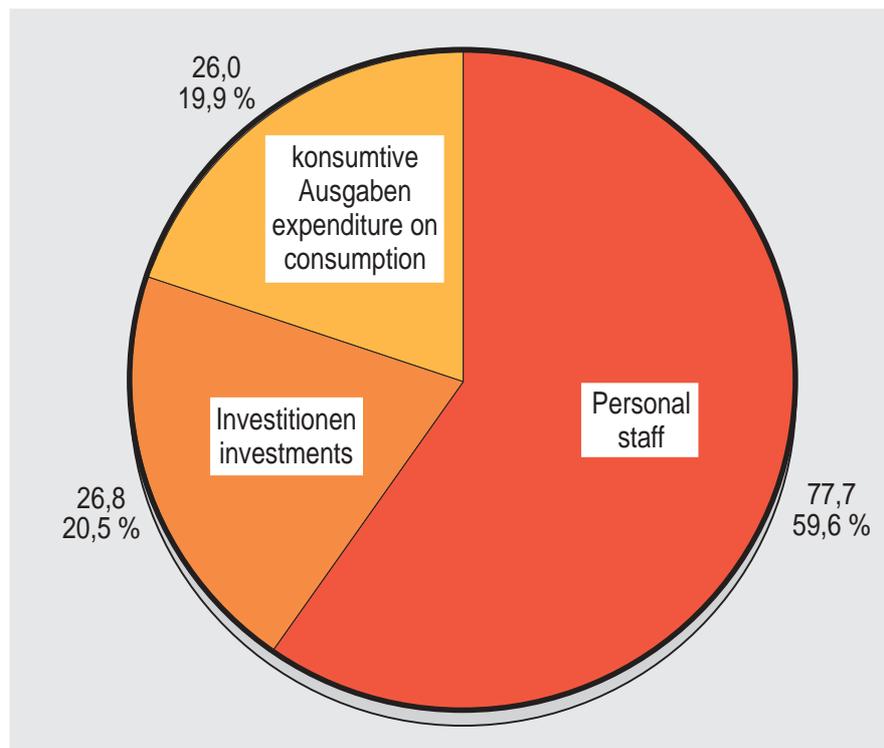
**Haushalt: Gebühren • Budget: charges**

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	2004	2005	2006	charges
Amtshandlungen und sonstige Gebühren	6492	6008	6087	official acts and repayment work; other fees
Prüfung und Zulassung von Spielgeräten	1391	1489	1934	tests and approvals of gaming machines
von Prüfstellen (Elektrizität)	233	251	393	of test centres (electricity)
Leistungen im Rahmen des DKD	1554	1223	1465	services rendered within the framework of DKD
gesamt	9670	8971	9879	total

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



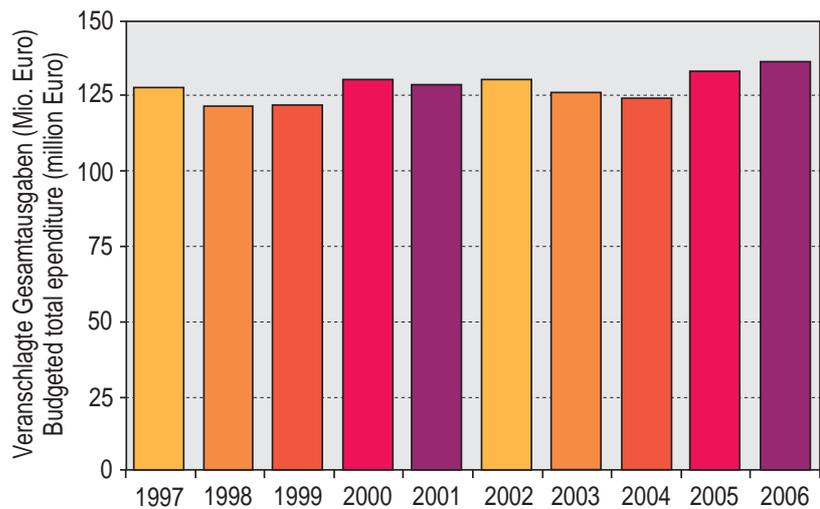
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. Euro). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

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	2004	2005	2006	budgetary means
Personalausgaben	77,2	77,9	77,7	staff costs
Investitionen (Bau und Geräte)	21,4	27,2	26,8	investments (building activities and instruments)
konsumtive Ausgaben	26,0	28,0	26,0	expenditure on consumption
gesamt	124,6	133,1	130,5	total

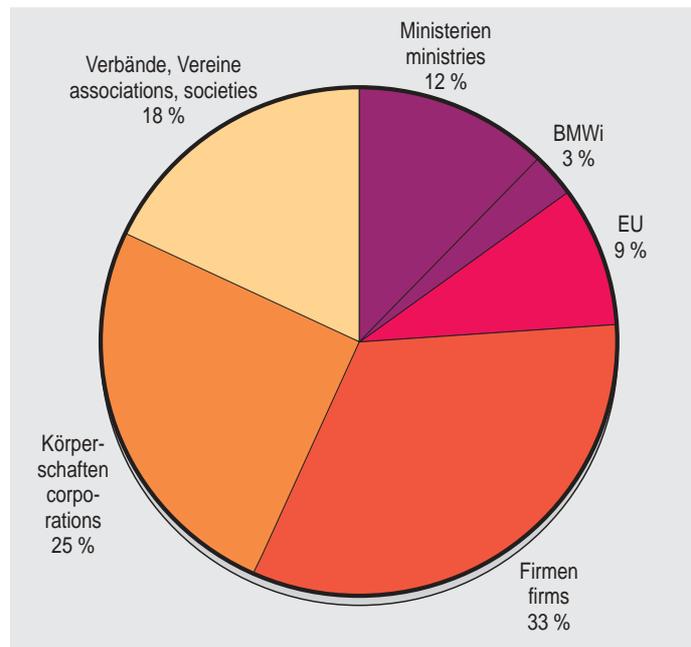
Haushalt: Entwicklung • Budget: development



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

Drittmittel: Forschungsprojekte • Third party funds: research projects

Die Drittmittel für Forschungsvorhaben summieren sich 2006 auf 7,9 Mio. Euro. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Insgesamt wurden im Berichtsjahr 13,7 Mio. Euro für 382 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) verwendet (davon 2,4 Mio. Euro für 74 Projekte in Berlin).



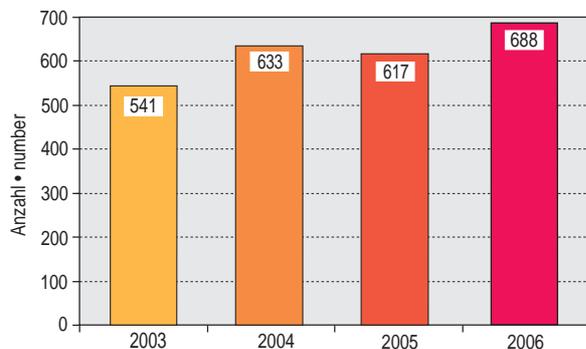
In 2006, the third-party funds for research projects added up to a total of 7.9 million Euro. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources. In the year under review, a total of 13.7 million Euro were used for 382 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 2.4 million Euro of these for 74 projects in Berlin.

Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures

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

... in Braunschweig		2004	2005	2006	
elektrische Energie	MWh	42 635	26 194	26 495	electrical energy
Wärme	MWh	24 942	23 336	24 206	heat
Gas	m <sup>3</sup>	32 144	25 845	30 855	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	100 477	99 930	92 492	water
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnliche					
Gewerbeabfälle	t	111	112	57	refuse-like industrial waste
recycelte Abfälle	t	445	191	282	recycled waste
Sonderabfälle	t	35	28	21	hazardous waste
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	127 222	110 540	71 721	waste disposal costs (approx.)
... in Berlin		2004	2005	2006	
elektrische Energie	MWh	4358	4344	4595	electrical energy
Gas	m <sup>3</sup>	12 100	8590	51 727	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	33 230	39 290	29 800	water
Helium, flüssig	l	40 550	43 900	48 100	helium, liquid
Stickstoff, flüssig	l	72 771	63 374	55 500	nitrogen, liquid
Abfälle:					waste produced:
Reststoffe insgesamt (ca.)	t	121	171	56	residues, total (approx.)
hausmüllähnliche					
Gewerbeabfälle	t	56	55	56	refuse-like industrial waste
recycelte Abfälle	t	62	112	28	recycled waste
Sonderabfälle	t	3	4	4	hazardous waste
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	37 000	14 800	9900	waste disposal costs (approx.)

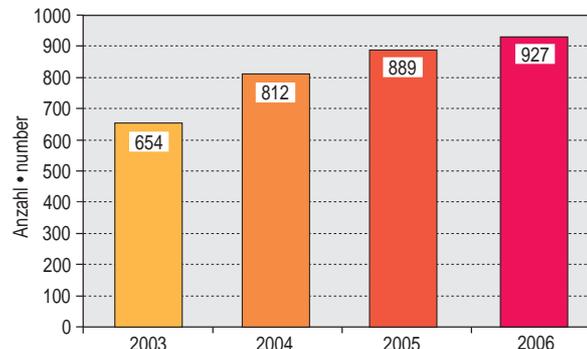
Veröffentlichungen • Publications



Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 2003 bis 2006 (vgl. Datenbank „PTB-Publica“ im Internet)

Number of publications by PTB staff members (in scientific journals, books, conference digests, etc.) between 2003 and 2006 (cf. database “PTB-Publica” on the web)

Vorträge • Lectures



Anzahl der auswärtigen Vorträge, die PTB-Mitarbeiter/innen in den Jahren 2003 bis 2006 gehalten haben

Number of lectures held by PTB staff members outside PTB between 2003 and 2006

**Aus dem Veranstaltungskalender • Events**

	2004	2005	2005	
PTB-Seminare	11	10	13	PTB Seminars
Tagungen, Workshops, etc. *	16	15	27	Conferences, workshops, etc. *
Kolloquien	89	94	68	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).

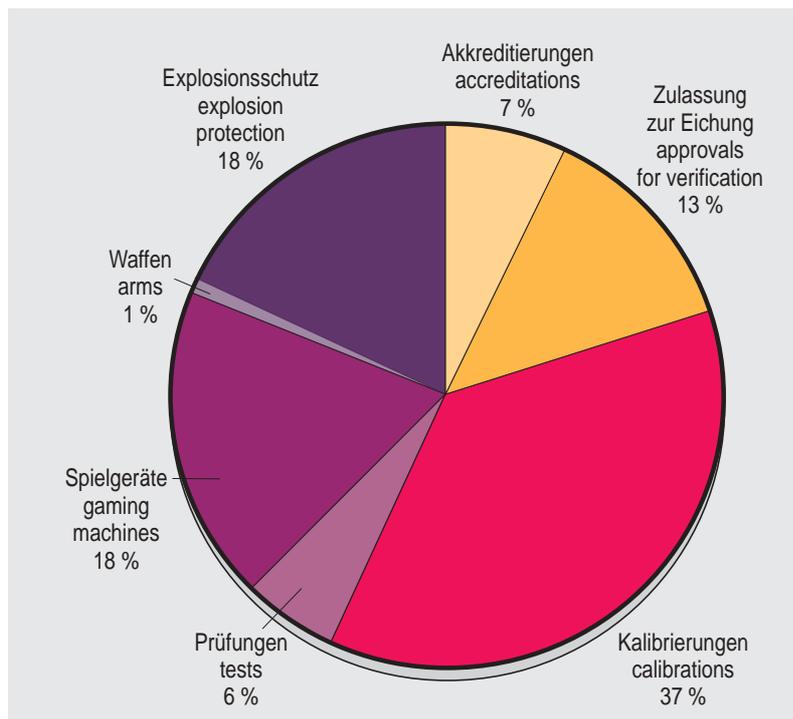
\*Ab 2004 werden nur noch große nationale und internationale Veranstaltungen gezählt.

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).

\*From 2004 on, only large national and international events are counted.

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

Aufteilung der Einnahmen im Jahr 2006 auf die verschiedenen Dienstleistungsbereiche der PTB. Gesamteinnahmen: 9,88 Millionen Euro.



Distribution of the income of 2006 among the various service sectors of PTB. Total receipts: 9.88 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 21 Länder in vier Kontinenten durch 25 bilaterale Projekte beim Aufbau ihrer technischen Infrastruktur allein aus Mitteln des BMZ unterstützt. Weitere Länder profitieren von regionalen und sektoralen Projekten. Der finanzielle deutsche Beitrag betrug mehr als 4 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, 21 countries in four continents were assisted within the scope of 25 projects in setting up a technical infrastructure from BMZ funds alone. The financial contribution of Germany amounted to more than 4 million Euro. The ensigns or regional emblems show where PTB is implementing projects.

### Gastwissenschaftler, Gäste und Besucher

Im letzten Jahr kamen 13 265 Besucher aus aller Welt in die PTB (Standort Braunschweig). Den größten Anteil bildeten die metrologischen Fachbesucher aus Wissenschaft und Wirtschaft (7955) sowie die Teilnehmer an unterschiedlichsten Seminaren, Tagungen und Kolloquien (3950). Auch der allgemeine Besucherdienst der PTB, im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit, fand wie gewohnt regen Zuspruch. 1360 Besucher (in 73 Gruppen) schauten den Wissenschaftlern in Braunschweig über die Schultern.

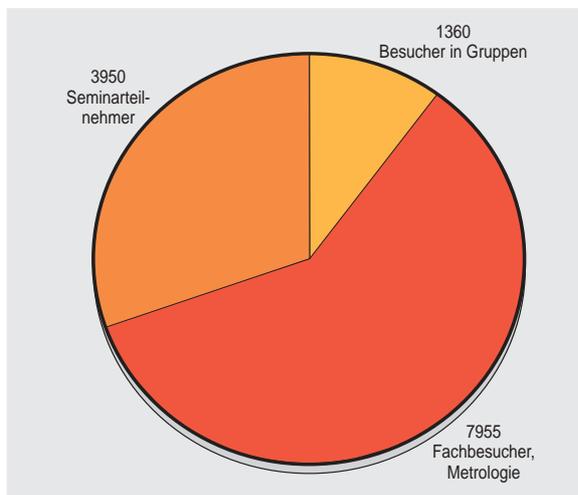
Weitere 386 Besucher (in 20 Gruppen) besuchten das Institut Berlin.

### Guest scientists, guests and visitors

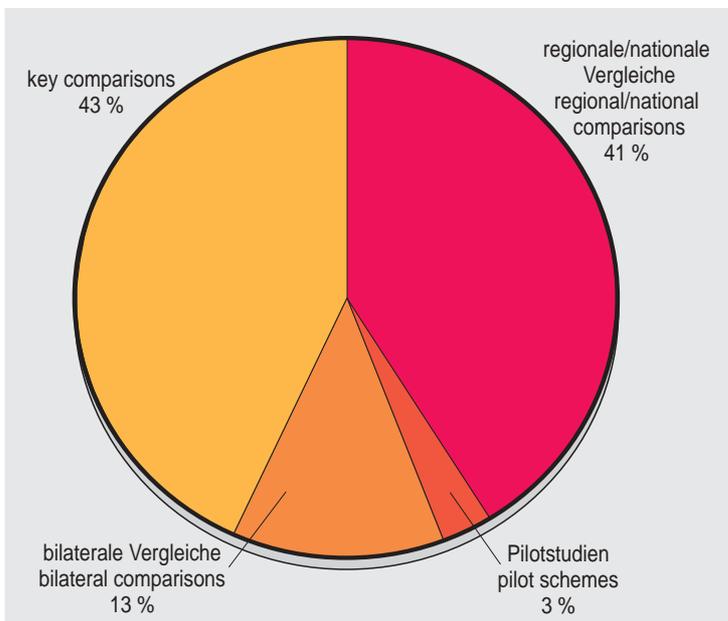
Last year, 13 265 people from all parts of the world visited PTB (Braunschweig site). Most of them were metrological professionals from science and economy (7955) as well as participants in the diverse seminars, meetings and colloquia (3950).

PTB's general visitor service within the scope of public relations work was also popular as usual. 1360 visitors (in 73 groups) observed the scientists work in their laboratories.

An additional 386 guests (in 20 groups) visited the Berlin Institute.



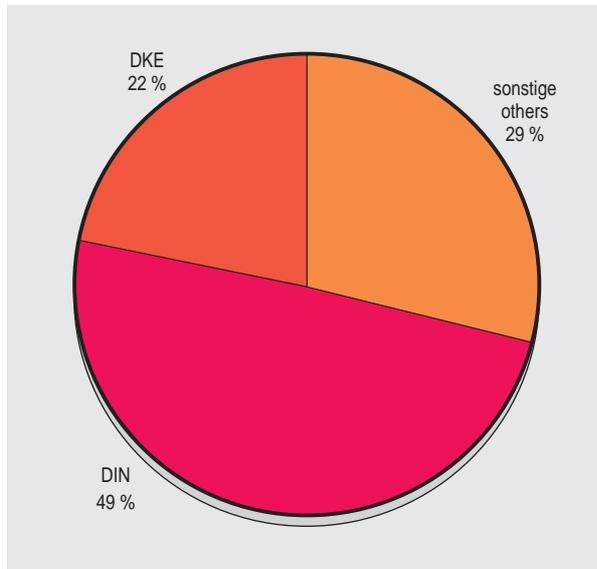
### Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements



In the year under review, the PTB participated in 39 comparison measurements, viz. 17 key comparisons, (organized by the Consultative Committees of the International Committee for Weights and Measures, CIPM), 16 regional/national comparisons, 5 bilateral comparisons and one pilot scheme.

Die PTB nahm im Berichtsjahr an 39 Vergleichsmessungen teil, und zwar an 17 Schlüsselvergleichen (key comparisons, organisiert von den Beratenden Komitees des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht, CIPM), 16 regionalen/nationalen Vergleichen, 5 bilateralen Vergleichen und einer Pilotstudie.

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

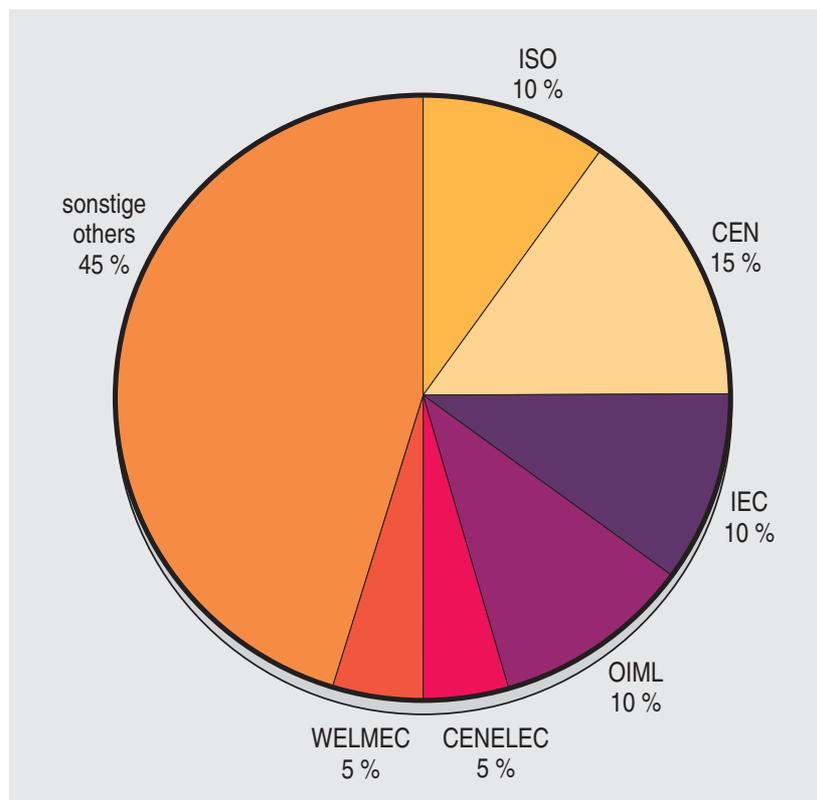


Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei nationalen Normungsvorhaben. Innerhalb des *Deutschen Instituts für Normung e. V.* (DIN) war die PTB an 118 Normenvorhaben beteiligt, bei der *Deutschen Elektrotechnischen Kommission* (DKE) bei 52 Vorhaben.

Break-up of the PTB's committee work for national standardization projects (in percent). PTB cooperated in 118 projects of the *Deutsches Institut für Normung* (DIN) and in 52 projects of the *Deutsche Elektrotechnische Kommission* (DKE).

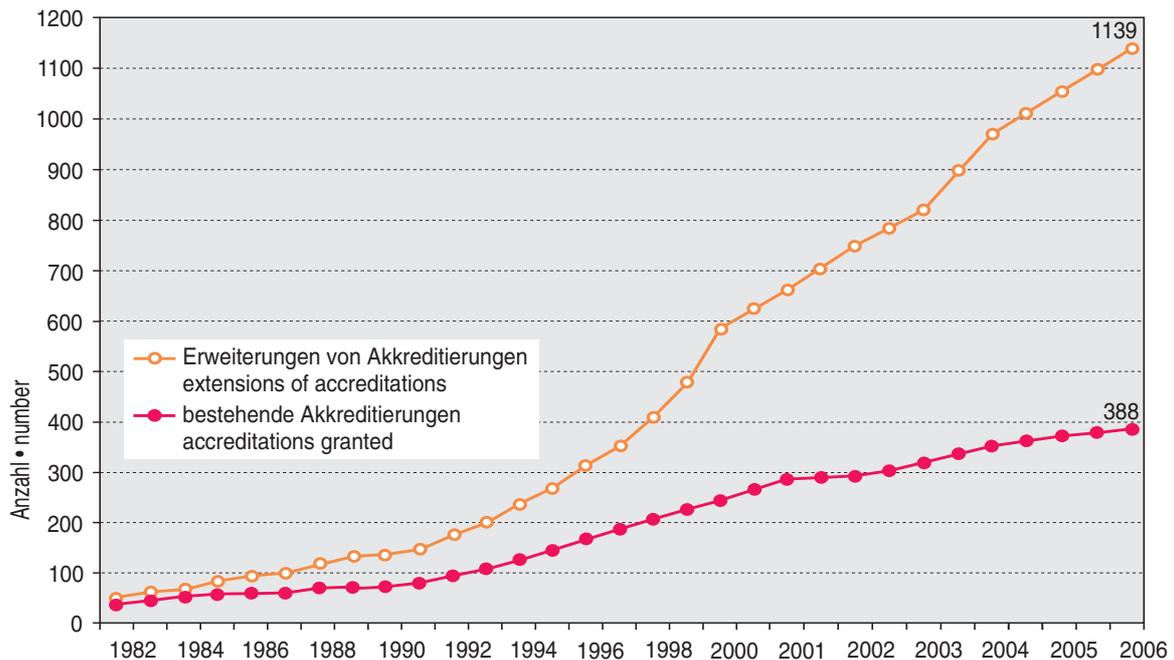
Internationales Messwesen: Gremienarbeit • Metrology on the international level: committee work

Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei internationalen Normungsvorhaben. Insgesamt arbeitete die PTB im letzten Jahr bei 494 solcher 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 committee work for international standardization projects (in percent). In the past year, the PTB cooperated in 494 standardization projects of this kind. 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.

## Deutscher Kalibrierdienst (DKD) • German Calibration Service (DKD)



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 25 Akkreditierungen im Berichtsjahr, denen neun Rücknahmen der Akkreditierungen, z. B. durch Firmenzusammenschlüsse, gegenüberstanden.

The development of DKD and the acceptance with which it is met by the industrial firms involved cannot only be seen from the increasing number of accredited laboratories but also from the extensions of these. The DKD laboratories constantly adapt their calibration capabilities to the requirements of the market and to the ever more exacting accuracy requirements. The total number of accredited DKD laboratories as it stands today is the result of 25 accreditations granted in the year under review and nine cancellations due, for example, to the merger of firms.

# PTB

## Die Abteilungen

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

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

**Mechanik  
und  
Akustik**



**Berichte der Abteilungen**

**Abteilung**



**1**

# Mechanik und

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*.

Neben der SI-Basiseinheit für die Masse werden abgeleitete Einheiten für Kraft, Drehmoment, Beschleunigung, Durchfluss, Schalldruck und Schallleistung realisiert und zugehörige Grundlagenforschung durchgeführt. Eine wichtige Aufgabe ist die Weitergabe dieser Einheiten an Eichbehörden, Kalibrierlaboratorien (DKD), Industrie und Anwender aus den Bereichen Energie- und Wasserversorgung sowie Umweltschutz und Medizin. Weitere Dienstleistungen sind Geräteprüfungen im Rahmen des industriellen und gesetzlichen Messwesens sowie Beratung in allen Fragen der einschlägigen Messtechnik. Im Rahmen des Mutual Recognition Arrangement (MRA) von metrologischen Staatseinstituten, die der Meterkonvention angehören oder assoziiert sind, werden seit mehreren Jahren in verschiedenen Bereichen CIPM-Schlüsselvergleiche (Key Comparisons) oder regionale Schlüsselvergleiche durchgeführt. Nachfolgend werden wichtige Arbeiten sowie bedeutende Forschungsarbeiten und Entwicklungen aus der Abteilung vorgestellt.

Titelbild  
Mehrkomponenten-Kraftmesseinrichtung mit einem in einem Kugelkalibrierkörper (blau) integrierten Kraft-Vektorsensor (rot)

## 1.1 Masse

Der Fachbereich *Masse* besteht aus den Arbeitsgruppen *Darstellung Masse*, *Waagen*, *Dynamisches Wägen*, *IT-Wägetechnik* und *Gravimetrie*.

In der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* wurde im Rahmen eines internationalen Projektes zur Bestimmung der Avogadro-Konstanten die Massenzunahme einer 1-kg-Siliziumkugel (SILO-02) nach einer thermischen Oxidation der Oberfläche ermittelt. Dazu wurde die Massenzunahme der Kugel in Luft und Vakuum bestimmt. Vor und nach einer thermischen Oxidation wurde die Siliziumkugel SILO-02 in Luft mit einer Referenzkugel ebenfalls aus Silizium und im Vakuum mit einem Massennormal aus Edelstahl verglichen (Bild 1). Damit konnte die Massenzunahme in Luft zu 4,183 mg (Standardunsicherheit = 0,01 mg) und im Vakuum zu 4,187 mg (Standardunsicherheit = 0,005 mg) bestimmt werden.

Im Rahmen einer Forschungsk Kooperation mit der *Sartorius AG* wurde ein von dieser Firma in Zusammenarbeit mit der *Technischen Universität Ilmenau* und dem *Internationalen Büro für Maß und Gewicht* (BIPM) entwickelter 1-kg-Vakuum-Massekomparator in der PTB installiert (Bild 2). Ziel der wissenschaftlichen Kooperation ist die Ermittlung und Verbesserung der Eigenschaften des neuartigen Komparators in Bezug auf Anwendungen mit höchsten Anforderungen im Bereich der Darstellung und Weitergabe der Masseneinheit unter Berücksichtigung der Einflussgrößen in Luft und im Vakuum. So konnten bei ersten Massevergleichen von 1-kg-Massenormalen aus Edelstahl Standardabweichungen von  $< 0,2 \mu\text{g}$  in Luft und  $< 0,1 \mu\text{g}$  im Vakuum erzielt werden.

In der Arbeitsgruppe *Waagen* wurden wissenschaftliche Untersuchungen zum Einsatz piezoelektrischer Sensoren in der Wägetechnik

# nd Akustik

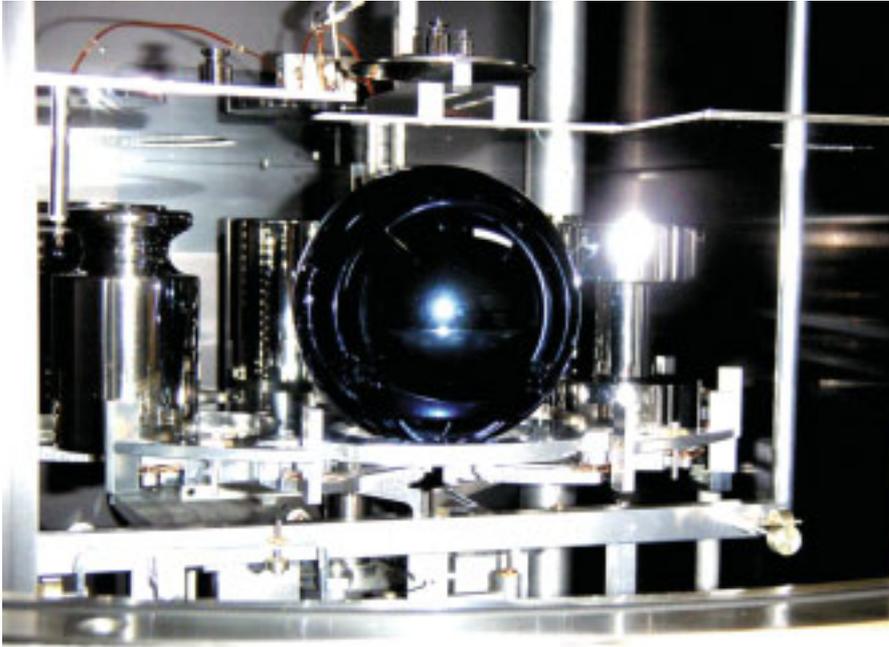


Bild 1: 1-kg-Siliziumkugel in einem 1-kg-Vakuum-Massekomparator zur Bestimmung der Massenzunahme nach einer thermischen Oxidation

Bild 2: Der 1-kg-Vakuum-Massekomparator Typ CCL1007 (Fa. Sartorius AG, Göttingen)



nik erfolgreich abgeschlossen. Es konnte u. a. nachgewiesen werden, dass diese Sensoren prinzipiell auch für statische Wägungen geeignet sind, allerdings nur bei relativ geringen Genauigkeitsanforderungen (z. B. Klasse III zum Einsatz in der Achslastbestimmung).

Die Revision der weltweit sehr bedeutenden OIML-Empfehlung R76 für nichtselbsttätige Waagen ist unter Federführung von Deutschland und Frankreich nunmehr in ihre Endphase eingetreten. Der inhaltlich endgültige Entwurf fand bei der 41. Sitzung des *Internationalen Komitees für Gesetzliches Messwesen* (CIML) im Oktober 2006 eine sehr große Mehrheit und wurde vorbehaltlich letzter redaktioneller Änderungen verabschiedet. Mit der Anfang 2007 erwarteten Veröffentlichung wird die umfangreiche Revisionsarbeit an der R76 zum erfolgreichen Abschluss gebracht sein. Wesentliche Neuerungen in der revidierten Fassung sind eine Erweiterung des Modul- und Familienkonzeptes mit der Möglichkeit zur Zertifizierung bestimmter Module, wie z. B. Auswertegeräte, Anpassung der EMV-Anforderungen an aktuelle internationale Normen und Empfehlungen sowie erstmals Softwareanforderungen an alle Arten von softwaregesteuerten nichtselbsttätigen Waagen.

Ziel einer Industriekooperation auf dem Gebiet der „Mechatronik“ ist die Entwicklung neuer Sensoren mit aufgespalteten Dehnungsmessstreifen für die Wägetechnik. In einem ersten Schritt wurde mittels numerischer Simulationen die prinzipielle Eignung von Silizium als Federmaterial nachgewiesen.

In der Arbeitsgruppe *Dynamisches Wägen* wurden zur Vorbereitung der Ausstellung von Entwurfsmuster-Prüfbescheinigungen nach Modul H1 der neuen europäischen Messgeräte Richtlinie (MID) zwei Audits von QM-Systemen von Herstellern selbsttätiger Waagen erfolgreich durchgeführt.

In der Arbeitsgruppe *Gravimetrie* ist die Entwicklung eines globalen Schwere-Informationsystems erfolgreich abgeschlossen worden. Damit kann für verschiedene metrologische Anwendungen der Einfluss des Schwerefeldes für beliebige Orte der Erde mit relativen Unsicherheiten zwischen  $10^{-4}$  und  $10^{-6}$  abgefragt werden. Der Zugang erfolgt über ein Internetportal.

## 1.2 Festkörpermechanik

Der Fachbereich *Festkörpermechanik* besteht aus den Arbeitsgruppen *Darstellung Kraft*, *Darstellung Drehmoment*, *Periodische Kräfte* und *Ionenakkumulation*.

Auf Grund der zunehmenden Bedeutung der Mikrometrologie wurden in der Arbeitsgruppe *Darstellung Kraft* die Kraftmesseinrichtungen auf den Bereich mN und  $\mu$ N erweitert. Hierzu werden unterschiedliche Kompensationswaagen als Referenz eingesetzt, die mittels Massenormalen und unter Berücksichtigung der lokalen Fallbeschleunigung die Kraft-Skala im Bereich mN und  $\mu$ N darstellen. Zur Reduzierung der Messunsicherheit wurden insbesondere parasitäre Einflüsse wie z. B. Krafteinleitungseffekte und die Axialität der Ausrichtung der Kraftaufnehmer systematisch untersucht.

In der Kraftmessung gewinnt zunehmend die Mehrkomponenten-Kraftmessung an Bedeutung, was sich z. B. in der zunehmenden Zahl neuer Mehrkomponenten-Kraftmessgeräte zeigt. Um diese Geräte zukünftig für alle Komponenten kalibrieren zu können, werden in der PTB neue Kalibrierverfahren entwickelt. Hierzu kommen neben der in der PTB aufgebauten Mehrkomponenten-Messeinrichtung auch Kraft-Normalmesseinrichtungen mit direkter Massewirkung zum Einsatz. Es wird erwartet, dass die Messunsicherheit für ausgewählte Komponenten von derzeit etwa 0,1 % um bis zu einem Faktor 10 reduziert werden kann.

In der Arbeitsgruppe *Periodische Kräfte* werden Kraftmessgeräte mit unterschiedlichen zeitabhängigen Kraftverläufen untersucht und die Abweichungen zum statischen Verhalten ermittelt. Während mittels eines Schwingerregersystems im höherfrequenten Bereich von 100 Hz bis 1000 Hz vorwiegend periodische Kräfte bis 10 kN erzeugt werden, können servohydraulisch Kräfte bis 100 kN kontinuierlich und periodisch im Frequenzbereich von 0 Hz bis 100 Hz dargestellt werden. Die noch laufenden Untersuchungen haben gezeigt, dass im oberen Frequenzbereich die Messunsicherheiten unter 1 % liegen und im unteren Frequenzbereich solche unter 0,1 % möglich sind.

Bild 3: Hydraulischer Kraftschrauber bis 70 kN·m in der neuen Kalibriereinrichtung

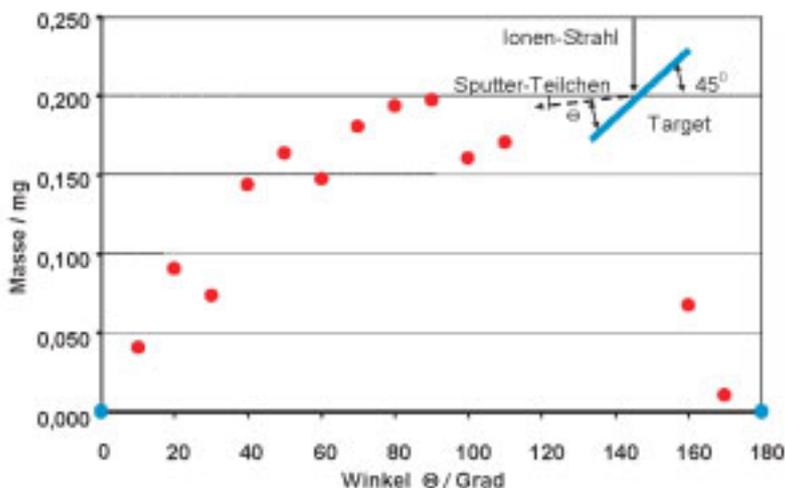


Bild 4: Masse der mit dem Wismut-Ionenstrahl aufgesputterten Schichten als Funktion des Streuwinkels. Oben rechts: Schema der Anordnung.

Auf dem Gebiet der Drehmomentdarstellung wurden die Messungen im Rahmen des weltweit ersten CIPM-Schlüsselvergleichs CCM.T-K1 bis 1 kN · m beendet. Die maximale relative Abweichung der Messwerte des Aufnehmers TB2 von ihrem Mittelwert lag in der 1-kN·m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung bei extrem geringen  $2 \cdot 10^{-6}$ . Schraubwerkzeuge für Drehmomente von 1 kN · m bis 150 kN · m waren bisher nicht rückführbar zu kalibrieren. Sie arbeiten mit mechanischer Getriebeübersetzung, hydraulischen oder pneumatischen Antrieben und in der Regel sehr kurzen, einseitigen Abstützungen. In Zusammenarbeit mit einem Industriepartner wurden Untersuchungen zur Bestimmung der Messunsicherheit von Drehmomentaufnehmern bei großen überlagerten Querkräften und Biegemomenten durchgeführt. Der zusätzliche Beitrag zur Messunsicherheit

konnte auf weniger als 0,5 % vom Messwert reduziert werden. Die Kalibriervorrichtung bis 150 kN · m mit einseitiger Hebelarmlänge von maximal 750 mm ist im Bild 3 dargestellt.

Am Ionenexperiment können derzeit wägbare Massen von 50 mg bis 100 mg Wismut (Bi) in einem Bestrahlungszyklus akkumuliert werden. Da durch Zerstäubung und Reflexion beim Auftreffen des Strahles auf dem Kollektorboden Partikel durch die Eintrittsöffnung des Kollektors verloren gehen können, wurde ein spezieller Monitor zur Messung der Winkelverteilung dieser zurückgestreuten Teilchen entwickelt. Die von einem Target zurückgestreuten Teilchen wurden auf der Oberfläche von kreisförmig angeordneten Stempeln aufgefangen und der winkelabhängige Massenauftrag durch Wägung ermittelt (Bild 4).

### 1.3 Kinematik

Der Fachbereich *Kinematik* besteht aus den Arbeitsgruppen *Darstellung Beschleunigung*, *Geschwindigkeitsmessgeräte*, *Dynamische Druckmessung* und *Stoßdynamik*.

In der Arbeitsgruppe *Beschleunigung* wurde in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe *Messdatenanalyse und Messunsicherheit* eine neue Methode zur modellbasierten Charakterisierung von Beschleunigungsaufnehmern entwickelt. Das Aufnahmeverhalten wird dabei durch eine Differentialgleichung zweiter Ordnung (Bewegungsgleichung) beschrieben, deren drei Koeffizienten aus Messergebnissen der üblichen Kalibrierverfahren mit sinus- oder mit stoßförmiger Anregungsbeschleunigung bestimmt werden. Die zugehörigen Messunsicherheiten ergeben sich auf Basis des bekannten Messunsicherheitsbudgets mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode.

Unter Federführung der PTB wurde der dem weltweiten Schlüsselvergleich CCAUV.V-K1 nachgeschaltete europäische Vergleich für Beschleunigung EUROMET.AUV.V-K1 für alle 15 Teilnehmer erfolgreich beendet.

Bei Videonachfahrssystemen, die zur Verkehrsüberwachung in Polizeifahrzeuge eingebaut werden, liegt die Idee nahe, für die Messung von Ort und/oder Geschwindigkeit künftig Satellitentechnik einzusetzen. Bezüglich dieses Anwendungsbereichs wurden die ersten quantitativen Untersuchungen mit viel versprechenden Ergebnissen durchgeführt. Voraussetzung für eine Eignung eines Satellitenempfängers ist eine zweifelsfrei spezifizierbare Angabe über die aktuelle Genauigkeit der Lage- bzw. Geschwindigkeitsinformation. Hierzu wären eine Standardisierung und Zertifizierung, wie sie insbesondere für GALILEO-Anwendungen geplant sind, sehr hilfreich. Die Auswertung der Satellitendaten muss außerdem für Situationen mit vorübergehend ungünstigen Empfangsbedingungen (z. B. unter einer Brücke) – wie bei aufwändigeren Navigationssystemen im Kfz-Bereich üblich – durch Informationen über den Ablauf der Räder ergänzt werden (Bild 5).

Um Herstellern von Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten und der PTB eine verlässliche Basis für die Zulassungspraxis zu ge-

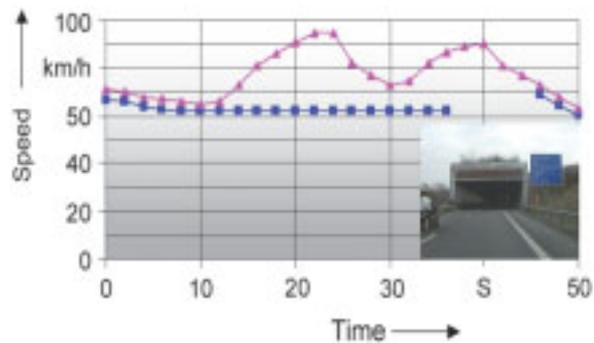


Bild 5: Simultane Geschwindigkeitsmessung von Fahrzeugaufnehmer und kommerziellem GPS-System (low cost), Situation „Tunnel“ mit kurzzeitiger Unterbrechung des GPS-Signals (■ GPS-System ▲ Fahrzeugaufnehmer)

ben, wurden die PTB-Anforderungen aktualisiert. Insbesondere sind nunmehr auch Induktionsschleifen und optische Drucksensoren sowie Reflexionslichtschranken und passiv arbeitende Lichtschranken vorgesehen.

Erstmals wurde ein mehrzielfähiges Geschwindigkeitsüberwachungsgerät zugelassen (Bauart PoliScanspeed), das den gesamten Fahrbahnbereich über mehrere Fahrspuren scannt und daraus die Bewegung aller Fahrzeuge während deren Vorbeifahrt erfasst. Sein Messkopf arbeitet auf Basis einer Laserpuls-Laufzeitmessung (LIDAR), der Scanvorgang erfolgt über eine sich drehende Spiegereinheit. Zur Dokumentation dienen Digitalkameras, deren Bilddaten der Verkehrssituation gemeinsam mit dem Geschwindigkeitsmesswert und weiteren Falldaten kryptografisch gesichert werden. Für die Bauartzulassung ergaben sich erweiterte Prüfungen, insbesondere bezüglich verschiedener Softwarefragen und zum Verhalten im dichten Verkehr mit nebeneinander fahrenden Fahrzeugen.

In der Arbeitsgruppe *Dynamische Druckmessung* wurde an neuen Messverfahren zur Gasdruckmessung, insbesondere an kleinkalibriger Munition und Referenzschwarzpulver geforscht. Entsprechend dem Vorschlag der PTB wurde von der Plenarsitzung der *Ständigen Internationalen Kommission für die Prüfung von Handfeuerwaffen* (CIP) beschlossen, dass zukünftig jeder Mitgliedsstaat der CIP zur Rückführung der Druckmessung einen von vier in der PTB kalibrierten piezoelektrischen Referenzdruckaufnehmern anfordern kann. Die von der PTB maßgeblich

mitgestaltete deutsche Beschlussverordnung wurde zum Juli 2006 in Kraft gesetzt, die Bundesregierung muss sie noch den Mitgliedsländern der CIP zur nachträglichen Zustimmung vorlegen.

#### 1.4 Gase

Der Fachbereich *Gase* besteht aus den Arbeitsgruppen *Strömungsmesstechnik*, *Gasmessgeräte* und *Pigsar*.

Der Fachbereich *Gase* bearbeitete auch 2006 die Darstellung und Weitergabe der Einheit für Volumen strömenden Gases unter Hochdruckbedingungen als einen besonderen Schwerpunkt. Vorrangig sind hierbei die Aktivitäten im Zusammenhang mit CIPM-Schlüsselvergleichen zu nennen. Der Fachbereich *Gase* ist als Pilotlabor an drei Schlüsselvergleichen beteiligt, von denen zwei vollständig abgeschlossen und die Protokolle in der BIPM-Datenbank veröffentlicht sind.

[http://www.bipm.org/utils/common/pdf/final\\_reports/M/FF-K5/CCM.FF-K5.a.pdf](http://www.bipm.org/utils/common/pdf/final_reports/M/FF-K5/CCM.FF-K5.a.pdf)

[http://www.bipm.org/utils/common/pdf/final\\_reports/M/FF-K5/CCM.FF-K5.b.pdf](http://www.bipm.org/utils/common/pdf/final_reports/M/FF-K5/CCM.FF-K5.b.pdf)

Der Bericht zum CCM.FF-K5.a dokumentiert die Identität des europäischen harmonisierten Referenzwertes der Staatsinstitute von Frankreich, Deutschland und der Niederlande mit dem BIPM-Referenzwert aus dem Ringver-

gleich. Das Protokoll beinhaltet eine vollständige Messunsicherheitsanalyse für den gemeinsamen Referenzwert, den die drei beteiligten Staatsinstitute bereits seit November 2004 an Kunden weitergeben.

Die Einheitenrealisierungen für Hochdruckerdgas und für atmosphärische Luft des Fachbereiches *Gase* wurden erstmals direkt und mit geringer Messunsicherheit verglichen. Hierzu wurden kritisch betriebene Venturidüsen eingesetzt, deren Kalibrierwert sowohl über den Vergleich mit den Primärnormalen als auch über strömungstheoretische Ableitungen und einer geometrischen Messung als eine Funktion der Reynoldszahl bestimmt werden kann. Damit ist der Vergleich beider Primärrealisierungen über eine unabhängig gewonnene Rückführung auf geometrische Größen und Gasbeschaffenheit gegeben. Die Qualität dieses Vergleiches konnte international durch Vergleichsmessungen mit dem LNE in Frankreich und dem NIST in den USA gezeigt werden. Die Abweichungen der Teilnehmer gegenüber dem strömungstheoretisch-geometrisch gewonnenen Wert sind in der Größenordnung von nur 0,05 %.

Für die Geschwindigkeitsmessung von Fluiden mit Laser-Doppler-Anemometern (LDA) wurde eine Kalibriereinrichtung entwickelt, die sich durch ihre kleine Bauweise auszeichnet (Bild 6). Anstelle der üblichen rotierenden

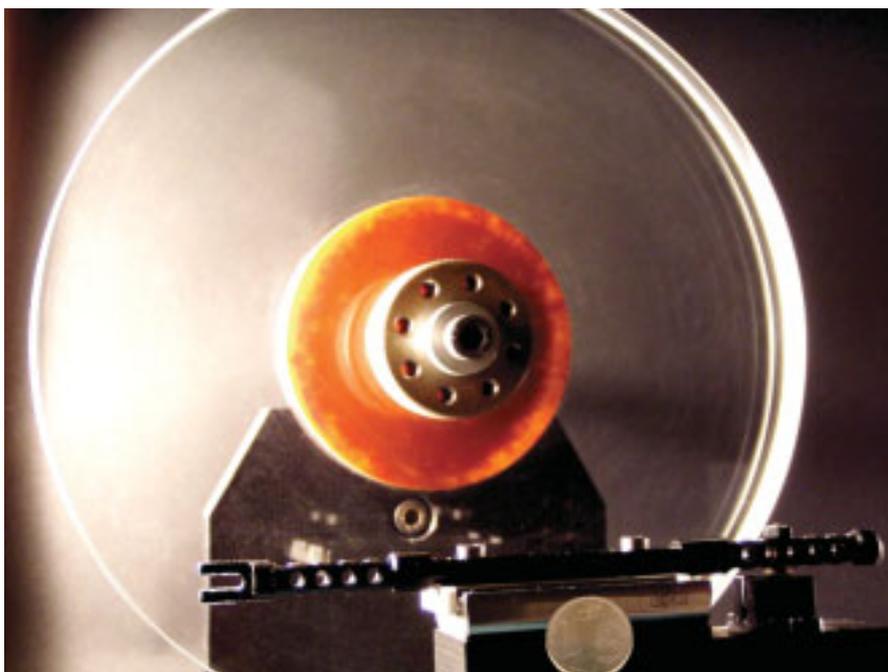


Bild 6: Rotierende Glasscheibe und Linearmotor mit Rechen zur Kalibrierung von LDAs (unten: 1-Cent-Stück zum Größenvergleich).

Kalibrierscheiben wird ein an einem Rechen angebrachter Messdraht linear durch das Messvolumen des LDAs bewegt. Die Bewegung des Rechens wird interferometrisch mit einer Auflösung von 2 nm erfasst. Der Rechen erlaubt das Kalibrieren in Messkammern bei einem Platzbedarf von nur wenigen Millimetern. Des weiteren ist die Kalibrierung von in Vorwärtsstreuung messenden LDAs möglich, die mittels einer rotierenden Glasscheibe nicht kalibriert werden können. Hauptanwendungsgebiet für dieses Kalibrierverfahren wird das optische Durchflussnormal für Hochdruck-Erdgas sein.

Für die Darstellung und Weitergabe der Einheit Strömungsgeschwindigkeit konnte der Anwendungsbereich der Windkanäle im Fachbereich *Gase* bis hinunter zu 0,2 m/s erweitert werden. Da unterhalb von 4 m/s die Messunsicherheit in Windkanälen stark zunimmt, werden mittlerweile LDAs gleichzeitig zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal als auch für die Regelung und Stabilisierung der Strömungsgeschwindigkeit während des Kalibriervorgangs verwendet.

## 1.5 Flüssigkeiten

Der Fachbereich *Flüssigkeiten* besteht aus den Arbeitsgruppen *Flüssigkeitsmessgeräte*, *Hydrodynamisches Prüffeld* und *TransfERNormale*.

Im Verantwortungsbereich des Fachbereichs liegen alle Messungen, die der Erfassung der Menge oder des Durchflusses von flüssigen Messgütern dienen. Flüssigkeiten im strömenden Zustand können im Bereich von einigen Litern pro Stunde bis hin zu 2100 Tonnen pro Stunde dargestellt werden. Der Messbereich ruhender Flüssigkeiten beginnt bei Volumina von einigen hundert Millilitern und erstreckt sich bis hin zu weit mehr als 50 000 m<sup>3</sup> für Mineralöl und dessen Produkte in Lager-tanks, wo zur Zeit gemeinsam mit Eichbehörden und Messgeräteherstellern intensive Forschungsarbeiten laufen, die insbesondere den zeitlichen Aufwand, die Kosten und die Belastungen für das Prüfpersonal senken sollen (Bild 7).

Im Bereich des gesetzlichen Messwesens stellt die Einführung der europäischen Messgeräterichtlinie MID eine besondere Herausforderung dar. Sie legt zwar mehr Verantwortung in die Hände der Hersteller, stellt aber insbesondere an die Flüssigkeitsmessgeräte auch neue messtechnische Anforderungen, die effektivere Testverfahren und Prüfeinrichtungen erfordern. In diesem Zusammenhang wurde ein Forschungsprojekt von PTB und Eichbehörden sehr erfolgreich abgeschlossen, in dem neben modernen Gerätschaften für die



Bild 7: Typischer Lagerbehälter für ruhende Flüssigkeiten (z. B. Mineralöle) mit einem Durchmesser von 23,0 m, einer Mantelhöhe von 15,6 m und einem Volumen von ca. 6 500 m<sup>3</sup>

Vor-Ort-Prüfung von Wohnungswasserzählern auch die zugehörigen Verfahrensabläufe und Bewertungskriterien entwickelt wurden. Eine neu gegründete internationale Arbeitsgruppe *Laseroptische Strömungsdiagnostik* beschäftigt sich mit der Verifizierung der Prüfanforderungen an Wasserzählern insbesondere bezüglich der zu fordernden Strömungsbedingungen am Einbauort der Prüflinge. Eine unter Beteiligung der PTB entwickelte technische Lösung zur praxisnahen Strömungsprofiluntersuchung wurde zum Patent angemeldet.

Für die Neuarbeitung der internationalen Empfehlung OIML R 80 „Road and rail tankers“ hat die PTB die Federführung übernommen. Zwei der insgesamt drei Teile dieser Empfehlung sind fertig gestellt. Wichtig war hier insbesondere die Einbindung und internationale Akzeptanz moderner, in Deutschland entwickelter Füllstandsverfahren für den mobilen Einsatz auf Tankwagen, die nicht nur die Effektivität und Mess-Sicherheit der Messungen, sondern vor allem auch die Manipulationssicherheit erhöhen.

Der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Aktivitäten des Fachbereichs konzentrierte sich auf Parameterstudien und -optimierungen am Hydrodynamischen Prüffeld (HDP). Dazu gehörten unter anderem auch Strömungsprofil- und Reproduzierbarkeits-Untersuchungen. Erstmals konnten Abhängigkeiten verschiedener Messgerätearten wie Turbinenrad-, Coriolis- und magnetisch-induktiver Wasserzähler von Druck und Temperatur im Bereich bis zu  $1 \cdot 10^{-5}$  aufgelöst werden. Entscheidende Bedeutung haben diese Untersuchungsergebnisse vor allem für die Bewertung von internationalen Schlüsselvergleichen auf dem Gebiet der Durchflussmessung.

## 1.6 Schall

Der Fachbereich *Schall* besteht aus den Arbeitsgruppen *Hörschall*, *Ultraschall* und der Arbeitsgruppe *Medizinische Akustik*.

Der Fachbereich *Schall* überdeckt mit seinen Aktivitäten den gesamten Frequenzbereich der mechanischen Schallwellen. Dabei stehen die Darstellung und Weitergabe der Einheit des Schalldrucks und der Schalleistung, Prüfungen, Kalibrierungen und Zulassungen sowie ein weiter Bereich von Forschungsaufgaben mit metrologischen, medizinischen und sicherheitsrelevanten Zielsetzungen im Mittelpunkt der Arbeit.

Viele Anwendungen auf dem Gebiet des technischen Ultraschalls beruhen auf der Schwingungskavitation, wobei das Spektrum von der Reinigung komplizierter Bauteile über Sonochemie und Abwasserbehandlung bis zu medizinischen Anwendungen reicht. Es wundert deshalb nicht, dass es oft keine Berührungspunkte der einzelnen Gebiete gibt und die Anwender kaum von einander wissen, obwohl sie sich mit ähnlichen Problemen beschäftigen. Deshalb richtete der Fachbereich *Schall* einen Workshop aus, der sich mit der quantitativen Beschreibung von Kavitationsvorgängen beschäftigte. 40 Teilnehmer aus den verschiedensten Bereichen nahmen teil und diskutierten bis weit in den Abend (Bild 8). Die Feed-back-Formulare, die am Ende ausgefüllt wurden, zeigten eine nahezu 100 %-ige Zufriedenheit aller Teilnehmer und forderten einstimmig eine Wiederholung der Veranstaltung im Jahr 2007.

Auf dem Gebiet der Kavitation wurde die Anwendung von faseroptischen Sensoren zur Bestimmung von Schallfeldparametern in kavitierenden Medien erprobt. Es stellte sich heraus, dass eine derart hohe Ortsauflösung



Bild 8: Teilnehmer des Workshops „Kavitation“

mit diesen ideal kleinen Sensoren ( $\varnothing$  der Faser und damit des Sensors  $125\ \mu\text{m}$ ) erreicht werden kann, dass sogar das „Geräusch“ einzelner Blasen das Gesamtsignal stark beeinflusst. Eine Anwendung in der Praxis könnte vor allem dort interessant sein, wo das Schallfeld und seine Wirkungen in sehr kleinen Räumen, z. B. einer Kanüle gemessen werden muss.

Ebenfalls neuen industriellen und gesellschaftlichen Erfordernissen wird mit der Erweiterung des Frequenzbereiches der Druckreziprozitätskalibrierung von Mikrofonen zu tiefen Frequenzen entsprochen, da Infraschall immer häufiger in das Zentrum der Aufmerksamkeit rückt, z. B. bei der Untersuchung von Windkraftanlagen. Der vorhandene Messplatz wurde durch Entwicklung einer neuen Software erweitert, so dass bis hinab zu 2 Hz gemessen werden kann. Es stellte sich aber heraus, dass neue Mikrofone bei diesen Frequenzen erst eingesetzt werden können, wenn der Frontring der Fassung mit Polierpapier geschliffen wurde, um ein vollständig dichtes Schließen des Kupplervolumens bei der Messung zu ermöglichen.

Eine Frequenzerweiterung zu hohen Frequenzen, über 40 MHz, ist im Ultraschall von Interesse, weil immer stärkere Geräte immer stärkere Nichtlinearitäten zeigen, die mit herkömmlichen Messtechniken nicht korrekt erfasst werden können. Um Hydrophone für hochfrequente Anwendung zur Verfügung zu stellen, wurde im Fachbereich *Schall* ein Membranhydrophon entwickelt, das bis 140 MHz eingesetzt werden kann (Bild s. Nachrichten des Jahres). Es zeigt bis 40 MHz einen nahezu glatten Frequenzgang und hat erst bei 105 MHz eine Resonanz. Solche Hydrophone eignen sich als Transferstandards für den Fachbereich, aber auch als Sensor z. B. in der allgemeinen Messpraxis eines Ultraschallgeräteherstellers.

### 1.7 Angewandte Akustik

Der Fachbereich *Angewandte Akustik* besteht aus den Arbeitsgruppen *Bauakustik*, *Geräuschmesstechnik* und *Wärmeleitung*.

Ein Höhepunkt für den Fachbereich war die 32. Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA '06), die gemeinsam mit dem *Institut für Angewandte Mechanik* der *TU Braunschweig* ausgerichtet wurde. Mit etwa 900 Teilnehmern, 360 Vorträgen und 32 Ausstellern sowie einem ansprechenden Rahmenprogramm (u. a. Besichtigung der Akustik-Entwicklung bei VW) stieß die Tagung auf große Resonanz.

Die Entwicklung von Messverfahren ist wesentliche Aufgabe der Arbeitsgruppe *Bauakustik*. Im letzten Jahr wurden hierbei Modelluntersuchungen zu Einflüssen bei der Schall-Längsdämmung, zur Dämpfung im Hochbau wie auch zu Abweichungen zwischen Labor- und Bauwerten durchgeführt. Der Anwendungsbereich der Modellmesstechnik wurde zudem durch die Erstellung eines Modellhallraums nennenswert erweitert. Außerdem wurden Unsicherheitsbudgets für bauakustische Messungen, für die Messung des Lärms am Arbeitsplatz wie auch für die Schallemission von Maschinen vorgeschlagen, die nahezu unverändert in die entsprechenden internationalen Normentwürfe übernommen wurden. Darüber hinaus nahm die Arbeitsgruppe an einem Ringversuch zur Schalldämmung von Verglasungen teil, und es wurde im Rahmen einer Kooperation mit der *Robert Bosch GmbH* eine Messtechnik entwickelt, um reflexionsarme Räume bis zu Frequenzen von 40 kHz qualifizieren zu können.

Schwerpunkt in der Geräuschmesstechnik sind Bauartzulassungen von Schallpegelmessgeräten, den wichtigsten Messgeräten zur Messung von Lärm. Für die mechanische Prüfung ist ein neuer Messplatz entwickelt und aufgebaut worden. Der elektrische Messplatz ist um eine neuartige Schnittstelle erweitert worden, über die Schallpegelmessgeräte automatisiert geprüft werden können. Das ist notwendig, da die elektrische Prüfung aus bis zu 10 000 Einzelprüfungen besteht. Ein weiteres wichtiges Arbeitsfeld ist die Kalibrierung von Mikrofonen im Freifeld. Hier sind unter anderem Sekundärmikrofonkalibrierungen mit schnellen Gleitsinussigna-

len, Einkanal-FFT Technik und Zweikanal-FFT Technik untersucht worden. Mit Hilfe einer Finite-Elemente-Methode sind Korrekturwerte zwischen Druck- und Freifeldkalibrierung bestimmt und mit experimentellen Werten verglichen worden.

In der Verfahrenstechnik gelten Nanoflüssigkeiten als potentielle Kandidaten für Arbeitsfluide mit verbesserter Wärmeleitfähigkeit. Zusammen mit der *Helmut-Schmidt-Universität*, Hamburg, wurden unterschiedliche Suspensionen metallischer Nanoteilchen untersucht. Die Ergebnisse haben indes die hohen Erwartungen noch nicht erfüllt. In der Energietechnik gilt Dieselöl als möglicher alternativer Treibstoff für Brennstoffzellen. Als Beitrag zu dessen Qualifizierung wurde die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dieselöle präzise gemessen. Energieeinsparungen sind insbesondere noch im Bauwesen zu erreichen. Zusammen mit dem *Fraunhofer-Institut für Holzforschung* wurde die Wärmeleitfähigkeit nachwachsender Rohstoffe als Wärmedämmung für Gebäude unter anderem mit einem neu entwickelten Messverfahren nachgewiesen. Die Lizenz zu diesem Verfahren wurde an einen Messgeräte-Hersteller abgegeben.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### **Forschungskooperation mit der Industrie auf dem Gebiet der 1-kg-Vakuum-Massekomparatoren**

Im Rahmen einer Forschungskooperation mit einem führenden Waagenhersteller sowie der *Technischen Universität Ilmenau* und dem *Internationalen Büro für Maß und Gewicht* (BIPM) wurde in der PTB ein neuer 1-kg-Vakuum-Massekomparator installiert. Erste Ergebnisse nach der Inbetriebnahme ergaben für den Massevergleich von 1-kg-Massenormalen aus Edelstahl Standardabweichungen von  $< 0,2 \mu\text{g}$  in Luft und  $< 0,1 \mu\text{g}$  im Vakuum. (M. Borys, FB 1.1, [michael.borys@ptb.de](mailto:michael.borys@ptb.de))

#### **Bestimmung der Winkelverteilung zurückgestreuter Teilchen am Ionenexperiment**

Um den Massenanteil der beim Experiment Ionenakkumulation durch die Eintrittsöffnung des Kollektors zurückgestreuten Teilchen zu ermitteln, wurde ein Monitor entwickelt, mit dem die Winkelverteilung von gespalteten und reflektierten Teilchen gemessen wurde. (Ch. Schlegel, FB 1.2, [christian.schlegel@ptb.de](mailto:christian.schlegel@ptb.de))

#### **Neue Methodik zur Charakterisierung von Beschleunigungsaufnehmern durch Parameteridentifikation validiert**

In einer Kooperation der Arbeitsgruppen 1.31 *Darstellung Beschleunigung* und 8.42 *Messdatenanalyse und Messunsicherheit* ist es gelungen, eine neue Methode zur Charakterisierung von Beschleunigungsaufnehmern für Anwendungen mit nicht-periodischen Signalen und für Anwendungen mit großen Beschleunigungsspitzenwerten zu validieren. (Th. Bruns, FB 1.3, [thomas.brunns@ptb.de](mailto:thomas.brunns@ptb.de))

#### **Vergleichsmessungen zwischen Primärnormalen für Hochdruck-Erdgas und atmosphärischer Luft**

Die Primärnormale für atmosphärische Luft und Hochdruck-Erdgas wurden mittels kritisch betriebenen Venturidüsen untereinander verglichen und das Verfahren wurde in einem Vergleich mit dem LNE und NIST verifiziert. (B. Mickan, FB 1.4, [bodo.mickan@ptb.de](mailto:bodo.mickan@ptb.de))

#### **Strömungsprofilmessungen im Hydrodynamischen Prüffeld**

Eine hohe Qualität eines Durchflussprüfstandes bestimmt sich nicht allein durch eine niedrige Messunsicherheit. Vielmehr gehören auch stabile und reproduzierbare Strömungsbedingungen am Einbauort des Prüflings dazu. Mit Hilfe einer speziell für einen solchen Zweck entwickelten LDA-Messeinheit wurden erste Profilmessungen im Hydrodynamischen Prüffeld durchgeführt. (G. Wendt, FB 1.5, [gudrun.wendt@ptb.de](mailto:gudrun.wendt@ptb.de))

#### **Untersuchungen zum Einfluss der Prozessbedingungen bei Vergleichs- und Anschlussmessungen mit industriellen Durchflussmessgeräten mit Hilfe des Hydrodynamischen Prüffelds der PTB**

Untersuchungen mit industriellen Durchflussmessgeräten am Hydrodynamischen Prüffeld (HDP) der PTB haben gezeigt, dass die häufig durchgeführten rechnerischen Korrekturen für die vor Ort herrschenden Prozessbedingungen (Medientemperatur, Prozessdruck) die Messabweichungen dieser Vergleichsmessgeräte nur unvollkommen kompensieren. Da im HDP der Einfluss der Prozessbedingungen experimentell ermittelt werden kann, stellt es ein unverzichtbares Bezugsnormale für den Anschluss von industriellen Durchfluss-Normalmessenrichtungen dar. (R. Engel, FB 1.5, [rainer.engel@ptb.de](mailto:rainer.engel@ptb.de))

#### **Breitbandige Referenzhydrophone für Ultraschall**

In der PTB entwickelte und hergestellte Membranhydrophone erlauben extrem breitbandige Schalldruckmessungen und den Vergleich von erweiterten Hydrophonalibrierverfahren. (V. Wilkens, FB 1.6, [volker.wilkens@ptb.de](mailto:volker.wilkens@ptb.de))

### **Berechnung der Freifeldkorrekturdaten von Mikrofonen mit der Methode der finiten Elemente**

Mit Hilfe einer Finite-Elemente-Methode sind Korrekturwerte zwischen Druck- und Freifeldkalibrierung bestimmt und mit experimentellen Werten verglichen worden. Dabei wurden die geometrischen Verhältnisse einer Freifeldreziprozitätskalibrierung zugrunde gelegt, bei der das Schallfeld von einer als Schallsender verwendeten Mikrofonmembran erzeugt wurde und der Schalldruck vor dem Empfangsmikrofon berechnet wurde. (I. Bork, FB 1.7, ingolf.bork@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Untersuchungen zur dynamischen Kalibrierung von Kraftaufnehmern im unteren Frequenzbereich mit kontinuierlichen und periodischen Kräften**

Im niederfrequenten Bereich von wenigen Hertz wurden Untersuchungen an Kraftmessgeräten in einer hydraulischen Kraftmessrichtung durchgeführt und es wurde gezeigt, dass hier Messunsicherheiten von einigen 0,01 % erreicht werden können. Um dies zu erreichen, wurden die Signalerfassung und Auswertung durch einen geeigneten Datenalgorithmus verbessert und auch der Biegemomenteneinfluss deutlich reduziert. (R. Kumme, FB 1.2, rolf.kumme@ptb.de, B. Glöckner, FB 1.2, bernd.gloeckner@ptb.de)

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

Präzisionskraftaufnehmer messen die Kraft als skalare Größe auf einer durch die Aufnehmerbauform vorgegebenen Achse. In einem Forschungsvorhaben sollen nun Aufnehmer entwickelt werden, die eine Messung des räumlichen Kraftvektors zulassen. Die PTB entwickelt dabei Kalibrierverfahren für die neuartige Messtechnik. (F. Tegtmeier, FB 1.2, falk.tegtmeier@ptb.de)

### **Alternative Kalibriermethode für Laser-Doppler-Anemometer**

Es wird ein neues, miniaturisiertes Kalibrierverfahren für Laser-Doppler-Anemometer vorgestellt, das den Zugang an beengten Messorten erlaubt. Dabei wird ein an einem Rechen angebrachter Platindraht linear durch das Messvolumen bewegt. Die Bewegung des Rechens wird interferometrisch aufgezeichnet. (V. Strunck, FB 1.4, volker.strunck@ptb.de)

### **Messung von Schallfeldern in kavitierenden Medien mit Hilfe eines optischen Faser-spitzen-Hydrophons**

Zur Bestimmung des Schallfeldes in einem Ultraschallreinigungsgerät wurde eine faser-optische Messtechnik eingesetzt. (Ch. Koch, FB 1.6, ultrasonics@ptb.de)

### **Neues Kurzzeitmessverfahren für die Wärmeleitfähigkeit**

Im August 2005 ist das erste auf der Grundlage eines PTB-Patentes hergestellte Wärmeleitfähigkeitsmessgerät auf den europäischen Markt gekommen. Es bietet bei einer mit herkömmlichen Geräten vergleichbaren Messunsicherheit stark verkürzte Messzeit, eine vereinfachte Probenpräparation und, wegen des unkomplizierten Aufbaus, ein günstigeres Preis-Leistungsverhältnis. (U. Hammerschmidt, FB 1.7, ulf.hammerschmidt@ptb.de)

### **Untersuchung des Einflusses der Hohlraumbedämpfung auf die Schalldämmung bei abgehängten Decken**

Die Messung der Längs-Schalldämmung bei Gebäudestrukturen mit abgehängter Unterdecke wird normgemäß mit einer veränderten Absorberanordnung im Hohlraum ausgeführt. Diese Anordnung und weitere Einflüsse wurden experimentell mittels Modellprüfständen überprüft. (M. Schmelzer, FB 1.7, martin.schmelzer@ptb.de)

### **Messtechnik zur Überprüfung akustischer Freifeldbedingungen bei Frequenzen bis 40 kHz**

Mit einer in der PTB entwickelten Messtechnik wurde das Vorliegen von akustischen Freifeldbedingungen in einem speziell errichteten Messraum bei Frequenzen bis 40 kHz nachgewiesen. (V. Wittstock, FB 1.7, volker.wittstock@ptb.de)

### **Modellhallraum bei Frequenzen bis zu 40 kHz**

Der neue Modellhallraum ermöglicht Absorptionsgrad- und Schallleistungsbestimmungen im Diffusfeld für Frequenzen bis zu 40 kHz und stellt somit eine wesentliche Erweiterung der Messmöglichkeiten dar. (V. Wittstock, FB 1.7, volker.wittstock@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Neues Gasdruck-Messverfahren für Kaliber .22 Long Rifle**

In der *Ständigen Internationalen Kommission für die Prüfung von Handfeuerwaffen* (CIP) soll die Umstellung auf das piezo-elektrische Gasdruck-Messverfahren an kleinvolumiger Munition abgeschlossen werden. Da die Umstellung wegen bislang unbefriedigender Messergebnisse noch nicht möglich war, wurde in der PTB ein neues Verfahren mit deutlich besseren Ergebnissen entwickelt, das zur Zeit in den Mitgliedsstaaten der CIP geprüft wird. (E. Franke, FB 1.3, ernst.franke@ptb.de)

#### **Erweiterter Geschwindigkeitsbereich bei Windkanalmessungen**

Durch technisch erweiterten Einsatz von Laser-Doppler-Anemometern konnte der nutzbare Geschwindigkeitsbereich für die Kalibrierung von konventionellen Anemometern in Windkanälen im Bereich kleiner Geschwindigkeiten erweitert werden. (H. Müller, FB 1.4, harald.mueller@ptb.de)

#### **Neuartiges laseroptisches Verfahren zur Messung großer Lagertanks in Form stehender Zylinder**

Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes von PTB, Eichbehörden und Industrie wurden Untersuchungen zur Eignung eines neuartigen Verfahrens auf der Basis eines Laserscanners für die berührungslose Bestimmung des Volumens großer Lagertanks erfolgreich durchgeführt. (G. Wendt, FB 1.5, gudrun.wendt@ptb.de)

### **PTB veranstaltet Workshop zur Schwingungskavitation bei Ultraschallanregung**

Am 17. und 18. 11. 2005 fand in der PTB der Workshop „Kavitation: Beschreibung, Quantifizierung und Standardisierung für praktische Anwendungen“ unter dem – sicherlich etwas provokanten – Motto „Alle verwenden Kavitation, aber keiner versteht sie richtig“ statt. 40 Teilnehmer aus Hochschulen, Forschungsinstituten und von Herstellern aus ganz Deutschland diskutierten 2 Tage intensiv über Grundlagen und Anwendungen dieses so komplizierten und vielschichtigen Prozesses. (Ch. Koch, FB 1.6, ultrasonics@ptb.de)

#### **Automatische elektrische Prüfung von Schallpegelmessgeräten**

Für die elektrische Prüfung von Schallpegelmessgeräten ist ein neuer, automatisierter Messplatz mit einer neuartigen Schnittstelle zwischen Messplatz und Schallpegelmessgerät entwickelt worden. Es werden so 25 verschiedene Messgrößen überprüft, wobei Schalldruckpegel zwischen 10 dB und 150 dB verwendet werden. (D. Ratschko, FB 1.7, dirk.ratschko@ptb.de)

#### **Messplatz zur Prüfung des Einflusses mechanischer Schwingungen auf Schallpegelmessungen**

Zur Überprüfung der Schwingempfindlichkeit von Schallpegelmessgeräten wurde ein Messaufbau eingerichtet, bei dem gleichzeitig zwei gleichartige Schallpegelmessgeräten einem Schallfeld konstanter Frequenz ausgesetzt werden und der Einfluss überprüft wird. (I. Bork, FB 1.7, ingolf.bork@ptb.de)

#### **Unsicherheiten bauakustischer Einzahlwerte**

Die Unsicherheit bauakustischer Einzahlwerte wird durch nicht vorhersagbare Korrelationseffekte beeinflusst. Für die Praxis wird daher empfohlen, entweder einen Maximalwert der Unsicherheit unter Annahme voller Korrelation zu berechnen oder aber gemittelte Unsicherheiten aus Ringversuchen als Schätzwert für die Unsicherheit zu verwenden. (V. Wittstock, FB 1.7, volker.wittstock@ptb.de)

## Internationale Angelegenheiten

### Internationale Vergleichsmessungen zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Massenormalen

Vergleichsmessungen der CCM-Arbeitsgruppe „Mass standards“ zur Bestimmung der magnetischen Suszeptibilität und der Magnetisierung von 1-kg-Massenormalen unter Beteiligung von 17 Staatsinstituten wurden erfolgreich durchgeführt. (F. Scholz, FB 1.1, frank.scholz@ptb.de)

### Drehmoment-TransfERNormal zeigt hervorragende Stabilität bei key comparison

Der erste internationale Schlüsselvergleich (key comparison) CCM.T-K1 auf dem Gebiet des Drehmomentes unter Federführung der PTB (Pilotlabor) wurde im Juli 2006 abgeschlossen. Derzeit erfolgt die Auswertung der Ergebnisse und die Vorbereitung des Abschlussberichts. Bereits jetzt kann berichtet werden, dass einer der verwendeten Transferaufnehmer eine hervorragende Reproduzierbarkeit in der Größenordnung von  $10^{-6}$  gezeigt hat. (D. Röske, FB 1.2, dirk.roeske@ptb.de)

### Erster europäischer Schlüsselvergleich für die Messgröße Beschleunigung (EUROMET.AUV.V-K1) unter Federführung der PTB erfolgreich beendet

Der erste europäische Schlüsselvergleich für Beschleunigung hatte das Ziel, die Messergebnisse einer großen Zahl europäischer Metrologieinstitute mit denen der Teilnehmer des CCAUV.V-K1 vergleichbar zu machen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Vergleichswerte (degrees of equivalence) für alle Teilnehmer im Rahmen der Messunsicherheiten kompatibel sind. (Th. Bruns, FB 1.3, thomas.bruns@ptb.de)

### CIPM-Schlüsselvergleiche für Gase bis 40 bar abgeschlossen und veröffentlicht

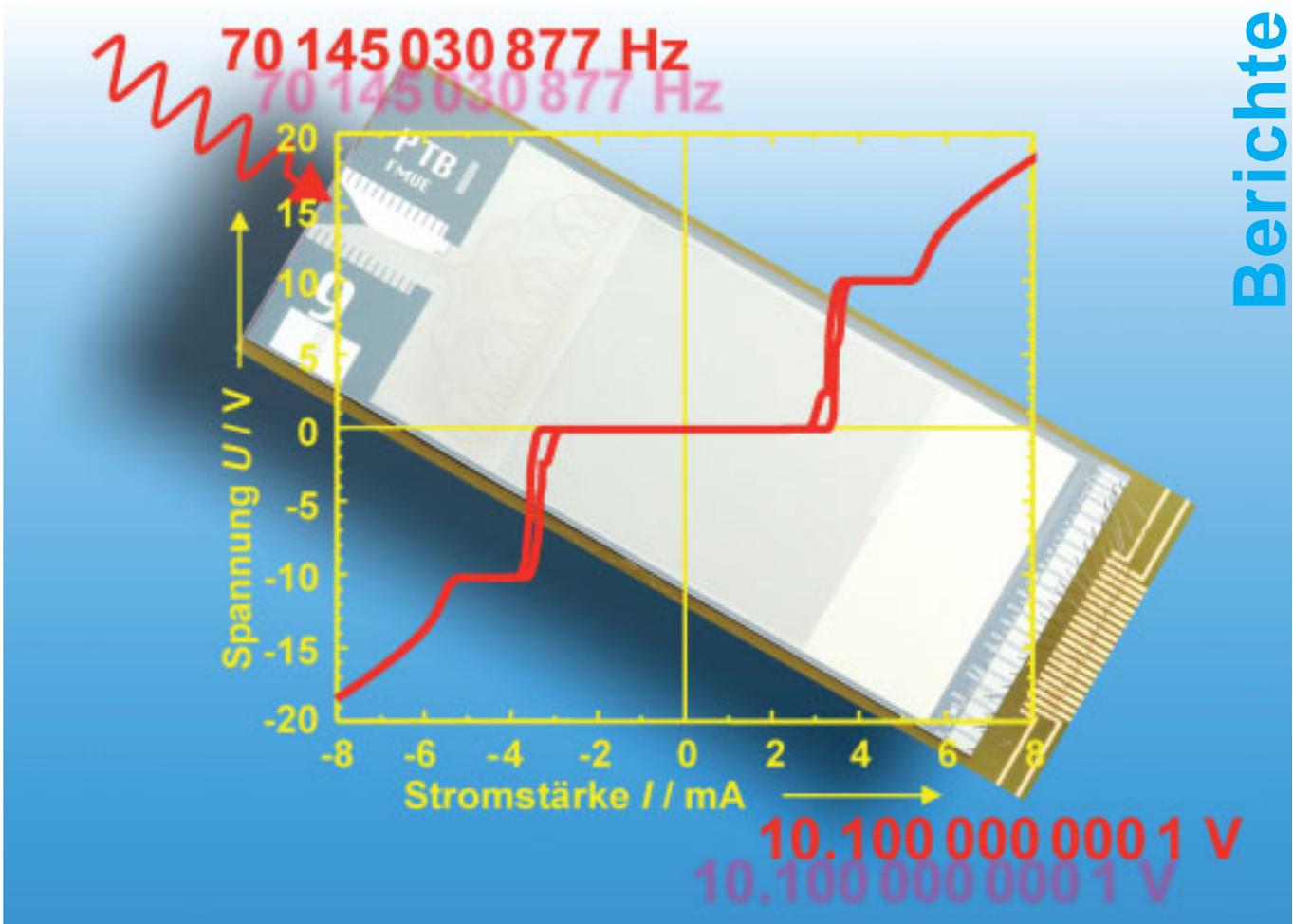
Die erfolgreich durchgeführten CIPM-Schlüsselvergleiche für Erdgas unter Hochdruckbedingungen haben die Identität des harmonisierten europäischen Referenzwertes mit dem BIPM-Referenzwert dokumentiert. (D. Dopheide, FB 1.4, dietrich.dopheide@ptb.de)

### Key Comparison bestätigt Spitzenstellung des Pipettenprüfstandes

Die PTB hat sich am CIPM Key Comparison CCM.FF-K4 beteiligt und die Volumina von drei 20-Liter-Edelstahl-Pipetten bestimmt. Die erzielten Messunsicherheitswerte von  $< 2 \cdot 10^{-5}$  und insbesondere die sehr kleinen Abweichungen der gemessenen Volumina, im Mittel  $1 \cdot 10^{-6}$ , von den jeweiligen „Key Comparison Reference Values“ (KCRV) unterstreichen die Spitzenstellung des PTB-Pipettenprüfstandes. (H. Többen, FB 1.5, helmut.toebben@ptb.de)



# Elektrizität



# Elektrizität

Das Jahr 2006 war für die Abteilung *Elektrizität* geprägt durch gute Fortschritte in wichtigen Bereichen ihrer Forschung und verstärkte internationale Aktivitäten.

Mit der Herstellung funktionsfähiger 10-V-Schaltungen (s. Nachricht des Jahres) ist ein Durchbruch gelungen, der den programmierbaren Josephson-Reihenschaltungen neue Anwendungsbereiche eröffnen wird. Mit ihrem Einsatz für ein Leistungsnormal auf der Grundlage programmierbarer Spannungsnormale und für ein Quantenvoltmeter zur Signalabtastung wird dieser Weg zielführend beschritten.

Für die europäische Messgeräte-richtlinie endete die Übergangsfrist im Herbst 2006. Die Abteilung hat rechtzeitig die notwendigen Schritte unternommen, um im europäischen Wettbewerb bestehen zu können. Die weitere Entwicklung im gesetzlichen Messwesen hängt stark von der derzeitigen Überarbeitung des Eichgesetzes ab.

Nachfolgend werden die wichtigsten Entwicklungen der Abteilung vorgestellt, geordnet nach den Geschäftsbereichen der PTB.

## Grundlagen der Metrologie

Zunehmendes Interesse an hochgenauen AC-Spannungen hat zur Entwicklung von programmierbaren Josephson-Reihenschaltungen geführt. Reihenschaltungen aus überdämpften Josephson-Kontakten mit einer binären Teilung für Spannungen bis 1 V werden bereits jetzt für verschiedene Anwendungen im Frequenzbereich bis etwa 1 kHz eingesetzt. Zur weiteren Reduzierung der relativen Messunsicherheiten ist die Erhöhung der Ausgangsspannung auf 10 V notwendig. Hierfür muss die Anzahl der Josephson-Kontakte von ca. 8000 bei 1-V-Schaltungen auf etwa 70 000 erhöht werden. Trotz der gewaltigen technologischen Herausforderungen aufgrund der großen Zahl von Kontakten konnten nun weltweit erstmals funktionsfähige 10-V-Schaltungen hergestellt werden (Bild 1). Erstmals wurde auch ein direkter Vergleich dieser 10-V-Spannung mit der 10-V-Spannung eines konventionellen SIS-Josephson-Spannungsnormals durchgeführt. Bei diesem Vergleich konnte eine Übereinstimmung der beiden Spannungen auf besser als 2 nV (rel. Abweichung  $2 \cdot 10^{-10}$ ) gezeigt werden. Die einwandfreie Funktionalität der Schaltung ist damit nachgewiesen.

### Titelbild

Durchbruch: Dank eines neuen Designs und der Optimierung verschiedener Technologieschritte ist es gelungen, programmierbare Josephson-Spannungsnormale in SINIS-Technologie mit einer Ausgangsspannung von 10 V herzustellen. Die Schaltung enthält annähernd 70 000 Josephson-Kontakte, die in 128 parallelen Zweigen angeordnet sind (s. a. Rubrik: Nachrichten des Jahres)

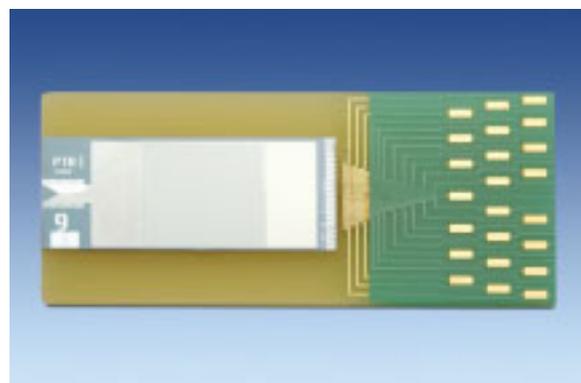


Bild1:

Photo einer programmierbaren 10-V-Schaltung in SINIS-Technologie mit etwa 70000 Josephson-Kontakten

Die neuen 10-V-SINIS-Schaltungen sind für die Wechselspannungssynthese und -messung auch bei höheren Spannungen hervorragend geeignet. Angesteuert werden sie mit einer am NPL entwickelten schnellen Stromquelle. Diese musste für diesen Einsatzzweck mit einer in der PTB entwickelten kompakten Verstärkerschaltung modifiziert werden, um die maximale Ausgangsspannung der einzelnen Kanalmodule heraufzusetzen. Eine synthetisierte Sinuskurve mit einer Frequenz von 16 Hz, 32 Stützwerten pro Periode und einer Amplitude von 10 Volt ist in Bild 2 gezeigt.

Erste Messungen mit 1-V-Arrays haben gezeigt, dass ein programmierbares Josephson-Spannungsnormale mit dem Primärnormal der PTB für die elektrische Leistung verknüpft werden kann. Dieses nutzt ein Abtastverfahren mit einem kommerziellen Voltmeter, um Spannung und Stromstärke phasengetreu zu erfassen. Die vom Josephson-Spannungsnormale erzeugten Wechselspannungen ermöglichen nun eine kontinuierliche „in-situ“ Kalibrierung des Abtastvoltmeters. Damit kann der dominierende Beitrag zur Unsicherheit bei der Bestimmung der elektrischen Leistung unter Rückführung auf ein Quantennormale deutlich reduziert werden. Die neuen 10-V-Arrays werden hier zu einer weiteren Reduzierung der Unsicherheit führen. Ein weiterer Anwendungsbereich für die neuen 10-V-Arrays sind so genannte Abtast-Quantenvoltmeter. Dabei wird eine Wechselspannung mit einer programmierbaren Josephson-Spannung kompensiert und die

resultierende Differenzspannung mit einem Abtastvoltmeter gemessen, allerdings, und das ist entscheidend, in einem Messbereich des Voltmeters mit höherer Auflösung. In einem ersten Test wurde die Differenzspannung zweier Josephson-Normale gemessen. Dabei wurde unterhalb von 400 Hz eine 10-fach geringere Unsicherheit als mit den herkömmlichen Abtastverfahren erreicht.

Zur Erzeugung hochgenauer Wechselspannungen für höhere Frequenzen werden Reihenschaltungen mit überdämpften Josephson-Kontakten benötigt, die mit einer Pulsfolge anstelle einer Mikrowelle mit fester Frequenz betrieben werden. Die Ausgangsspannung eines solchen Josephson Arbitrary Waveform Synthesizers (JAWS) ergibt sich aus der zeitlichen Folge der einzelnen Pulse. Die Josephson-Schaltungen und der gesamte Messaufbau müssen möglichst breitbandig für Frequenzen von DC bis 25 GHz ausgelegt sein, um den einwandfreien Betrieb zu gewährleisten. Ein relativ einfacher Betrieb des JAWS wird durch kompakte Schaltungen ermöglicht, die kurz gegenüber den typischen Wellenlängen des Frequenzspektrums der eingestrahltten Pulsfolge sind. Um hohe Ausgangsspannungen erzeugen zu können, müssen in der zur Verfügung stehenden Leitungslänge von typischerweise 1,5 mm möglichst viele Josephson-Kontakte integriert werden. Besonders geeignet hierfür sind SNS-Kontakte, die wegen ihrer hohen Stromdichten auch bei Abmessungen von unter 1  $\mu\text{m}$  ausreichend breite Stufen konstanter Spannung aufweisen. Mit solchen Schaltungen

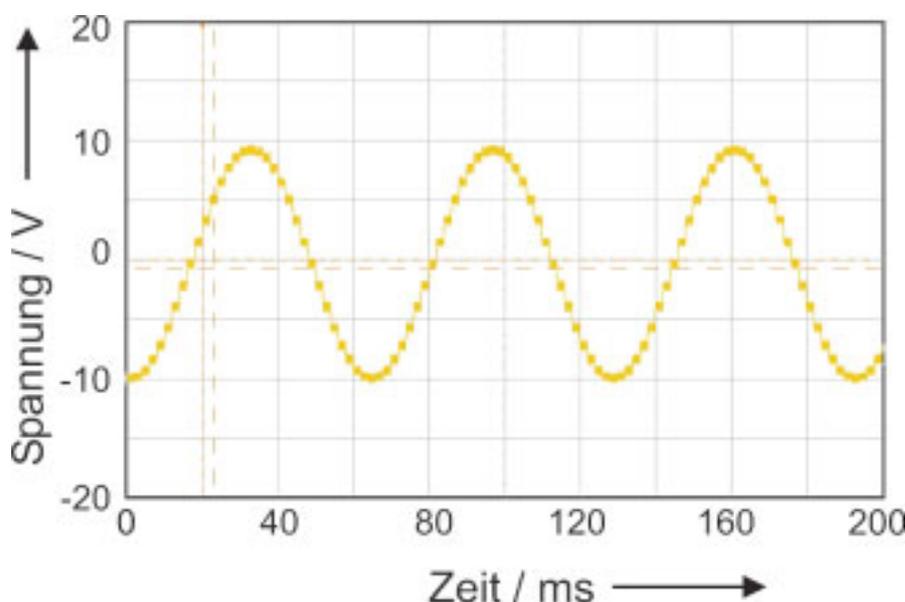


Bild 2: Synthetisierte Sinuskurve mit einer Frequenz von 16 Hz, 32 Stützwerten pro Periode und einer Amplitude von 10 V

gen aus 2560 Kontakten in einem fünffach-Mäander konnten Spannungen bis zu 60 mV erzeugt werden.

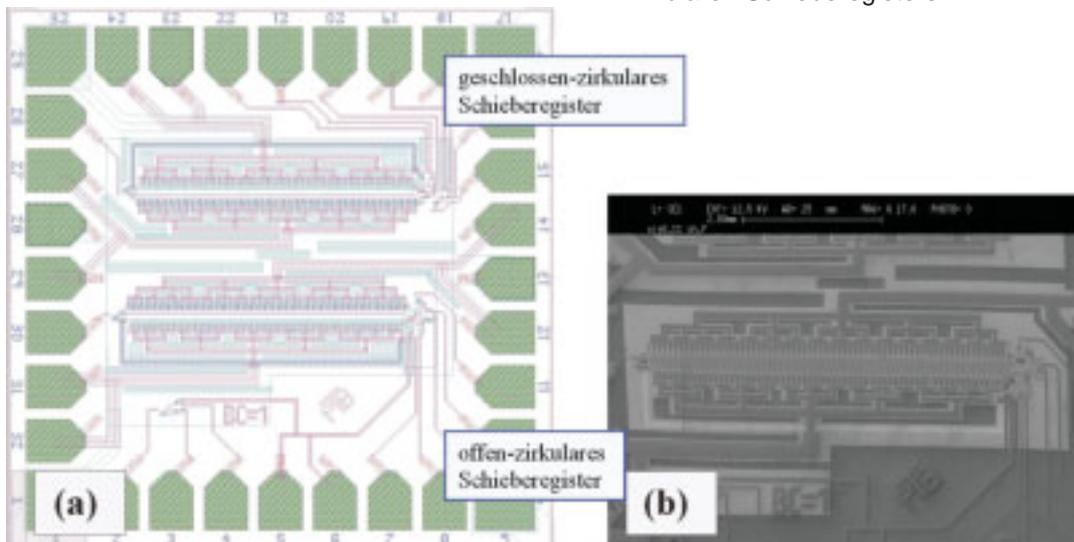
Für einen Synthesizer beliebiger Wechselsignale wurden komplexe zirkulare RSFQ-Schieberegisterschaltungen entwickelt. Diese dienen als lokale Speicher für einen RSFQ-Bitmuster-generator zur Erzeugung definierter binärer Sequenzen von Spannungspulsen. Mit diesen Pulsen können, auf der Basis supraleitender Logik bei anschließender Verstärkung durch einen Halbleiterverstärker, Josephson-Reihenschaltungen phasengenau angesteuert werden. Bild 3 zeigt auf der linken Seite das Layout zweier 128-Bit Schieberegister in geschlossen-zirkularer (oben) und offen-zirkularer Konfiguration (unten), sowie auf der rechten Seite das Foto eines hergestellten 128-Bit geschlossen-zirkularen Registers.

Supraleitende Schaltkreise, die auf kleinen Josephson-Tunnelkontakten und dem Tunneln einzelner Cooper-Paare basieren, sind vielversprechende Kandidaten für gezielt manipulierbare quantenmechanische Zweizustands-Systeme, sogenannte Quantenbits (Qubits). Ihre Wirkungsweise als Qubit beruht auf der kohärenten Superposition von makroskopischen Quantenzuständen, wobei allerdings das Tunneln ungepaarter Elektronen stochastisch und instantan den Ladungszustand und damit den Arbeitspunkt des Qubits ändert. Überdies ist diese sogenannte Quasiteilchen-Vergiftung eine Ursache der Dekohärenz des Qubits. Es wurden Quasiteilchen-Übergänge in einem Ladungs-Phasen-Qubit untersucht, das aus einer supralei-

tenden Schleife gebildet wird, die durch zwei Josephson-Kontakte mit einer dazwischen liegenden kleinen Insel, einen so genannten Bloch-Transistor, unterbrochen wird. Mit Hilfe einer Steuerelektrode kann die Ladung der Insel manipuliert und durch ein äußeres Magnetfeld die Phase der quantenmechanischen Wellenfunktion beeinflusst werden. Solch ein Qubit-System erlaubt ein dispersives Auslesen der effektiven Josephson-Induktivität des Qubits. Als Ergebnis wurde die erwartete  $2e$ -Periodizität in Abhängigkeit von der Gate-Ladung des Bloch-Transistors beobachtet, die man für das Cooper-Paar-Tunneln in den Grundzustand des Qubits erwartet. Andererseits wurden bei bestimmten Werten des äußeren magnetischen Flusses  $F_{dc}$  und oberhalb einer bestimmten Anregungsschwelle wiederholte Quasiteilchen-Anregungen des Qubits in das angeregte Band beobachtet, die durch äußere Mikrowellen-Be-strahlung verstärkt wurden. Die durchgeführten Messungen erlauben Rückschlüsse auf die Dynamik von Quasiteilchen-Anregungen und zeigen möglicherweise einen Weg zur Lösung des Problems der Paritäts-Verletzung in supraleitenden Schaltungen.

Quantenzustände reagieren unvorstellbar empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen. Um festkörperbasierte Quantenbits mit der „äußeren Welt“ zu verbinden, bieten sich Rapid Single Flux Quantum (RSFQ)-Logik-

Bild 3: 128-Bit RSFQ-Schieberegisterschaltungen links: Chiplayout mit einem geschlossen-zirkularen Schieberegister (oben) und einem offen-zirkularen Schieberegister (unten) rechts: Foto eines in der PTB hergestellten offen-zirkularen Schieberegisters



schaltungen als effizientes Interface zur Quanteninformationsverarbeitung zwischen den Quanten- und klassischen Bereichen supraleitender Qubit-Schaltungsarchitekturen an. Die Integration von RSFQ-Schaltungen und Josephson-Qubits erfordert die Implementierung der RSFQ-Logik mit nicht-standardmäßig verwendeten Parametern. Es wurden neuartige Schaltungsstrukturen entwickelt, die in integrierten RSFQ-Qubit-Schaltungsanwendungen die Kontrolle und Manipulation von Quantenzuständen in Flux-Qubits gestatten. Die Gesamtschaltungen wurden in der PTB entwickelt und auf Rauschärmigkeit optimiert.

Der Cooper-Paar-Soliton-Transport und Bloch-Oszillationen wurden an einer langen Reihenschaltung aus kleinen supraleitenden Al/AIOx/Al-Tunnelkontakten untersucht. Die bei tiefen Temperaturen gemessenen Strom-Spannungskennlinien zeigen einen Bereich im negativen differentiellen Widerstand, der auf die Anwesenheit und Dominanz der sogenannten Bloch-Oszillationen hindeutet. Aufgrund des fundamentalen Strom-Frequenz-Verhältnisses  $I = 2ef$  könnten solche Oszillationen für den Aufbau einer quantisierten Stromquelle metrologisch relevant sein. Im Vergleich zu einzelnen Tunnelkontakten sind in langen Reihenschaltungen wesentlich größere Oszillationsamplituden der Spannung und ein ähnlich breiter Frequenzbereich von bis zu einigen GHz zu erwarten.

Mit Hilfe akustischer Oberflächenwellen lassen sich einzelne Elektronen mit hoher Taktrate von einigen GHz durch Halbleiterquantenpunkte pumpen. Dieser Effekt wird in der PTB im Hinblick auf ein zukünftiges Stromnormal untersucht. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde jetzt auch der durch Oberflächenwellen getriebene Transport durch gekoppelte Halbleiterquantenpunkte betrachtet. Solche gekoppelten Quantenpunkte werden auch als künstliche Moleküle bezeichnet. Bei diesen Untersuchungen zeigten sich erste Hinweise auf einen neuartigen physikalischen Effekt, das so genannte adiabatische Pumpen. Dabei kann es in der Nähe der Resonanz der Energieniveaus der beiden gekoppelten Quantenpunkte zu verstärktem Stromtransport kommen. Für einen Spezialfall des adiabatischen Pumpens, das so ge-

nannte quanten-adiabatische Pumpen, sagen theoretische Untersuchungen außerdem eine verringerte Unsicherheit des gepumpten Stromes voraus.

Die Erzeugung von Strömen in Halbleiterstrukturen unter Verwendung von rein optischen Methoden hat in den letzten Jahren viel Beachtung gefunden. Dies liegt insbesondere daran, dass mit solchen Techniken relativ einfach spin-polarisierte Ströme und reine Spinströme erzeugt werden können, was eine Grundvoraussetzung für das neue Forschungsgebiet der Spintronik ist. Im einfachsten Fall werden hierzu spezielle Halbleiterstrukturen mit einem optischen Strahl resonant angeregt und der Strom wird durch nichtlineare optische Effekte höherer Ordnung injiziert. Durch Änderung der Polarisation des Anregungsstrahls ist es möglich, die Ströme abzuschalten bzw. sogar umzukehren. In der PTB ist es nun gelungen, solche Ströme durch Anregung von speziellen Resonanzübergängen, so genannten Exzitonen, zu erzeugen. Im Gegensatz zu freien Ladungsträgern sind Exzitonen durch Coulomb-Wechselwirkung gebundene, neutrale Elektron-Loch Paare. Für das Experiment wurden spezielle Halbleiternanostrukturen eigens in der PTB hergestellt und mit einem Femtosekundenlaser resonant angeregt. Der Nachweis der Ströme erfolgte über die von den Strömen emittierte Terahertzstrahlung, die mittels optoelektronischer Techniken detektiert wurde.

Zinkoxid ist ein vielversprechendes Material für optoelektronische Schaltungen. Um Nanodrähte aus Zinkoxid elektrisch charakterisieren zu können, wurde ein Verfahren entwickelt, statistisch verteilte Nanodrähte mittels Elektronenstrahlolithographie und eines Aufdampfprozesses zu kontaktieren. Als Substrat wurden thermisch oxidierte Siliziumwafer verwendet, auf denen in einem ersten Schritt Justiermarken aufgebracht wurden. Auf diese Wafer wurden die ZnO-Nanodrähte aus einer Ethanol-Lösung abgeschieden. Diese Proben mit zufällig angeordneten Nanodrähten wurden anschließend im Rasterelektronenmikroskop abgebildet und die so erstellten Aufnahmen wurden als Grundlage für die individuelle Kontaktierung der einzelnen Drähte genommen (Bild 4). In ersten Experimenten konnten so kontaktierte Nanodrähte elektrisch charakterisiert werden.

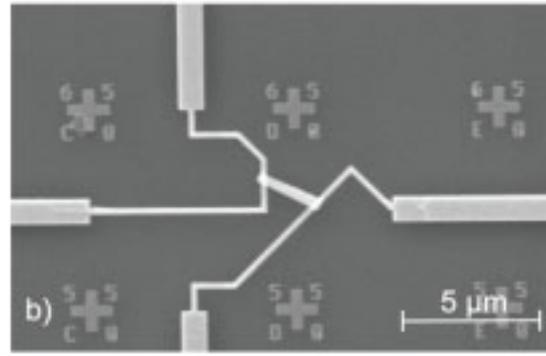
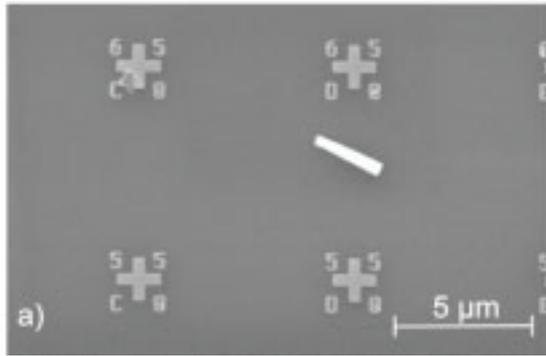


Bild 4:  
Nanodraht vor (a) und nach (b) der Kontaktierung

### Metrologie für die Wirtschaft

Die Arbeiten auf dem Gebiet des Wechselspannungs-Gleichspannungs-Transfers konzentrierten sich im Berichtsjahr auf eine Erweiterung des Werte- und Frequenzbereichs. Mikropotentiometer werden zur rückführbaren Erzeugung kleiner Wechselspannungen bei der Kalibrierung von Messgeräten eingesetzt. Da vielfach die Ausgangsimpedanz des Mikropotentiometers nicht vernachlässigbar klein gegenüber der Eingangsimpedanz des nachgeschalteten Messgerätes ist, müssen Korrekturen angebracht werden, die die Messunsicherheit der Kalibrierung vergrößern. Eine Möglichkeit zur Verringerung des Ausgangswiderstandes und damit auch des Korrektoreinflusses ist ein mit einer höheren Stromstärke betriebenes Mikropotentiometer. Die dafür erforderlichen Wechselstrom-Shunts mit geringer Frequenz- und vernachlässigbarer Stromabhängigkeit sind seit einiger Zeit verfügbar. Da planare Thermokonverter über einen weiten Strombereich betrieben werden können, kann der benötigte Spannungsbereich von 100 mV bis 100  $\mu$ V mit nur drei Mikropotentiometern abgedeckt werden. Wegen ihres kapazitäts- und verlustarmen Aufbaues eignen sich Dünnschicht-Thermokonverter auf Quarzsubstrat auch für höhere Frequenzen bis über 100 MHz. Um die guten Hochfrequenzeigenschaften dieser Thermokonverter voll auszunutzen, wurde eine neue Anschlusstechnik entwickelt, die auf einer im Gehäuse integrierten planaren T-Verzweigung auf einer Leiterplatte beruht. Dabei wird der Konverter-Chip in eine Aussparung der

Leiterplatte geklebt und direkt auf die Leiterplatte gebondet (Bild 5). Auf diese Weise lassen sich die Messunsicherheiten gegenüber den bisher eingesetzten Einzelkonvertern durch den Einsatz von Vielfachkonvertern auf Quarzsubstrat deutlich verringern.

Die Arbeiten an dem auf synchroner Signalerzeugung und -abtastung beruhenden Primärnormal für die elektrische Wechselleistung sind mit Untersuchungen zur Messunsicherheit, der Effektivwertbestimmung mit AC/DC-Transfer sowie einem Vergleich von synchronen, quasi-synchronen und asynchronen Abtastmethoden zu einem Abschluss gebracht worden. Mit Hilfe dieser Maßnahmen konnte die Messunsicherheit weiter verringert werden und erreicht jetzt einen Wert von etwa 1 mW/VA, bei Frequenzen von 40 Hz bis 65 Hz und Stromstärken bzw. Spannungen von 5 A und 120 V. Dies dürfte die Grenze des mit klassischer Analog- und Digitaltechnik Erreichbaren darstellen. Eine weitere Reduzierung der Messunsicherheiten wird erst durch den Einsatz von Josephson-Spannungsnormalen zu erwarten sein. Weitergeführt werden die Arbeiten zur Bestimmung von Spannung, Stromstärke und Leistung bei verzerrten Kurvenformen. Moderne Prüfgeräte für die Wechselleistungsmesstechnik sind in der Lage, komplexe Signale zu erzeugen und zahlreiche Signalverläufe nach der IEC-Norm zur Netzqualität zu erzeugen. Wegen der wirtschaftlichen Bedeutung ist die Rückführung von Netzqualität-Parametern eine wichtige Aufgabe der PTB. Mit Hilfe des Primärnormals für die elektrische Leistung können Harmonische, Flicker, fluktuierende

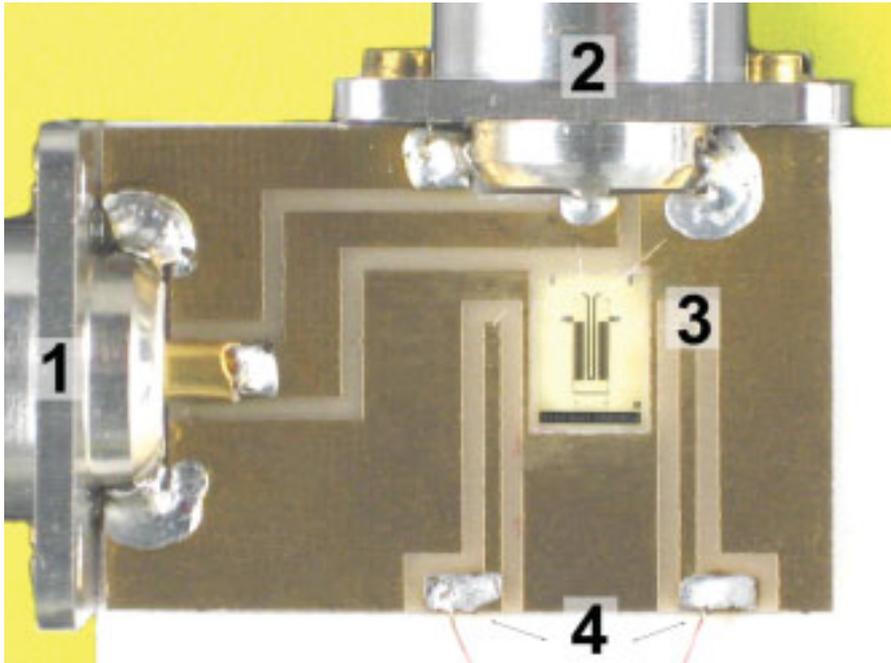


Bild 5:  
Aufbau der Quarz-Vielfachthermokonverter für hohe Frequenzen:  
1 Anschluss zur Spannungszuführung,  
2 Anschluss für Vergleichsnormal,  
3 Konverter-Chip,  
4 Anschlüsse zur Messung der Thermospannung des Konverters

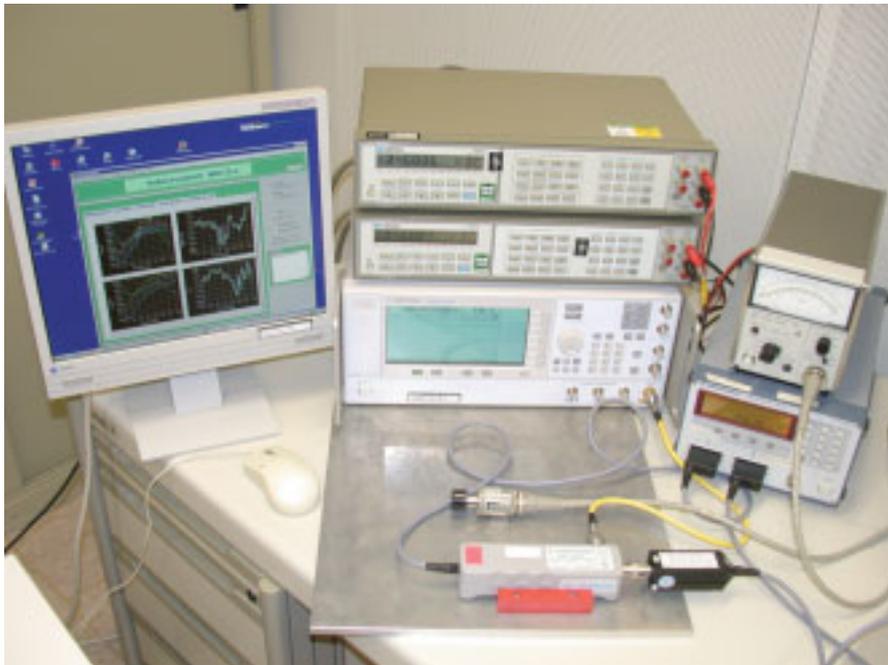


Bild 6:  
Vollautomatischer 18-GHz-Messplatz für die Bestimmung des Kalibrierungsfaktors von Thermistornormalen, thermischen Leistungsmessern und Diodenleistungsmessköpfen

Harmonische und Interharmonische mit relativen Messunsicherheiten bis herab zu einigen  $10^{-6}$  bestimmt werden.

In der Hochfrequenz-Leistungsmesstechnik wird die Kalibrierung von thermischen und Dioden-Leistungsmessköpfen, durch deren Einsatz die Leistungsmessung in industriellen Anwendungen fast vollständig abgedeckt wird, durch direkten Vergleich (Außenvergleich) mit Thermistor-Leistungsnormalen durchgeführt, wobei letztere extrem aufwändig und zeitintensiv in Mikrokalorimetern

durch Bestimmung des effektiven Wirkungsgrades kalibriert werden. Der Außenvergleich stellt dafür eine kostengünstige und effiziente Alternative unter Inkaufnahme nur geringfügig größerer Messunsicherheiten dar. Der in der PTB neuentwickelte Messplatz für den Außenvergleich (Bild 6) ermöglicht die Bestimmung des Kalibrierungsfaktors von Thermistornormalen bis 18 GHz. Messwert-erfassung, -darstellung und -verarbeitung sowie die Bestimmung der Messunsicherheit erfolgen voll automatisiert.

Die in der Mikrowellen- und Höchsthfrequenztechnik häufig eingesetzten koplanaren Wellenleiter weisen aufgrund der endlichen Leitfähigkeit der metallischen Leiterbahnen eine ausgeprägte Frequenzabhängigkeit des Leitungswellenwiderstandes auf. Werden diese Wellenleiter als Kalibriernormale für On-Wafer-Kalibrierungen eingesetzt, ist eine genaue Kenntnis des Leitungswellenwiderstandes erforderlich. Zu dessen Berechnung ist die Messung der Ausbreitungskonstanten und des Kapazitätsbelags ausreichend. Während die Messung der Ausbreitungskonstanten mit hoher Genauigkeit möglich ist, stellt die genaue Bestimmung des Kapazitätsbelags immer noch eine Herausforderung dar. In Zusammenarbeit mit der Universität Hannover wurden zwei verschiedene Messverfahren zur Bestimmung des Kapazitätsbelags planarer Wellenleiter auf verlustarmen Substraten miteinander verglichen und zur Charakterisierung kommerzieller Kalibriersubstrate angewandt. Die Kenntnis des Kapazitätsbelags koplanarer Wellenleiter auf kommerziellen Kalibriersubstraten erlaubt erstmals die Anwendung hochgenauer Kalibrierverfahren wie z. B. Multiline-TRL zur Messung von On-Wafer-Streuparametern.

Bei der Kalibrierung der Anstiegszeit schneller Speicheroszilloskope konnten weitere Fortschritte erzielt werden. Um den zeitlichen Verlauf von Pikosekunden-Spannungsimpulsen zu messen, die sich auf koplanaren Leiterbahnstrukturen ausbreiten, nutzt man gewöhnlich den Pockels-Effekt, den bestimmte elektro-optische Materialien zeigen. Hierbei wird ein externer elektro-optischer Kristall auf die Leiterbahn aufgesetzt, was allerdings zur Folge hat, dass die Ausbreitungskonstante der Wellenleitung verändert wird und zusätzlich Reflektionen an den Grenzflächen auftreten. Als Konsequenz wird der Spannungsimpuls verzerrt. In der PTB ist es nun gelungen, diesen Einfluss experimentell zu bestimmen und den Spannungsimpuls rechnerisch zu korrigieren. Damit kann die Messunsicherheit bei der Anstiegszeitbestimmung von ultraschnellen Sampling-Oszilloskopen weiter verringert werden. Während bisher ausschließlich die aufwändige Kalibrierung am optoelektronischen Primärnormal durchgeführt werden konnte, steht jetzt auch ein Pulsgenerator als Sekundärnormal zur Verfügung, der für Frequenzen bis 50 GHz mit

etwas größerer Messunsicherheit als Sekundärnormal eingesetzt werden kann. Damit können neben Oszilloskopen mit externen Samplingmessköpfen jetzt auch kompakte Geräte kalibriert werden.

Ein in der PTB entwickeltes und patentiertes Verfahren zur ballistischen Bitansteuerung erlaubt es, magnetische Speicherchips (MRAM) mit sehr hohen Taktraten im GHz-Bereich zu betreiben. In weiterführenden theoretischen Untersuchungen konnte nun gezeigt werden, dass die ballistische Bitansteuerung nicht nur ein schnelles Programmieren der MRAM-Zellen ermöglicht, sondern auch eine große Fehlertoleranz gegenüber den Programmierpulsen aufweist. Diese große Toleranz gegenüber Variationen der Pulsparameter ist ein entscheidender Faktor für die industrielle Anwendung der Methode. Ein kürzlich aufgebauter Messplatz ermöglicht es, die ultraschnelle Dynamik der magnetischen Speicherzellen bis zu Frequenzen von 20 GHz zu messen.

### Metrologie für die Gesellschaft

Im August fand der erste Spatenstich zum Bau des Referenz-Freifeldmessplatzes statt. Auf dem Gelände der PTB entsteht ein europaweit einzigartiges 50 m x 60 m großes Messfeld, das zur Kalibrierung von Antennen und zur Durchführung von Emissionsmessungen im Rahmen der Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit dienen soll. In einem Forschungsverbund aus dem *Institut für EMV* und dem *Institut für Straßenwesen* der TU Braunschweig, der *Grillo AG* sowie der PTB wurde ein völlig neues Konzept des Aufbaus entworfen und intensiv im Labor getestet. Der mechanische Aufbau der Messfläche besteht aus einem visko-elastischen Spezial-Asphalt, der mit einer dünnen Metallschicht aus aufgesprühtem Zink mit Kunststoff-Beschichtung bedeckt ist. Zuvor waren die optimale Lage und Größe, die Ausführung der Randbereiche sowie Einflüsse der Umgebung des Freifeldes mit Hilfe numerischer Feldberechnungen ermittelt worden. Die Asphaltsschicht wird noch in diesem Jahr erstellt, im nächsten Jahr erfolgt die Beschichtung des Messfeldes mit einer aufgesprühten Zinkschicht, die bei den Messungen als metallischer Reflektor dienen wird.

Vor dem Hintergrund, dass sich einige Fahrzeugwaagen bei gleichzeitigem Betrieb eines Mobiltelefons oder eines Handsprechfunkgerätes als störanfällig erwiesen haben, wurden Vor-Ort-Messungen der elektromagnetischen Verträglichkeit einzelner Waagen durchgeführt. In Anbetracht der so gewonnenen Erfahrungen wurde mit der Entwicklung eines Vor-Ort-Prüfverfahrens begonnen, das in Zukunft den zuständigen Eichbehörden zur Verfügung gestellt werden soll. Dazu wird derzeit eine portable Signalquelle entwickelt, die es erlaubt, das zu prüfende System bei verschiedenen Frequenzen mit hochfrequenten elektromagnetischen Wellen zu beaufschlagen, wie sie typischerweise als elektromagnetische Felder in der Umwelt vorkommen.

Die Frage, ob hochfrequente elektromagnetische Wellen über ihre thermische Wirkung hinaus schädliche Auswirkungen auf biologische Systeme haben, wird nach wie vor kontrovers diskutiert. Da in den entsprechenden Experimenten die elektromagnetischen Felder oft nur unzureichend charakterisiert sind, wurden in Zusammenarbeit mit dem Strahlenbiologischen Institut der *Ludwig-Maximilians-Universität* in München erste Versuche zur Feldexposition biologischer Proben in einer  $\mu$ TEM-Zelle durchgeführt und mit Hilfe eines detaillierten Computermodells des Versuchsaufbaus (Bild 7) die spezifische Absorptions-

rate der Proben bestimmt. Weitere Untersuchungen zur Klärung der Frage, wie z. B. im Mobilfunk eingesetzte Hochfrequenzfelder auf biologische Proben wirken, sind in nächster Zukunft geplant.

### Internationale Angelegenheiten

Im Geschäftsbereich *Internationale Angelegenheiten* war die Abteilung im Berichtsjahr vor allen Dingen auf dem Gebiet internationaler Vergleiche sowie bei der Erstellung des spezifischen Programms *Elektrizität und Magnetismus* für das *Europäische Forschungsprogramm für Metrologie (EMRP)* aktiv.

Im vergangenen Jahr wurden 6 internationale Vergleiche abgeschlossen, an denen sich die Abteilung beteiligt hat, für 2 Vergleiche fungierte die PTB als Pilotlabor. 45 Vergleiche, an denen die Abteilung zum großen Teil beteiligt ist, laufen zurzeit noch. Hervorzuheben sind drei Pilotstudien, die als Vorläufer für künftige Vergleiche die prinzipielle Möglichkeit von Vergleichsmessungen oder die Eignung von Transfornormalen testen.

Ein Pilotvergleich über die Messung der Anstiegszeit eines 50-GHz-Sampling-Oszilloskops, den die PTB mit dem *National Physical Laboratory (NPL)*, UK, erfolgreich durchgeführt hat, diente der Überprüfung der in der PTB und im NPL vorgehaltenen optoelektro-

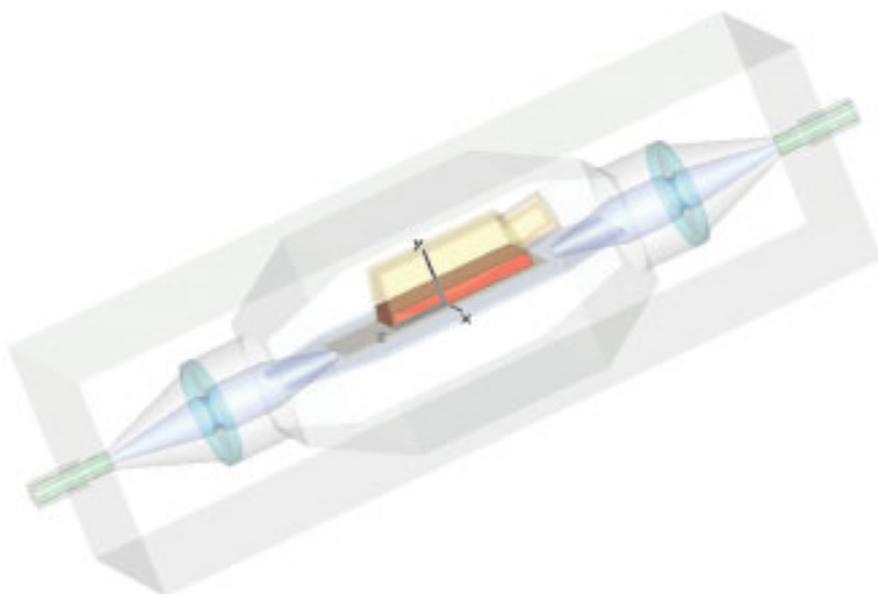


Bild 7:  
3D-Computermodell zur Berechnung der Feldverteilung bzw. der spezifischen Absorptionsrate (SAR) innerhalb des in rot dargestellten Nährfluids. Die Zellekultur ist als Monolayer auf dem Objektträger einer nahezu gleichmäßig verteilten SAR ausgesetzt, da das umgebende Fluid für eine Homogenisierung der eingetragenen Leistung im Mittelteil des Objektträgers sorgt

nischen Messaufbauten, die zur genauen Bestimmung der Anstiegszeit von ultraschnellen Sampling-Oszilloskopen verwendet werden. Die dabei erzielte sehr gute Übereinstimmung validiert zum einen die Messverfahren und schafft andererseits die Basis für einen nachfolgenden Vergleich, an dem sich auch andere Nationale Metrologieinstitute beteiligen können.

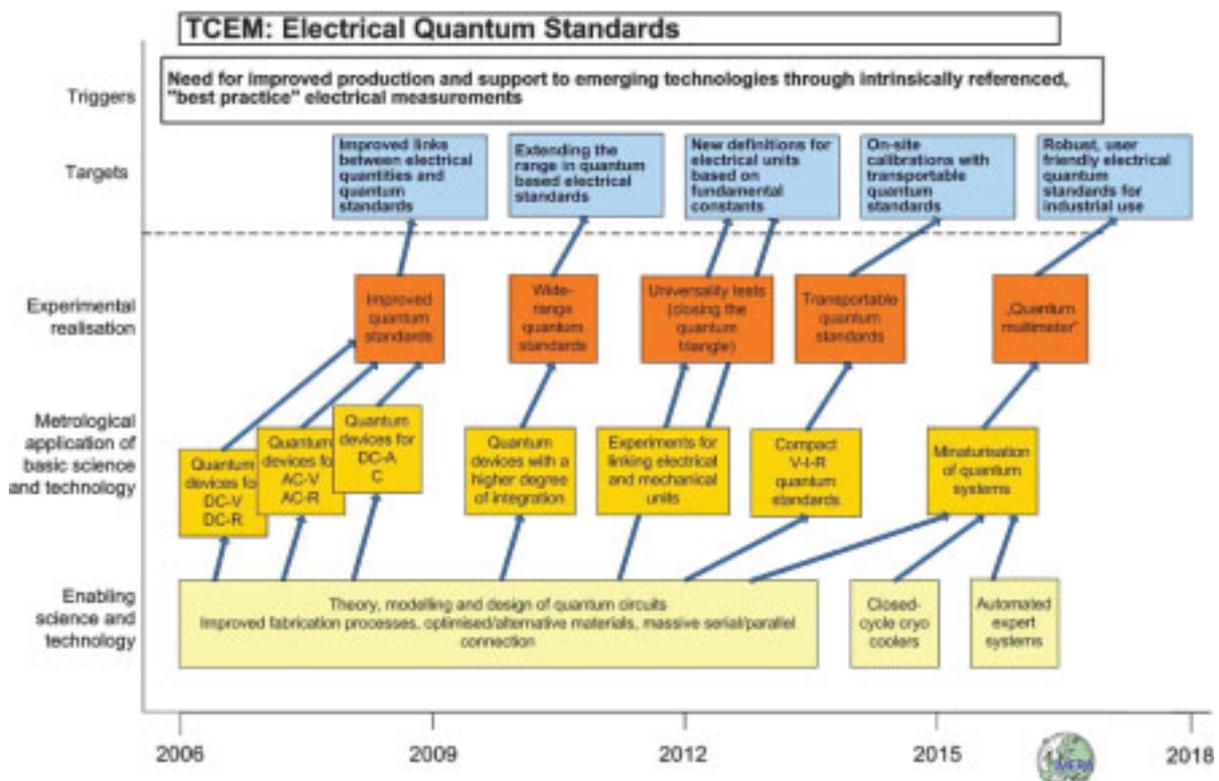
Das vom *Laboratoire National d'Essais (LNE)*, Frankreich, vorgeschlagene Projekt *Study and Validation of Quantum Hall Array Resistance Standards* dient der Überprüfung, inwieweit sich diese Schaltungen als Quantenwiderstandsnormale in einem weiten Wertebereich eignen. In dem Projekt, an dem sich 7 Nationale Metrologieinstitute beteiligen, werden am LNE und in der PTB hergestellte Reihen- und Parallelschaltungen auf ihre Eignung als Transferrnormale untersucht.

In einer von *National Research Council (NRC)*, Kanada, mit der PTB durchgeführten Pilotstudie ging es um die Messung der elektrischen Leistung bei verzerrten Kurvenformen. Diese

Messungen sind von zunehmender Bedeutung, da der Oberschwingungsgehalt der Netze infolge nichtlinearer Verbraucher ständig zunimmt und entsprechende Prüfgeräte rückgeführt kalibriert werden müssen. Das positive Ergebnis dieser Studie hat dazu geführt, dass im kommenden Jahr ein Schlüsselvergleich auf diesem Gebiet begonnen wird.

Die Abteilung sieht in dem *Europäischen Forschungsprogramm für Metrologie* eine große Chance für ihre zukünftige Entwicklung. Durch den Vorsitz im *Technical Committee for Electricity and Magnetism* von EUROMET konnte die Abteilung bei der bisherigen Entwicklung des EMRP sowie den im Zusammenhang damit entwickelten *Roadmaps* eine wichtige Rolle spielen und ihre Vorstellungen weitgehend durchsetzen. Die Abteilung ist darüber hinaus Pilotlabor für das erste aktive *Joint Research Project* von EUROMET, und die Einrichtungen des Reinraumzentrums zur Herstellung supraleitender und halbleitender Strukturen wurden in die Liste der EUROMET *Special Facilities* aufgenommen.

Bild 8: Die im Rahmen des Europäischen Forschungsprogramms für Metrologie erstellte *Roadmap* „*Electrical Quantum Standards*“



Für den Bereich *Elektrizität und Magnetismus* wurden die folgenden fünf *Roadmaps* (Bild 8) aufgestellt, die sich mit dem zukünftigen Arbeitsprogramm der Abteilung weitgehend decken:

- *Power and Energy*
- *Electronic characterisation of structures down to nanoscale*
- *Electrical Quantum Standards*
- *Electromagnetic Measurements in Industrial, Environmental, Security, Medical and Safety Applications*
- *Information and Communication Technology*

Diese Themen finden sich auch sämtlich im fachspezifischem Teil des EMRP wieder. Darüber hinaus ist der Bereich *Elektrizität und Magnetismus* auch in den Kapiteln *Fundamental Grand Challenges* und *Global Issues* des EMRP verankert. Bei der Aufstellung der *Roadmaps* wurde auf enge Verbindungen zum siebenten Rahmenprogramm der EU geachtet, das durch die in den *Roadmaps* behandelten Themen von Seiten der Metrologie unterstützt werden soll.

Zusätzlich ist die Abteilung in zwei europäischen Projekten engagiert, die für die zukünftige Umsetzung des EMRP Modellcharakter haben. In Kooperation mit den französischen und britischen Metrologieinstituten LNE und NPL ist im Rahmen eines *Quick Start Proposals* eine Echtzeit-Kontrolleinheit entwickelt worden, die das Einstellen beliebiger, quantengenaue Spannungen innerhalb von etwa  $100 \mu\text{s}$  erlaubt (Bild 9). Damit kann beispielsweise die zeitliche Spannungsänderung in der dynamischen Phase eines Wattwaagen-Experiments mit hoher Präzision verfolgt werden. Zurzeit werden die Grenzen des Systems bestimmt, das auch für andere Anwendungen sehr nützlich sein dürfte, bei denen das Messen oder Regeln dynamischer Spannungen mit höchster Präzision erforderlich ist.

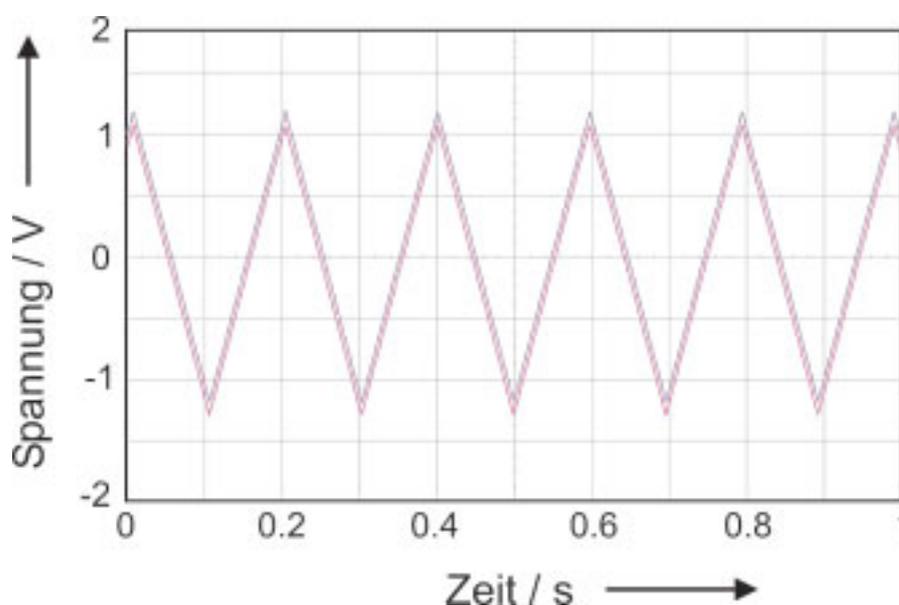


Bild 9:  
„Verfolgtes“ 5 Hz-  
Dreiecksignal und Aus-  
gangsspannung des  
Josephson-Arrays (zur  
besseren Übersicht um  
100 mV nach unten  
verschoben)

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Zirkulare 128-Bit RSFQ-Schieberegister für Synthesizer beliebiger AC-Wellenformen

Auf der Basis komplexer zirkularer Schieberegister in supraleitender Rapid Single Flux Quantum (RSFQ)-Logik wurden lokale Speicher-Module für einen Synthesizer beliebiger AC-Wellenformen realisiert. Die Register wurden auf einer neuen Entwurfsplattform unter Cadence mit eigens angepassten RSFQ-Erweiterungen optimiert und hergestellt; korrekte Funktionalität wurde mit einer Bitlänge von 128-Bit experimentell nachgewiesen. (M. Khabipov, FB 2.4, [marat.khabipov@ptb.de](mailto:marat.khabipov@ptb.de))

#### Flussquanten-Phasenschieber für integrierte RSFQ-Qubit-Schaltungsanwendungen

Es wurde ein neues Konzept für Rapid Single Flux Quantum (RSFQ)-Schaltungen mit integrierten Phasenschieberelementen auf der Basis supraleitender Schleifen mit eingefangenen Einzelflussquanten realisiert und in Toggle-Flipflop-Schaltungen erfolgreich getestet. Die neuen Elemente ermöglichen einen kompakten Schaltungsaufbau, wodurch sie sich insbesondere zur Integration in Josephson Qubit-Architekturen eignen. (D. Balachov, FB 2.4, [dmitri.balachov@ptb.de](mailto:dmitri.balachov@ptb.de))

#### Rauscharme RSFQ-Schaltungen zur Steuerung und zum Auslesen von Flux-Qubits

Zur Kontrolle von Qubit-Zuständen in integrierten Schaltungsanwendungen wurden Rapid Single Flux Quantum (RSFQ)-Schaltungen entwickelt, auf Rauscharmut optimiert und erfolgreich getestet. In den Schaltungen spielen Toggle-Flipflops eine Schlüsselrolle, durch deren Beschaltung das Ausgangsrauschen der Schaltung vernachlässigbar klein gehalten werden kann. (M. Khabipov, FB 2.4, [marat.khabipov@ptb.de](mailto:marat.khabipov@ptb.de))

#### SNS-Schaltungen für den Josephson-Synthesizer

Kompakte Schaltungen mit bis zu 2560 SNS-Josephson-Kontakten für den Einsatz im Josephson-Synthesizer wurden entwickelt und hergestellt. Bei Einstrahlung geeigneter Pulsfolgen lassen sich reine (d. h. extrem oberwellenarme) Wechselspannungen erzeugen.

(J. Kohlmann, FB 2.4, [johannes.kohlmann@ptb.de](mailto:johannes.kohlmann@ptb.de))

#### Programmierbare 10-V-SINIS-Schaltungen für AC-Anwendungen

Programmierbare 10-V-Schaltungen aus etwa 70 000 SINIS-Josephson-Kontakten wurden erfolgreich hergestellt und für erste AC-Anwendungen eingesetzt. In einem weltweit erstmalig durchgeführten direkten Vergleich einer programmierbaren 10-V-Schaltung mit einem konventionellen 10-V-Josephson-Spannungsnormalelement konnte die einwandfreie Funktionalität der Schaltung eindrucksvoll belegt werden. (F. Müller, FB 2.4, [franz.mueller@ptb.de](mailto:franz.mueller@ptb.de))

#### Zweidimensionale Gitterstrukturen für organische Festkörperlaser

Um die Schwellenergie für die Lasertätigkeit abzusenken, wurden im Rahmen eines BMBF-Projektes 2-dimensionale Gitterstrukturen entworfen und hergestellt. Dabei handelt es sich um wabenförmige, hexagonale, quadratische und zirkulare Resonatorstrukturen mit Dimensionen von 200 nm bis 500 nm, die den Projektpartnern zu Verfügung gestellt wurden. (T. Weimann, FB 2.4, [thomas.weimann@ptb.de](mailto:thomas.weimann@ptb.de))

#### Kontaktierung von ZnO-Nanodrähten

Zinkoxid (ZnO) ist ein vielversprechendes Material für optoelektronische Schaltungen. Um Nanodrähte aus ZnO elektrisch charakterisieren zu können, wurde ein Verfahren entwickelt, statistisch verteilte Nanodrähte mittels Elektronenstrahlolithographie und eines Aufdampfprozesses zu kontaktieren. (T. Weimann, FB 2.4, [thomas.weimann@ptb.de](mailto:thomas.weimann@ptb.de))

#### Quasiteilchen-Untersuchungen in supraleitenden Qubit-Schaltungen

In Aluminium-Proben wurde die erwünschte 2e-periodische Abhängigkeit von der Gate-Ladung des Bloch-Transistors gefunden, wie man sie für das Cooper-Paar-Tunneln in den Grundzustand eines Quantenbits erwartet. Die Messungen erlauben Rückschlüsse über die Dynamik von Quasiteilchen-Anregungen und zeigen möglicherweise einen Weg zur Lösung des Problems der Paritäts-Verletzung.

in supraleitenden Schaltungen. (J. Könemann, FB 2.4, jens.koenemann@ptb.de)

#### **Bloch-Induktivität in Josephson-Kontakten niedriger Kapazität**

Wir zeigen, dass die elektrische Impedanz eines kleinen Josephson-Tunnelkontakts sowohl die  $2e$ -periodische Kapazität als auch die  $2e$ -periodische Bloch-Induktanz einschließt (Theorie). (A. Zorin, FB 2.4, alexander.zorin@ptb.de)

#### **Cooper-Paar-Soliton-Transport und Bloch-Oszillationen in einer Reihenschaltung aus kleinen supraleitenden Al/AlO<sub>x</sub>/Al-Tunnelkontakten**

Untersucht werden elektrische Transport-eigenschaften eines langen Josephson-Junction-Arrays mit kleinen Tunnelkontakten mit hoch-ohmigen Chrom-Vorwiderständen. (S. Lotkhov, FB 2.4, sergei.lotkhov@ptb.de)

#### **Nanostrukturierte Einzelelektronen-Pumpe auf Quarzglassubstrat**

Eine 5-Kontakt-Aluminium-SET-Pumpe wurde auf Substratmaterial mit kleinerer dielektrischer Konstante hergestellt. (S. Lotkhov, FB 2.4, sergei.lotkhov@ptb.de)

#### **Kombinierte magnetkraftmikroskopische und magnetooptische Untersuchungen an künstlichen Zweiphasenmagneten**

In Zusammenarbeit mit der Universität Göttingen wurden die magnetischen Eigenschaften von lithographisch hergestellten hartmagnetischen CoPt-Quadraten untersucht, die in eine weichmagnetische Permalloy-Matrix eingebettet sind. Solche künstlichen Zweiphasenmagnete sind ein Modellsystem für eine Vielzahl technologisch interessanter mehrphasiger magnetischer Materialien und bieten die Möglichkeit, die magnetischen Eigenschaften gezielt zu beeinflussen. Mit magnetkraftmikroskopischen und magnetooptischen Abbildungstechniken wurde eine langreichweitig geordnete Domänenstruktur in der Permalloy-Matrix beobachtet. (S. Sievers, FB 2.5, sibylle.sievers@ptb.de)

#### **Zweidimensionale Halbleiter-Doppelschichten für kompakte Quanten-Hall-Widerstandsnormale**

Mit dem Ziel, die Integrationsdichte von parallelgeschalteten Quanten-Hall-Widerstandsnormale zu erhöhen, wurden erste Tests an speziellen Halbleiter-Proben vorgenommen, die zwei übereinander liegende elektrische Transportkanäle enthalten. (K. Pierz, FB 2.5, klaus.pierz@ptb.de)

#### **Hochfrequenter Einzelelektronentransport durch gekoppelte Quantenpunkte**

Experimente zum Pumpen einzelner Elektronen durch künstliche Moleküle mit Hilfe akustischer Oberflächenwellen weisen auf neuartige physikalische Effekte hin. (B. Kästner, FB 2.5, bernd.kaestner@ptb.de)

#### **Rein optische Erzeugung ultrakurzer Stromimpulse in Halbleiterstrukturen unter Ausnutzung spezieller Resonanzübergänge**

In bestimmten Halbleiterstrukturen wurden durch Anregung spezieller Resonanzübergänge mittels eines Femtosekundenlasers ultrakurze Stromimpulse injiziert. Diese rein optisch generierten Ströme können durch Änderung der Polarisation des optischen Anregungsstrahls umgekehrt bzw. abgeschaltet werden. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

#### **Erster erfolgreicher Test einer Wechselspannungssynthese mit programmierbaren 10 V Josephson Schaltungen**

Binär geteilte 10 V Josephson Reihenschaltungen mit 70 000 Kontakten sind weiter entwickelt worden. Mit deutlich verbesserten Parametern sind sie jetzt für die Wechselspannungssynthese und -messung hervorragend geeignet. (R. Behr, FB 2.6, ralf.behr@ptb.de)

#### **Entwicklung einer Echtzeit-Kontrolleinheit für programmierbare Josephson-Schaltungen (iMERA Quickstart Projekt)**

In Kooperation mit den französischen und britischen Metrologieinstituten LNE und NPL ist eine Echtzeit-Kontrolleinheit entwickelt worden, die das Einstellen beliebiger, quantengenaue Spannungen innerhalb von etwa 100  $\mu$ s erlaubt. Damit kann die zeitliche Spannungsänderung in der dynamischen Phase eines Wattwaagen-Experiments mit hoher Präzision verfolgt werden. (R. Behr, FB 2.6, ralf.behr@ptb.de)

### **Verbessertes Primärnormal für elektrische Leistung mit programmierbaren Josephson-Spannungsnormalen**

Die Einbindung von programmierbaren Josephson-Arrays in das Primärnormal für elektrische Leistung verringert die Unsicherheit und verkürzt die Rückführbarkeitskette. (L. Palafox, FB 2.3, luis.palafox@ptb.de)

### **Erster erfolgreicher Test eines Abtast-Quantenvoltmeters**

Eine neuartige, differentielle Messmethode zur Kalibrierung von periodischen Wechselspannungssignalen ist erfolgreich getestet worden. Das „Abtast-Quantenvoltmeter“ basiert auf einer synchron synthetisierten Wellenform einer programmierbaren Josephson-Schaltung. In einem ersten Test wurde die Differenzspannung zweier Josephson-Wellenformen bei  $\pm 1,2$  V für Frequenzen bis 5 kHz im Abtastverfahren gemessen. Dabei wurde unterhalb 400 Hz eine 10fach geringere Unsicherheit als bei herkömmlichen Abtastverfahren erreicht. (R. Behr, FB 2.6, ralf.behr@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Wechselstrom-Messwiderstände als Mikropotentiometer für Kalibrierungen im Millivolt-Bereich**

Mikropotentiometer werden zur rückführbaren Erzeugung kleiner Wechselspannungen bei der Kalibrierung von Messgeräten eingesetzt. Zu hohe Ausgangswiderstände vieler Mikropotentiometer erfordern jedoch Korrekturen, die in der Regel die Messunsicherheit erhöhen. Dies vermeiden neuartige Mikropotentiometer, deren Ausgangsimpedanz um einen Faktor 100 kleiner ist als bisher üblich. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

#### **Neue Wechselspannungs-Gleichspannungs-Transferrnormale für den Frequenzbereich bis 100 MHz**

In der PTB bereits früher entwickelte berechenbare Dünnschicht-Thermokonverter auf Quarzsubstrat hatten im Frequenzbereich bis 1 MHz zu einer erheblich verringerten Messunsicherheit geführt. Wegen ihres kapazitäts- und verlustarmen Aufbaus eignen sie sich grundsätzlich aber auch für höhere Frequenzen. Um dies nutzbar zu machen, wurden die Konverter nun als Teil eines neuen Transferrnormals mit integrierter planarer T-Verzweigung eingesetzt. Erste Messun-

gen zeigen, dass bei 3 V und 100 MHz Messunsicherheiten von unter  $1 \cdot 10^{-3}$  zu erwarten sind. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

#### **Rechnersteuerbares Brückennormal zur Kalibrierung von Temperaturmessbrücken**

Die Kalibrierung von Temperaturmessbrücken mit geringer Unsicherheit erfordert niedrige Rauschbandbreiten, um die erforderliche Auflösung zu erzielen. Für eine rationale Kalibrierung ist ein automatischer Messplatz erforderlich, für den ein rechnersteuerbares Normal entwickelt und aufgebaut wurde. Bei den Messfrequenzen 25 Hz und 75 Hz werden damit relative Messunsicherheiten bis hinab zu einigen  $10^{-8}$  erreicht. (G. Ramm, FB 2.1, guenther.ramm@ptb.de)

#### **Neues Messverfahren zur Bestimmung der Schirmdämpfung an flächigen Materialproben in DIN-A5-Größe**

Für die Bestimmung des Schirmdämpfungsmaßes wurde ein neuartiges auf Richtkoppeln basierendes Messverfahren entwickelt, das eine wesentlich einfachere Handhabung der Materialproben erlaubt. Erste Simulationsrechnungen stimmen gut mit Messungen überein (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

#### **Ein Sekundärnormal zur Pulsanstiegszeitkalibrierung von schnellen Sampling-Oszilloskopen**

Die Kalibrierung der Pulsanstiegszeit schneller Speicheroszilloskope basiert auf der optoelektronischen Erzeugung kurzer Spannungsimpulse. Da die Kalibrierung sehr zeitaufwändig ist und sich auch nicht alle Messköpfe am Primärnormal kalibrieren lassen, wurde ein schneller Pulsgenerator als Sekundärnormal in Betrieb genommen. Unter Inkaufnahme einer höheren Messunsicherheit ist damit eine wesentlich effizientere Kalibrierung möglich. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

#### **Hochfrequenz-Leistungskalibrierung im „Außenvergleich“**

Ein vollautomatischer Messplatz für die Bestimmung des Kalibrierungsfaktors von Thermistoren, thermischen Leistungsmessern und Diodenleistungsmessköpfen im Frequenzbereich bis 18 GHz wurde in Betrieb genommen. (R. Judaschke, FB 2.2, rolf.judaschke@ptb.de)

### Charakterisierung von Mikrowellenprüfspitzen

Die Eigenschaften breitbandiger Mikrowellenprüfspitzen unterschiedlicher Hersteller wurden im Bereich bis 50 GHz messtechnisch bestimmt. Sie hängen stark vom verwendeten Substratmaterial ab und weichen zum Teil deutlich von den Herstellerdaten ab. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

### Messung des Kapazitätsbelags koplanarer Wellenleiter

In Zusammenarbeit mit der Universität Hannover wurden verschiedene Messverfahren zur Bestimmung des Kapazitätsbelags planarer Wellenleiter auf verlustarmen Substraten miteinander verglichen und zur Charakterisierung kommerzieller Kalibriersubstrate angewandt. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

### Normalmesseinrichtung für hohe Wechselspannungen

Für die Messgrößen Effektivwert, Scheitelwert und Klirrfaktor (Frequenzspektrum) wurde ein neues Messsystem entwickelt und aufgebaut. Es besteht aus einem Hochspannungs-Druckgaskondensator, einem elektronischen Messumformer sowie einem Digitalisierer. Die Steuerung erfolgt über einen PC. Zur Digitalisierung wird ein handelsübliches Abtastvoltmeter eingesetzt. Die Messgrößen werden aus den Abtastwerten unter Anwendung der diskreten Fourier-Transformation berechnet. Im Frequenzbereich von 15 Hz bis 300 Hz können Unsicherheiten bis herab zu einigen  $10^{-5}$  erreicht werden. (R. Marx, FB 2.3, rainer.marx@ptb.de)

### Untersuchungen zur Messunsicherheit bei Abtastverfahren mit Fourieranalyse

Die Messunsicherheit der Spektralkomponenten einer diskreten Fourier-Transformation von digital abgetasteten Werten unter Berücksichtigung von Rauscheffekten wurde, als grundlegender Bestandteil bei Kalibrieraufgaben in der Wechselstrommesstechnik, einer detaillierten Analyse unterzogen. (W. G. Kürten Ihlenfeld, FB 2.3, guilherme.ihlenfeld@ptb.de)

### Hochspannungsverstärker kleinster Verzerrung und höchster Stabilität

Für Kalibrierzwecke in der Wechselstrommesstechnik wurde ein Hochspannungsverstärker mit Verstärkungsfaktoren von 10 bis 80, einem Klirrfaktor von weniger als 0,003 % sowie einer Stabilität von jeweils 0,1 mV/V und 0,1 mrad/Stunde in Betrag und Phase entwickelt. (W. G. Kürten Ihlenfeld, FB 2.3, guilherme.ihlenfeld@ptb.de)

### Messmethoden zu „Power Quality“ in der PTB

Messmethoden zur Rückführung von „Power-Quality“-Parametern mittels synchroner Generierung und synchroner Abtastung gewährleisten die kleinsten bisher erreichten Messunsicherheiten (W. G. Kürten Ihlenfeld, FB 2.3, guilherme.ihlenfeld@ptb.de)

### Klassische Wechselleistungsmessung mit Messunsicherheiten von annähernd 1 mW/VA mittels digitaler Abtastung und AC-DC Transfer

Die Erweiterung des Primärnormals der PTB für die Wechselleistung erlaubt eine deutliche Reduzierung der Messunsicherheiten bis herab zu annähernd 1 mW/VA, wenn die Messung der Wechselleistung durch synchrone AC-DC-Transfermessungen gestützt wird. (W. G. Kürten Ihlenfeld, FB 2.3, guilherme.ihlenfeld@ptb.de)

### Durch quasi-synchrone Mikro-Controller unterstützte digitale Abtastung von Wechselgrößen

Eine einfach zu bedienende Zusatzelektronik erlaubt die genaue Messung von Wechselgrößen mit Messunsicherheiten von einigen mV/V ohne Notwendigkeit für eine spezielle Modifikation des genutzten Messgerätes. (W. G. Kürten Ihlenfeld, FB 2.3, guilherme.ihlenfeld@ptb.de)

### Abtastmethoden von verzerrten Kurvenformen im Niederfrequenzbereich

Die Übereinstimmung einer speziellen asynchronen Abtastmethode mit dem synchronen Abtastverfahren der PTB für verzerrte elektrische Spannungssignale ist bis etwa 1 kHz besser als 1 mV/V. (W. G. Kürten Ihlenfeld, FB 2.3, guilherme.ihlenfeld@ptb.de)

### **Heterodynverfahren zur genauen Phasenwinkelmessung im Audiofrequenzbereich**

Eine neuartige Messmethode zur genauen Bestimmung des Phasenwinkels wurde entwickelt. Das Verfahren zeigt ein günstiges Verhalten hinsichtlich der erreichbaren Messunsicherheiten bis über den Audiobereich hinaus. (E. Mohns, FB 2.3, [enrico.mohns@ptb.de](mailto:enrico.mohns@ptb.de))

### **Design und Aufbau einer homogenen und kompensierten Momentenmessspule**

Durch die Optimierung der geometrischen Parameter ist es gelungen, eine Momentenmessspule aufzubauen, die eine bessere Homogenität als die bisher übliche Helmholtzanordnung besitzt und die gleichzeitig unempfindlich gegen äußere Felder ist. Dadurch wird es möglich, Messungen kleiner magnetischer Momente außerhalb von teuren magnetischen Abschirmkabinen durchzuführen. (J. Lüdke, FB 2.5, [joachim.luedke@ptb.de](mailto:joachim.luedke@ptb.de))

### **Optimierte ballistische Bitansteuerung für ultraschnelle Magnetspeicher**

Simulationsrechnungen belegen die hohe Fehlertoleranz des in der PTB entwickelten ultraschnellen Programmierverfahrens für magnetische Speicherchips (MRAM). (H. W. Schumacher, FB 2.5, [hans.w.schumacher@ptb.de](mailto:hans.w.schumacher@ptb.de))

### **Spannungsimpulse**

Die PTB hat ein Verfahren entwickelt, um Verzerrungen zu korrigieren, die ein elektrooptischer Kristall bei der Messung ultrakurzer Spannungsimpulse hervorruft. Die genaue Kenntnis der Form dieser Spannungsimpulse ist für die präzise Kalibrierung von ultraschnellen Sampling-Oszilloskopen wichtig. (S. Seitz, FB 2.5, [stefan.seitz@ptb.de](mailto:stefan.seitz@ptb.de))

## **Metrologie für die Gesellschaft**

### **Vor-Ort-Messungen der Elektromagnetischen Verträglichkeit**

Bei der Begutachtung von installierten Messsystemen hat sich herausgestellt, dass eine Vor-Ort-Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit wünschenswert ist, obwohl Einzelkomponenten bereits in einer Absorberhalle auf Störfestigkeit geprüft wurden. Mit der Entwicklung eines geeigneten Messverfahrens wurde begonnen. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, [thomas.kleine-ostmann@ptb.de](mailto:thomas.kleine-ostmann@ptb.de))

### **Exposition biologischer Proben in nicht-ionisierenden elektromagnetischen Feldern**

Die Frage, ob hochfrequente elektromagnetische Wellen über ihre thermische Wirkung hinaus schädliche Auswirkungen auf biologische Systeme haben, wird nach wie vor kontrovers diskutiert. In entsprechenden Experimenten sind die elektromagnetischen Felder oft nur unzureichend charakterisiert. In der PTB wurde deshalb mit Versuchen zur Feldexposition biologischer Proben bei genau bekannter Feldstärke begonnen. (T. Schrader, FB 2.2, [thorsten.schrader@ptb.de](mailto:thorsten.schrader@ptb.de))

### **Referenz-Freifeldmessplatz**

Baubeginn von Europas größtem Referenz-Freifeldmessplatz für Antennenkalibrierung und zur Messung elektromagnetischer Emissionen (T. Schrader, FB 2.2, [thorsten.schrader@ptb.de](mailto:thorsten.schrader@ptb.de))

## **Internationale Angelegenheiten**

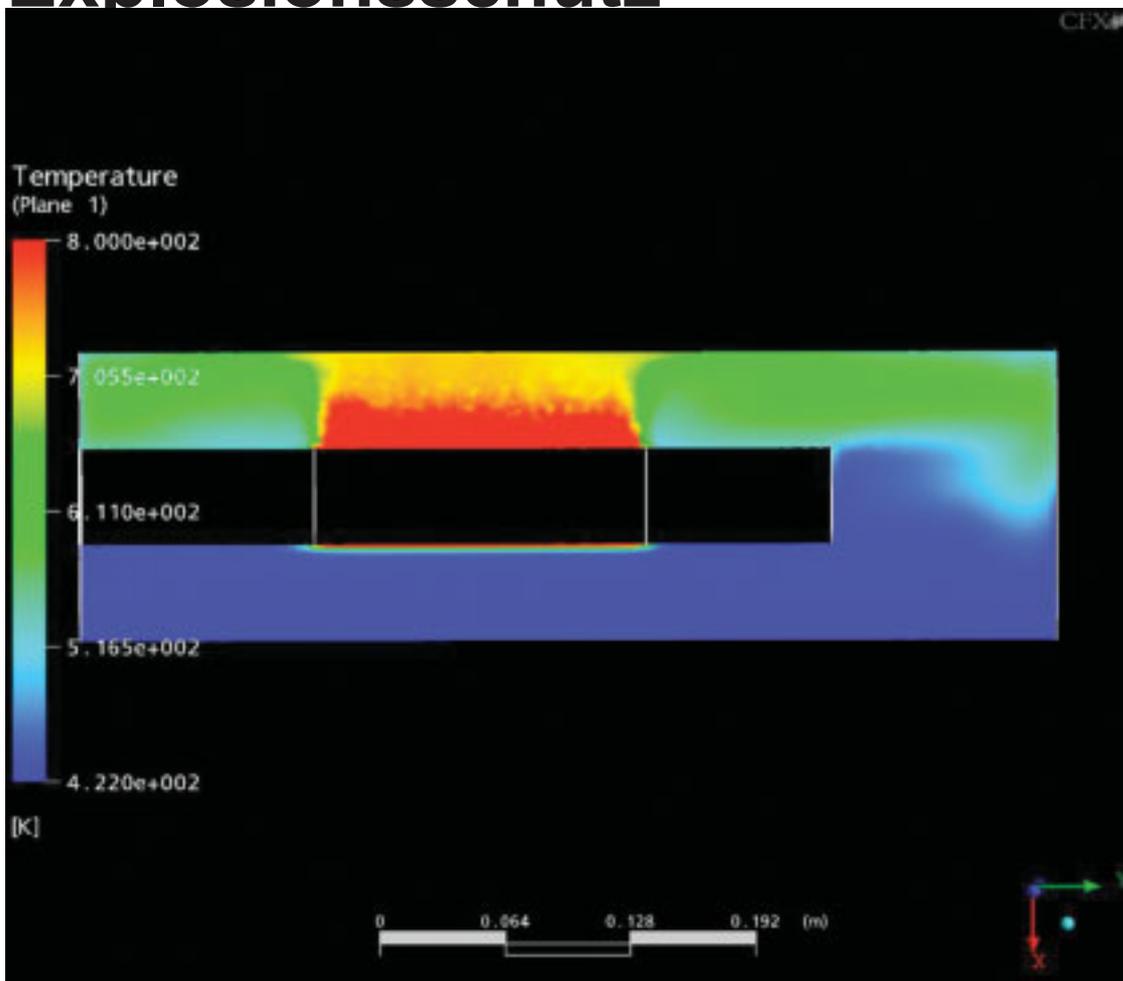
### **EUROMET-Vergleich von Quanten-Hall-Widerstandsschaltungen**

Ein internationaler Ringvergleich von Quantenschaltungen für die Reproduzierung des elektrischen Widerstands über drei Dekaden der Widerstandsskala untersucht deren Eignung als Quanten-Widerstandsnormale. (G. Hein, FB 2.5, [guenter.hein@ptb.de](mailto:guenter.hein@ptb.de))

### **Pilotvergleich zur Kalibrierung der Anstiegszeit von 50-GHz-Sampling-Oszilloskopen**

Die PTB hat einen Pilotvergleich mit dem *National Physical Laboratory* in Großbritannien über die Kalibrierung der Anstiegszeit eines 50-GHz-Sampling-Oszilloskops erfolgreich abgeschlossen. Die sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse validiert das experimentelle Vorgehen beider Metrologieinstitute. (M. Bieler, FB 2.5, [mark.bieler@ptb.de](mailto:mark.bieler@ptb.de))

# Chemische Physik und Explosionsschutz



Berichte der Abteilungen

*Abteilung*  
3

# Chemische Explosions

## Entwicklungen im Explosionsschutz

Im Jahre 2003 sind die beiden aktuellen europäischen Richtlinien zum Explosionsschutz in vollem Umfang wirksam geworden. Mit Ablauf der Übergangszeit der ersten Richtlinie 94/9/EG („ATEX 100a“) wurden alle explosionsgeschützten Geräte zum Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen, ob nun elektrischer oder mechanischer Bauart, sowie Sicherheits-, Kontroll- und Regelvorrichtungen und autonome Schutzsysteme der Richtlinie in vollem Umfang unterworfen. Im Bereich der elektrischen Geräte führte dies nach Ablauf des Übergangszeitraums zu einem Rückgang an EG-Baumusterprüfungen, da der „Umstellungstau“ erfolgreich bewältigt werden konnte.

Für die nicht-elektrischen Geräte trifft dies in diesem Ausmaß bisher nicht zu. Hier ist vielmehr ein immer noch ansteigender Prüfbedarf zu erkennen, da die betroffenen Hersteller erst spät erkannten, dass ihre Produkte unter die Richtlinie fallen.

Titelbild  
Zündquelle heiße Oberfläche  
Simulierte Temperaturverteilung einer zylindrischen Versuchsanordnung (Innenzylinder: Länge: 385 mm, Durchmesser: 52 mm, beheizt mit 2 kW, Außenzylinder: Länge: 500 mm, Innendurchmesser: 150 mm) im senkrechten Schnitt nach 6 s Beheizungszeit

## Unterstützung der Marktaufsicht und Berufsgenossenschaften

Da erst seit drei Jahren auch nichtelektrische Geräte verpflichtend unter die RL 94/9/EG fallen, die Prüfpflicht durch Benannte Stellen aber nur einen kleinen Teil der Geräte erfasst, kommt der Marktaufsicht hier – wie auch bei der Gruppe der elektrischen Geräte für die Zone 2 – ein besonderer Stellenwert zu. Die PTB unterstützt die Marktaufsicht, die in Deutschland durch die Bundesländer umgesetzt wird, durch Workshops, in denen das durch Prüfung, Forschung und Normung erworbene Know-how weitergegeben wird. Gleiches gilt im Bereich des Arbeitsschutzes für Workshops, die sich an die gewerblichen Berufsgenossenschaften wenden.

## Unterstützung von Herstellern explosionsgeschützter Geräte

Insbesondere Hersteller nicht-elektrischer Geräte und verwandter Anlagentechniken haben immer noch Schwierigkeiten mit den formalen und technischen Anforderungen der Richtlinie 94/9/EG bzw. der zugehörigen mandatierten europäischen Normen. Hier half die PTB ebenfalls durch zahlreiche Workshops, die regelmäßig ausgebucht waren. Die in diesen Workshops entwickelte Systematik der Zündgefahrenbewertung ist inzwischen erfolgreich in die Entwicklung der europäischen Basisnormen für nicht-elektrische explosionsgeschützte Geräte eingeflossen.

## Informationen für Betreiber explosionsgeschützter Anlagen

Auch die zweite aktuelle europäische Richtlinie zum Explosionsschutz, die Richtlinie 1999/92/EG, ist inzwischen mit der Betriebs-sicherheitsverordnung (BetrSichV) in nationales Recht umgesetzt worden. Sie wendet sich

# Physik und Schutz

an Betreiber von explosionsgeschützten Anlagen und hat den sicheren Betrieb der Anlagen sowie den Schutz von Arbeitnehmern zum Ziel. Ein Kernelement dieser Richtlinie und damit auch der deutschen Umsetzung ist das Explosionsschutzdokument, das seit dem Jahre 2003 für Neuanlagen erforderlich ist. Die Übergangsfrist zur Erstellung des Explosionsschutzdokumentes für Altanlagen lief Ende 2005 aus. In diesem Zusammenhang führte die Notwendigkeit, bestehende Anlagen mit Blick auf alle denkbaren Zündquellen zu bewerten, zu einem großen Beratungsbedarf überwiegend mittelständischer Unternehmen. In diesen Fällen berät die PTB überwiegend unter Einschaltung von Multiplikatoren wie gewerblicher Berufsgenossenschaften und Gewerbeaufsicht, um eine breite Wirksamkeit der Information zu gewährleisten.

Der von der PTB initiierte und organisierte „Ex-Dienst“, der in Zusammenarbeit mit Herstellern, Betreibern, Gewerbeaufsicht, Berufsgenossenschaften und Benannten Stellen arbeitet, wird von allen beteiligten Kreisen intensiv genutzt.

In diesen Zusammenhang gehören auch einige von Betreibern und Berufsgenossenschaften finanzierte Forschungsvorhaben, die sich mit der möglichen Zündung explosionsfähiger Gemische durch heiße Oberflächen und mechanische Zündquellen beschäftigen.

## Normung

Innerhalb von wenigen Jahren ist die Anzahl der „IECEX Certificates of Conformity“ für explosionsgeschützte Geräte wie z. B. elektrische Antriebe, Leuchten, Meßsysteme auf weit über 1 000 angestiegen. Diese Tatsache dokumentiert eindrucksvoll das große Inter-

esse der Industrie an international anerkannten Zertifikaten, die anfangs zwar noch nicht durch die jeweiligen nationalen Gesetzgeber anerkannt sind (nur in Australien). Die weitere Planung des IECEx Management Committee (ExMC) unter Vorsitz eines PTB-Mitarbeiters sieht jedoch vor, den Dialog mit den staatlichen Stellen (z. B. der „Occupational Safety and Health Administration“ – OSHA, USA) zu suchen und eine multilaterale Vereinbarung mit dem Ziel der direkten staatlichen Anerkennung der „IECEX Certificates of Conformity“ zu entwerfen. Damit eröffnet sich erstmalig die Chance für den deutlichen Abbau von Handelshemmnissen im globalen Markt der explosionsgeschützten Geräte.

## IECEX-Entwicklung

Die Zündquelle „optische Strahlung“ wurde im Rahmen eines EU-Forschungsvorhabens unter maßgeblicher Beteiligung der PTB wissenschaftlich untersucht. Auf der Basis dieser Ergebnisse erarbeitete eine IEC-Arbeitsgruppe unter Leitung eines PTB-Mitarbeiters einen entsprechenden Normentwurf. Die entstandene Norm wurde 2006 als IEC 60079-28 „Protection of equipment and transmission systems using optical radiation“ veröffentlicht.



Bilder 1a und 1b: Fahrzeug mit Wasserstoffantrieb (Markteinführung Winter 2006)



## Neue Kraftstofftechnologien und Energiequellen

Die Fachbereiche des Explosionsschutzes begleiten neue Kraft- und Brennstofftechnologien durch experimentelle Untersuchungen und sicherheitstechnische Bewertungen zum Explosionsschutz.

Die Einführung von Ottokraftstoffen mit hohem Ethanolgehalt zum Antrieb von Kraftfahrzeugen machte eine erneute Bewertung der Explosionsschutzmaßnahmen bei der Kraftstofflagerung und -abgabe an Tankstellen, aber auch beim Betrieb der Kraftfahrzeuge nötig. Auf Basis von in der PTB durchgeführten Untersuchungen der sicherheitstechnischen Kenngrößen ethanolhaltiger Ottokraftstoffe einschließlich ihrer sicherheitstechnischen

Bewertung konnten angemessene Explosionsschutzmaßnahmen für diese Kraftstoffe festgelegt werden.

In ähnlicher Weise wurde die Wasserstofftechnologie zum Betrieb von Kraftfahrzeugen begleitet (Bilder 1a und 1b). Das Explosionsschutzkonzept eines namhaften Kfz-Herstellers im Zusammenhang mit möglichen elektrischen Zündquellen im Tankbereich beim Wasserstoffantrieb von Verbrennungsmotoren wurde untersucht und bewertet.

## Der Einsatz von Simulations- und Berechnungswerkzeugen im Explosionsschutz

Explosionsschutzmaßnahmen werden üblicherweise stufenweise nach drei Grundprinzipien durchgeführt:

- Vermeidung explosionsfähiger Gemische oder
- Vermeidung wirksamer Zündquellen oder
- Begrenzung der Auswirkung von Explosionen.

In allen drei Bereichen bietet sich die Simulation von Transport- und Reaktionsvorgängen in explosionsfähigen Gemischen sowie von physikalischen Aspekten der Zündquellen oder Schutzsysteme an.

Entstehung und Ausbreitung explosionsfähiger Gemische beispielsweise zeichnen sich in der Regel dadurch aus, dass sie für das bloße Auge nicht sichtbar sind und der messtechnische Aufwand für die vollständige Erfassung dieser Vorgänge sehr groß ist. Durch validierte Modelle kann die numerische Simulation für diesen Anwendungsfall ein wichtiges Werkzeug sein.

Für eine detaillierte Beschreibung von Zündprozessen sind sowohl Strömungsvorgänge als auch chemische Reaktionen zu berücksichtigen. Hier gestattet die mathematische Modellierung den Zugang zu experimentell nicht zugänglichen Größen mit dem Ziel, ein besseres Verständnis der zu Grunde liegenden Prozesse zu bekommen.

Schließlich können Simulationsmethoden auch für Verfahren zur Auswirkungsbegrenzung von Explosionen genutzt werden, etwa zur Beschreibung und Nachbildung von Druckentlastungsvorgängen oder zur Untersuchung des Zünddurchschlages, der für die Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ wie auch für Flammendurchschlagsicherungen von besonderer Bedeutung ist.

Beispiele von Simulations- und Berechnungsverfahren aus den genannten Bereichen zeigen die Bandbreite der Nutzung dieser Verfahren in der PTB.

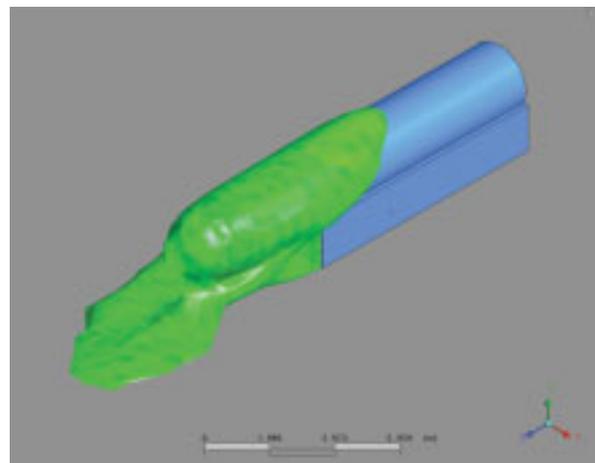
Bild 2: Ausströmung von Kraftstoffdampf/Luft-Gemisch aus dem Tankdom bei Rückenwind

## Explosionsgefährdete Bereiche in der Umgebung von Tankfahrzeugen

Die Ausdehnung der explosionsgefährdeten Bereiche um Tankfahrzeuge beim Be- und Entladen sind für die Explosionsschutzmaßnahmen von entscheidender Bedeutung. So können bei einer Undichtheit des Gaspendelsystems oder bei der Befüllung über den offenen Dom eines Tankwagens brennbare Dämpfe austreten und zusammen mit Luft eine explosionsfähige Atmosphäre bilden. Als Teil eines Forschungsvorhabens des Bundesverkehrsministeriums wurden systematische Messungen an einem Tankauflieger durchgeführt und die so erhaltenen Daten für die Validierung von CFD-Simulationen (CFD = Computational Fluid Dynamics) genutzt. Als potentielle Austrittsflächen der Dämpfe wurden ein Tankdom und der Gaspendelanschluss gewählt. In verschiedenen Szenarien wurde die Ausdehnung einer Gemischwolke unter Windeinfluss betrachtet. Dabei galt es mehrere Fragen zu beantworten:

- Kann explosionsfähiges Gemisch die Zugmaschine erreichen?
- Wie groß ist die Fläche, die von einer Wolke mit einer sicherheitstechnisch relevanten Gemischkonzentration überdeckt wird?
- Welche Zoneneinteilung für explosionsgefährdete Bereiche lässt daraus ableiten?

Als ein Beispiel konnte die folgende Situation geklärt werden: „Rückenwind“ geringer Geschwindigkeit kann eine explosionsfähige Gemischwolke bis zu einer Zugmaschine ausdehnen, bei Windstille läuft das Gemisch jedoch in einer dünnen Schicht auf dem Tank herunter und breitet sich über den Boden aus.



### Zündung an heißen Oberflächen

Heiße Oberflächen gehören zu den wichtigsten Zündquellen. Hier wurden Zündort und Verbrennungsverlauf in einer zylindrischen Versuchsanordnung untersucht und mit Simulationsrechnungen verglichen.

Der Versuchsaufbau besteht aus zwei konzentrischen Zylindern, von denen der innere (Heizpatrone) beheizt ist. Beheizt wurde effektiv nur eine relativ kleine Fläche (267 cm<sup>2</sup>) mit einer hohen Leistung (2 kW). Dies ergibt einen Wärmestrom von näherungsweise 75 000 W/m<sup>2</sup>.

Der in Bild 3 dargestellte Versuchsaufbau hat die folgenden charakteristischen Daten: Das geheizte Innenrohr hat eine Länge von 385 mm, einen Durchmesser von 52 mm und ist auf einer Länge von 170 mm beheizt. Das umgebende Zündgefäß aus Glas hat einen Innendurchmesser von 150 mm und eine Länge von 500 mm bei einer Manteltemperatur von 150 °C.

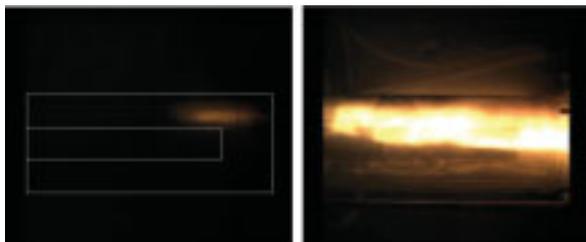


Bild 3: Entzündung und Verbrennung im Versuchsaufbau

Bild 3 zeigt die Entzündung und Verbrennung eines Heptan-Luft-Gemisches mit der Berechnung der Temperaturverteilung (vor der Entzündung) in der beschriebenen Versuchsanordnung .

### Motoren der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“

Auch bei Motoren der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ ist die maximale Oberflächentemperatur eine wichtige Größe als Maß für die Zündmöglichkeit durch heiße Oberflächen.

Hierbei wird die maximale Oberflächentemperatur an der Außenfläche und im Inneren einer elektrischen Maschine auch im Störfall (der Läufer ist blockiert) ermittelt, um die Auslösezeit für das Überwachungsgerät zu bestimmen.

Zur Ermittlung der Temperatur bei blockiertem Läufer müssen an der Oberfläche Thermoelemente angebracht werden. Die Bestimmung des Ortes der maximalen Temperatur beruht auf Erfahrungswerten und ist von diversen Parametern (z. B. von der Rotorstellung und der Geometrie) abhängig. Eine systematische Untersuchung aller Heißpunkte ist nur mit erheblichem messtechnischen Aufwand möglich.

Folglich nimmt der Prüfaufwand zur Bestimmung der maximalen Oberflächentemperatur mit der Größe der Maschine überproportional zu. Daneben lässt sich die Rotortemperatur von Maschinen sehr große Leistungen nicht direkt bestimmen, da die notwendige An-

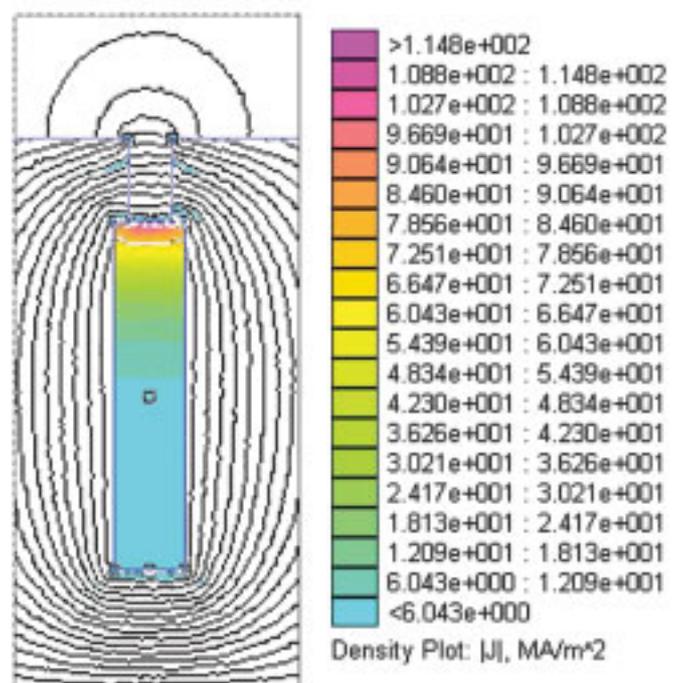


Bild 4: Stromdichte in einem Läuferstab einer elektrischen Maschine

schlussleistung in den Prüffeldern nicht zur Verfügung steht. Auch sind komplizierte Konfigurationen (z. B. Rotoren von Synchronmaschinen) hinsichtlich relevanter Heißpunkte sehr wenig erforscht.

Hier bieten Simulationswerkzeuge die Möglichkeit, die Geräteteile und -punkte mit der höchsten Oberflächentemperatur schneller zu erkennen und kritische Parameter (wie Art der Werkstoffe und Bauteilgeometrien) zu bestimmen. Auf diese Weise lassen sich die ansonsten sehr aufwendigen Messungen auf ein angemessenes Maß reduzieren, so dass die Prüfkosten und auch die Prüfdauer deutlich vermindert werden können, ein Aspekt, der für den Markteintritt immer wichtiger wird.

### Die Software ispark® zur Bewertung eigensicherer Stromkreise

Die Zündschutzart „Eigensicherheit“ erfordert zur Vermeidung einer Zündung durch elektrische Funken die Beschränkung elektrischer Größen wie Spannung und Strom im Stromkreis auf bestimmte Höchstwerte.

Der quantitative Zusammenhang zwischen maximal zulässigen Spannungen und Strömen mit an dem Stromkreis beteiligten Induktivitäten und Kapazitäten ist in den allgemein anerkannten Normen, z. B. IEC 60079-11, traditionell in der Form von Grenzkurvendiagrammen, Tabellen und Grenzwerten angegeben. Die Gültigkeit dieser Werte ist allerdings beschränkt auf besonderes einfache Stromkreise.

Die PTB begann schon vor einigen Jahren mit der Entwicklung eines theoretischen Modells, das die bekannten Zündgrenzwerte auch für komplexere Strom-

kreise möglichst vollständig und widerspruchsfrei umfassen sollte, mit dem Ziel der Schaffung einer einfach anzuwendenden Software für Industrie und Prüfstellen. Eine geeignete Modellstruktur gelang dann durch die Separierung in ein elektrisches sowie ein kalorisches Teilsystem und die Unterscheidung verschiedener Funkentypen: Kontaktschließen, -öffnen und beide Erscheinungen unmittelbar nacheinander.

Bild 5 verdeutlicht die Komplexität der Aufgabe, elektrische Größen auf der einen (linken) Seite in Zusammenhang zu bringen mit kalorischen Größen auf der anderen (rechten) Seite. Kerngrößen der Transformation sind eine Funkenverlustspannung  $U_v$  und ein charakteristischer Verlauf der Funkenspannung über der Zeit  $U_{f(t)}$  bzw. eine verallgemeinerte Funkenimpedanz  $Z_{f(t)}$ ; die Zündgrenzenergie  $w_0$  und die Zündgrenzleistung  $p_0$  bleiben für eine bestimmte Gasart konstant.

Die Gültigkeit der gefundenen Modellstruktur wird bestätigt durch elektrische und kalorische Parameter, welche ausschließlich von Gasart (Gruppe) und Funkentyp abhängen, nicht jedoch von den elektrischen Eigenschaften des Stromkreises und (dennoch) eine überzeugende Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen aufweisen. Insbesondere fand sich eine Verlustspannung mit dem Wert 10,3 V, die weder von Gasgruppe noch Funkentyp abhängt (sondern überwiegend vom Kontaktwerkstoff).

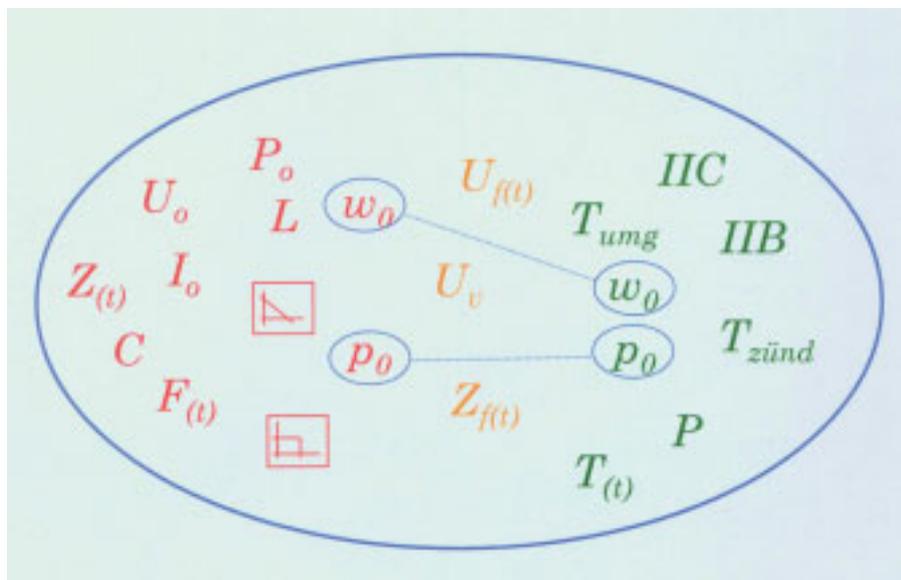


Bild 5: Einflussgrößen bei der Modellrechnung zum Zündverhalten eigensicherer Stromkreise ispark®

Ein vereinfachter Auszug aus den Ergebnissen des Programms wurde als Anhang in IEC 60079-25 aufgenommen.

Für die bei Industrie und Prüfstellen vorliegende hauptsächliche Anwendung mit der Zielrichtung der Bestimmung der maximal zulässigen Induktivitäten und Kapazitäten im Stromkreis bei gegebenen elektrischen Quelldaten gibt es heute einen an diese Aufgabe besonders angepassten Programmablauf. Die Software ispark® steht allen Interessierten im Rahmen einer Lizenzvereinbarung mit der PTB zur Verfügung.

### Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“

Bei Verwendung der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ werden potentielle Zündquellen in ein Gehäuse eingeschlossen. Kommt es im Inneren des Gehäuses infolge des Kontakts explosionsfähiger Atmosphäre mit einer Zündquelle zu einer Explosion, so muss das Gehäuse den auftretenden Belastungen standhalten. Eine weitere Anforderung an druckfest gekapselte Gehäuse ist weitaus anspruchsvoller, nämlich die sichere Vermeidung von Zünddurchschlägen durch konstruktiv bedingte Gehäusespalte. Bei einem Zünddurchschlag käme es zu einer Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre außerhalb des Gehäuses.

Die Zündquelle ist dabei das durch die Spalte austretende heiße Gas. Experimentell wurde bei der Untersuchung der Zündprozesse durch heiße Freistrahlen beobachtet, dass die Wahrscheinlichkeit der Zündung vor allem durch die Austrittsgeschwindigkeit des heißen Freistrahls bestimmt wird. Je größer die Austrittsgeschwindigkeit ist, desto größer sind die Scherspannungen und umso geringer ist die Zündfähigkeit. Kommt es zu einer Zündung, so findet sie im Allgemeinen an der Spitze des heißen Freistrahls statt, da an diesem Ort die geringsten Scherspannungen vorliegen. Der Einfluss der Mischungsvorgänge auf den Zündprozess konnte mit Hilfe von numerischen Methoden bestätigt werden kann. In aktuellen Arbeiten werden daher die Mischungsvorgänge durch laserinduzierte Fluoreszenz von zugesetzten NO-Molekülen quantitativ untersucht. Darüber hinaus werden die Zündprozesse in heißen Freistrahlen durch eine PDF-Methode numerisch behandelt, um so auch die Wechselwirkung von

turbulenter Strömung mit den chemischen Reaktionen zu erfassen. Zielsetzung der Untersuchungen ist eine Verbesserung der Modellbildung von Zünddurchschlagsprozessen zur Weiterentwicklung geeigneter numerischer Werkzeuge, die eine umfassende Beschreibung der Zündprozesse unter Sicherheitstechnischen Gesichtspunkten erlauben.

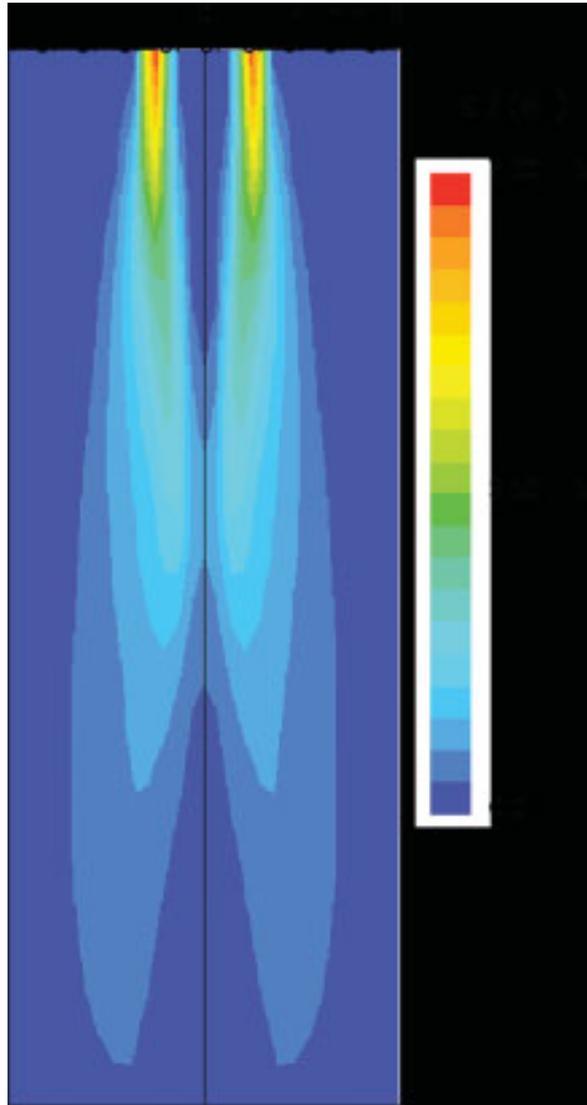


Bild 6: Numerische Simulation – (Computational Fluid Dynamics CFD) 79 % He/Luft-Freistrah,  $v_0 = 160 \text{ m/s}$

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### 4'4-Azoxyanisol zur Temperaturkalibrierung dynamischer Differenzkalorimeter beim Abkühlen

Zur Temperaturkalibrierung dynamischer Differenzkalorimeter beim Abkühlen werden Substanzen verwendet, die eine definierte Phasenumwandlung ohne Unterkühlung aufweisen. Die isotrop-nach-nematisch Phasenumwandlung des Flüssigkristalls 4'4-Azoxyanisols bei ca. 135 °C erfüllt diese Anforderung weitestgehend und kann für Kalibrierungen verwendet werden, auch wenn die Untersuchungen ergeben haben, dass es sich um einen so genannten Phasenübergang von schwach 1. Ordnung (Englisch „weakly first order phase transition“) handelt. (S. Sarge, FB 3.3, [stefan.sarge@ptb.de](mailto:stefan.sarge@ptb.de))

#### Neue Messungen der Wasserdichte im Temperaturbereich zwischen 1 °C und 30 °C

Mit der neu aufgebauten Apparatur zur Dichtebestimmung nach der magnetischen Flotationsmethode wurde die Wasserdichte im Temperaturbereich zwischen 1 °C und 30 °C mit einer relativen Unsicherheit ( $k = 2$ ) von  $0,8 \cdot 10^{-6}$  gemessen. Mit diesen Messungen konnte zwischen 10 °C und 30 °C die von M. Tanaka, G. Girard, R. Davis, A. Peuto und N. Bignell in „Recommended table for the density of water between 0°C and 40°C based on recent experimental reports“ angegebene Formel zur Beschreibung der Wasserdichte (2001 Metrologia 38, S. 301-309) bestätigt werden. Die relativen Abweichungen zwischen den Messwerten und der Formel sind kleiner als  $5 \cdot 10^{-7}$ , also geringer als die geschätzte Messunsicherheit. (H. Wolf, FB 3.3, [henning.wolf@ptb.de](mailto:henning.wolf@ptb.de))

#### Verbesserung der Aräometer-Kalibrierung in der PTB

Für die Teilnahme an internationalen Schlüsselvergleichen wurde die Apparatur zur Aräometer-Kalibrierung verbessert, um eine geringere Unsicherheit zu erzielen und eine automatische Justierung des Skalenstrichs zu realisieren. Die wesentlichen Beiträge zur Reduzierung der Messunsicherheit von  $0,030 \text{ kg/m}^2$  auf  $0,017 \text{ kg/m}^2$  liefern dabei den Ersatz einer CCD-Kamera, die eine sehr

genaue und reproduzierbare Einstellung der Flüssigkeitsoberfläche auf den zu kalibrierenden Skalenstrich ermöglicht und die Messung der Oberflächenspannung direkt im Messgefäß. (H. Bettin, FB 3.3, [horst.bettin@ptb.de](mailto:horst.bettin@ptb.de)).

### Metrologie für die Gesellschaft

#### Internationale Vergleichbarkeit von Referenzwerten im Trinkwasserbereich anhand von Rückführung mit der MC ICPMS ermöglicht

Ein neues Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma zur Probenionisierung und Multikollektordetektion (MC ICPMS) ermöglicht die Verifizierung von rückgeführten Referenzwerten für nationale Vergleichsmessungen zur Schwermetallbestimmung in Trinkwasser und erlaubt den Teilnehmern damit erstmals die europaweite Absicherung der Vergleichbarkeit ihrer Messresultate. (D. Schiel, FB 3.1, [detlef.schiel@ptb.de](mailto:detlef.schiel@ptb.de))

#### Workshop des nationalen Netzwerkes „Metrologie in der Chemie“ zum Thema „Rückführung chemischer Messergebnisse in der Umweltanalytik – ein wichtiges Element der Qualitätssicherung“

Der gemeinsam von PTB, BAM und UBA im UBA in Berlin veranstaltete Workshop brachte erstmals die Netzwerkpartner mit den für die QS in der Umweltanalytik verantwortlichen Stellen der Länder zu einem Meinungsaustausch über das Thema Rückführung zusammen. (D. Schiel, FB 3.1, [detlef.schiel@ptb.de](mailto:detlef.schiel@ptb.de))

#### Erstmalige Akkreditierung eines Referenzlaboratoriums für die Messung von katalytischen Enzymaktivitätskonzentrationen

Erstmals wurde eine primäre Messmethode zur Messung von katalytischen Enzymaktivitätskonzentrationen bei einem Referenzlaboratorium (Referenzinstitut für Bioanalytik Kalibrierlaboratorium III) akkreditiert. (A. Henrion, FB 3.1, [andre.henrion@ptb.de](mailto:andre.henrion@ptb.de))

### **Erster Messvergleich auf dem Gebiet der Nahrungsmittelanalytik mit dem Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit erfolgreich abgeschlossen**

Im Rahmen der Einbindung des *Bundesamtes für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit* (BVL) in das nationale metrologische Netzwerk wurde ein Vergleich auf dem Gebiet der Bestimmung von Chloramphenicol (CAP) in Lebensmitteln erfolgreich durchgeführt. (A. Henrion, FB 3.1, andre.henrion@ptb.de)

### **Primäre Leitfähigkeitsmessungen für die Ozeanografie**

In einem von dem wissenschaftlichen Komitee für Meeresforschung (SCOR) und der internationalen Gesellschaft für die Physikalischen Wissenschaften des Ozeans (IAPSO) (WG 127) unterstützten EUROMET-Projekt soll geprüft werden, inwieweit die zur Bestimmung der Salinität von Meerwasser eingesetzten Leitfähigkeitsmessgeräte auf das SI rückgeführt kalibriert werden können. (P. Spitzer, FB 3.1, petra.spitzer@ptb.de)

### **PTB/DAM-Workshop „Getreideanalytik“**

Am 17. Mai 2006 fand in der PTB der Workshop „Getreideanalytik“ in Zusammenarbeit mit der *Deutschen Akademie für Metrologie* (DAM) statt. Ziel des Workshops war es, Probleme bei der Handhabung der Geräte durch Übung an Geräten zu beseitigen, Kenntnisse zur Eichung zu vertiefen und Rückschlüsse aus den Erkenntnissen der Eichung zum Zulassungsverfahren zu gewinnen. In Zusammenarbeit mit drei Herstellern wurde praxisnah an insgesamt 20 Geräten gearbeitet. (P. Ulbig, FB 3.2, peter.ulbig@ptb.de)

### **PTB-Workshop „Prüfung von Gaschromatographen“**

Die in der öffentlichen Gasversorgung verwendete Energiemesstechnik unterliegt in den letzten Jahren einem raschen Wandel. Neue Geräte und Verfahren erfordern die Bestimmung von neuen Messgrößen, die für die Gasabrechnung benötigten Eingangsgrößen müssen genauer bestimmt werden als bisher. Durch diese Entwicklung entstand kurzfristig ein Bedarf an neuartigen Gasbeschaffenheitsmessgeräten (z. B. Gaschromatographen). In einem zweitägigen Workshop hat die Arbeitsgruppe *Kalorische Größen* der

PTB im Juni 2006 diese Thematik mit Mitarbeitern von Eichbehörden, staatlich anerkannten Prüfstellen und Messgeräteherstellern erläutert. (D. Hoburg, FB 3.3, detlev.hoburg@ptb.de)

## **Metrologie für die Wirtschaft**

### **Neue dynamische Kalibriermethode für Leitfähigkeitsmessgeräte im Reinstwasserbereich**

Mit Hilfe eines neuartigen dynamischen Inline-Kalibrierverfahrens können die in der Industrie und in Labors eingesetzten Leitfähigkeitsmessgeräte auf das SI rückgeführt kalibriert werden. Damit kann die Qualität des gereinigten Wassers durch Messen der Leitfähigkeit zuverlässig beurteilt werden. (P. Spitzer, FB 3.1, petra.spitzer@ptb.de)

### **Messungen des Zustandsverhaltens feuchter Luft bei Drücken bis 17 MPa im Temperaturbereich von 425 K bis 520 K**

Im Rahmen des EU-Projekts „Advanced Adiabatic – Compressed Air Energy Storage“ wurden umweltfreundliche Energiespeicherungstechniken mit Hilfe von komprimierter Luft untersucht. Dazu wurden in der PTB Messungen an Luft mit unterschiedlichen Feuchten in einem Temperaturbereich von 150 °C bis 250 °C und bei Drücken von 3 MPa bis 17 MPa durchgeführt. In Zusammenarbeit mit der *Fachhochschule Zittau* und der *Universität Rostock* konnten die derzeit besten Berechnungsmodelle für die thermodynamischen Größen und die Transportgrößen von feuchter Luft ermittelt werden. (G. Klingenberg, FB 3.2, guenther.klingenberg@ptb.de)

### **Kompressibilitätsmessungen an Kohlenwasserstoffen**

Mit einem Biegerschwinger-Dichtemessgerät wurden bei Drücken bis 0,35 MPa die Kompressibilitäten für eine Reihe von Flüssigkeiten gemessen, die als zertifizierte Dichte-Referenzflüssigkeiten und als Flüssigkeiten in hydrostatischen Wäageapparaturen zur Bestimmung von Festkörperdichten verwendet werden. Die Kenntnis der Kompressibilität ist notwendig, um eine Vergleichbarkeit von Messungen auf dem durch die Unsicherheitsangabe vorgegebenen ppm-Niveau zu ermöglichen. (H. Wolf, FB 3.3, henning.wolf@ptb.de)

### **Sicherheitstechnische Kenngrößen ethanolhaltiger Ottokraftstoffe**

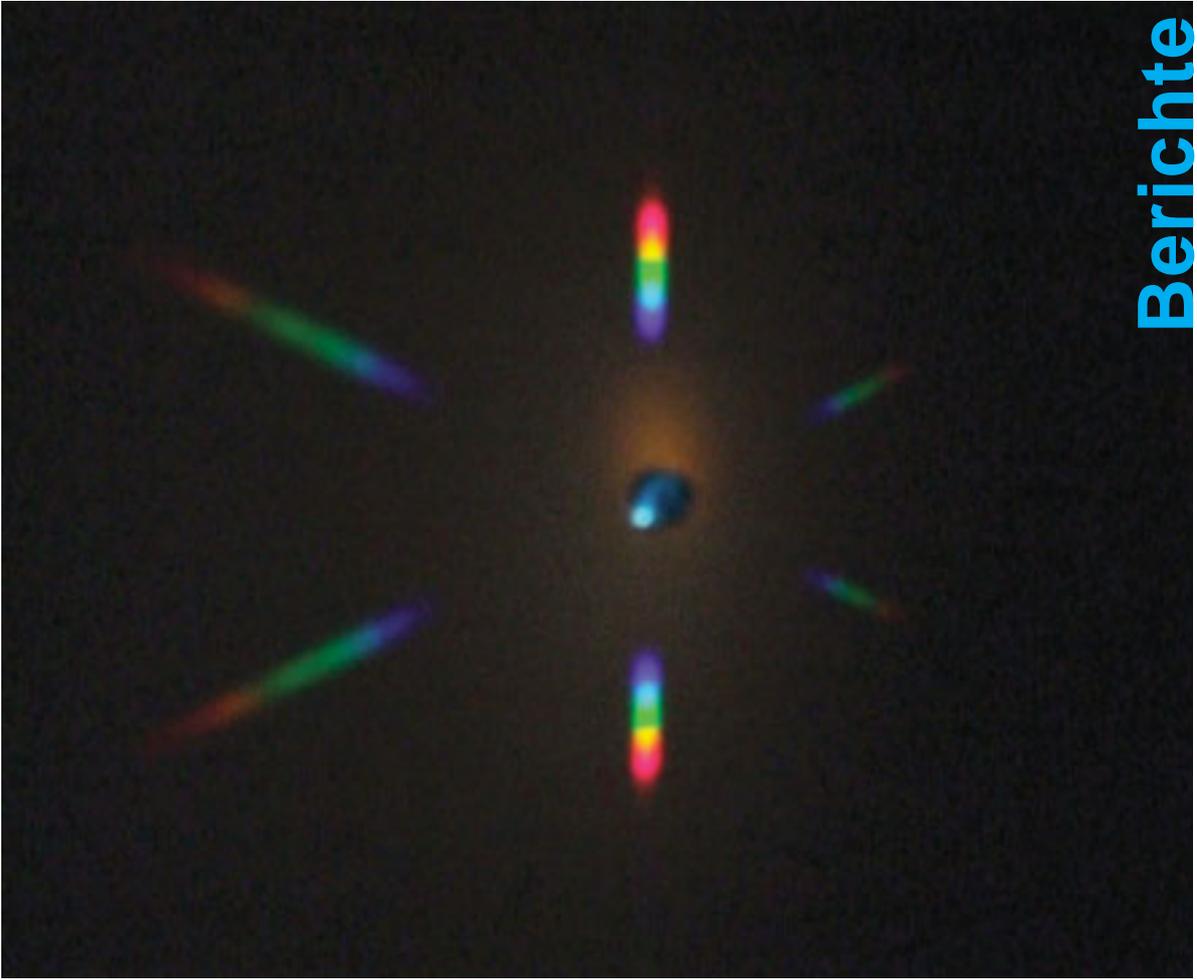
Im Rahmen der Förderung erneuerbarer Energien steigt die Nachfrage nach ethanolhaltigen Ottokraftstoffen, wobei das Ethanol aus Biomasse (Bioethanol) gewonnen ist. Da diese ethanolhaltigen Ottokraftstoffe brennbare/entzündliche Flüssigkeiten sind, muss für den Umgang, den Transport, die Lagerung und den Betrieb von Tankstellen ein Explosionsschutzkonzept vorliegen. (E. Brandes, FB 3.4, elisabeth.brandes@ptb.de)

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

Das aktuelle Update der Datenbank enthält die sicherheitstechnischen Kenngrößen von über 2200 brennbaren Flüssigkeiten. Zahlreiche neu aufgenommene Daten sind Kenngrößen, die bei nicht-atmosphärischen Bedingungen gemessen wurden. (W. Möller, FB 3.4, wolfgang.moeller@ptb.de)



# Optik



Berichte der Abteilungen

# Optik

Nicht von ungefähr wird das 21. Jahrhundert als das Jahrhundert des Photons bezeichnet, da die Optik in bisher ungekanntem Umfang Schlüsseltechnologien für die unterschiedlichsten Lebensbereiche bereitstellt. In der PTB erstrecken sich daher die Arbeitsgebiete der Abteilung *Optik* über alle vier Geschäftsfelder der PTB, die Grundlagen der Metrologie, die Metrologie für die Wirtschaft, die Metrologie für die Gesellschaft und die internationalen Angelegenheiten. Zu den Aufgaben der Abteilung *Optik* gehört in besonderem Maße die Darstellung und Weitergabe der Einheiten im Messwesen. Dabei stellt die Abteilung *Optik* mit der Sekunde, dem Meter und der Candela drei der sieben Basiseinheiten des internationalen Einheitensystems (SI) und die davon abgeleiteten wichtigsten Einheiten dar und gibt sie mit angemessenen Unsicherheiten weiter. Die Abteilung *Optik* organisiert ihre Arbeit in den fünf Fachbereichen *Zeit und Frequenz*, *Quantenoptik und Längeneinheit*, *Photometrie und angewandte Radiometrie*, *Bild- und Wellenoptik* und *Optische Technologien*, aus denen einige wichtige Ergebnisse und bedeutende Entwicklungen des Jahres 2006 im Folgenden dargestellt werden.

## Zeit und Frequenz

Mit dem Zeitgesetz von 1978 wurde der PTB in Deutschland die Verantwortung für die Darstellung und Weitergabe der gesetzlichen Zeit übertragen. Der Fachbereich *Zeit und Frequenz* entwickelt und betreibt dafür die genauesten Atomuhren, stellt die gesetzliche Zeit in Deutschland dar, verbreitet sie in Deutschland und Europa und trägt in herausgehobener Weise zur Erzeugung der internationalen Weltzeit bei (Bild 1).



## Titelbild

Reflexe eines Weißlichtbeugungsdiagramms zur Untersuchung einer dreieckssymmetrischen photonischen Mikrostruktur für mikrooptische Systeme.

Bild 1: Transportable Zweiweg-Zeit-und-Frequenzübertragungsstation auf dem Dach des Max-von-Laue-Baus der PTB während einer Kalibrierkampagne.

Die gegenwärtig genaueste Caesiumatomuhr der PTB (CSF1) basiert auf einer Atomfontäne, bei der die Frequenz eines hochstabilen Mikrowellenoszillators auf eine atomare Übergangsfrequenz in lasergekühlten Caesiumatomen stabilisiert wird. Nach einer mehrjährigen Entwicklungsphase hat im Jahr 2006 die zweite Caesium-Fontänenuhr (CSF2) der PTB ihren Probetrieb aufgenommen. Mit der Verfügbarkeit der beiden Fontänenuhren wird die PTB zukünftig gleichzeitig die Uhren hinsichtlich ihrer Genauigkeit weiterentwickeln können, ohne dabei den Betrieb für die Erzeugung der Zeitskalen einschränken zu müssen.

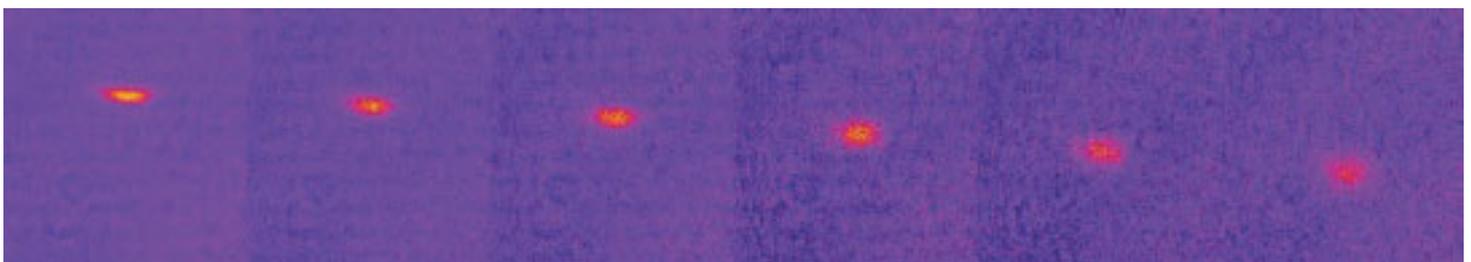
Bei der nächsten Generation von Atomuhren wird es sich um optische Atomuhren handeln, die im Gegensatz zu den Mikrowellenoszillatoren mit Laseroszillatoren arbeiten, deren Frequenzen auf Übergänge in einzelnen gespeicherten Ionen oder in Wolken von Neutralatomen stabilisiert werden. Die PTB verfolgt beide Ansätze mit der Ytterbium-Einzelionenuhr und der Strontium-Neutralatomgitteruhr (Bild 2), da heute noch nicht abgeschätzt werden kann, welche der beiden letztendlich die höhere Genauigkeit erreichen wird. Beide Uhren sind im Jahr 2006 vom *Internationalen Komitee für Maße und Gewichte* als sekundäre Normale zur Darstellung der Sekunde empfohlen worden. Wegen der um etwa fünf Größenordnungen höheren Frequenz der Laser wird die Genauigkeit der optischen Atomuhren gegenüber den heutigen Mikrowellenuhren deutlich erhöht werden können. Zusätzlich ist die Stabilität der optischen Atomuhren um Größenordnungen höher, so dass die Genauigkeit bei sehr viel geringeren Messzeiten erreicht und genutzt werden kann. Zusammen mit dem britischen *National Physical Laboratory*, dem *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* und der Firma *TimeTech* untersucht die PTB gegenwärtig beispielsweise in einer Studie der *Europäischen Weltraumbehörde* (ESA), inwieweit opti-

sche Atomuhren in den weltumspannenden Beobachtungs- und Leitstationen der ESA für Missionen im tiefen Weltraum eingesetzt werden können.

Die breite Verfügbarkeit genauester Zeit und Frequenz zu äußerst geringen Kosten hat höchste volkswirtschaftliche Bedeutung. Die PTB betreibt dazu den Langwellensender DCF77, dessen Signale in Europa von über zwanzig Millionen Empfängern genutzt werden. Es ließ sich nachweisen, dass der durch den Betrieb dieses Dienstes erzielte volkswirtschaftliche Nutzen die für den Betrieb des Senders erforderlichen Aufwendungen um mehr als eine Größenordnung überwiegt. Über die in diesem Jahr neu in Betrieb genommenen Steuereinrichtungen können Warninformationen des Bundes ausgesandt werden (s. Jahresbericht 2004). Seit kurzem werden über das Signal auch Wetterdaten übertragen.

Neben ihrer Bedeutung für Grundlagenforschung und Anwendung haben Uhren und Zeitmessung die Menschen immer fasziniert. Das war auch bei der „Langen Nacht der Zeit“ zur Zeitumstellung vom 28. auf den 29. Oktober deutlich zu spüren, die in der PTB als einem der 365 „Orte im Land der Ideen“ mit einer bunten Kultur- und Wissenschaftsnacht rund um die Zeit veranstaltet wurde. Dabei kamen etwa 8000 Besucher in die Atomuhrenhalle der PTB, um sich über Betrieb, Physik und Technik der Atomuhren und der Zeitverteilung informieren zu lassen. Neben den regelmäßigen Informationsveranstaltungen für die interessierten Bürger ist die PTB auch bei der Beratung des Fachpubli-

Bild 2: Expansion und Fall einer Wolke von 10 Millionen Strontiumatomen, wie sie in einer optischen Atomuhr präpariert werden. Der zeitliche Abstand zwischen den Bildern (1,7 mm x 1,9 mm) beträgt 2 Millisekunden.



kums aktiv. So ist z. B. gegenwärtig Dr. Andreas Bauch, der Leiter der Arbeitsgruppe *Zeitübertragung* als Distinguished Lecturer der IEEE-UFFC international ausgezeichnet worden. Zusätzlich organisierte die PTB im vergangenen Jahr in Braunschweig auch das 20. European Time and Frequency Forum (s. Nachrichten des Jahres).

### Quantenoptik und Längeneinheit

Gemeinsam mit dem Fachbereich *Zeit und Frequenz* werden Forschungsarbeiten zu optischen Frequenznormalen mit Neutralatomen, die Weiterentwicklung der Methoden zur Messung optischer Frequenzen und die Forschung zur Weitergabe optischer Frequenzen über das Telekommunikationsnetz durchgeführt. Seit der Erfindung des Femtosekunden-Frequenzkammgenerators arbeitet die PTB daran, die anfangs energiehungrigen und relativ unhandlichen Aufbauten zu kompakten und leicht zu transportierenden Geräten weiterzuentwickeln und zu charakterisieren. Im vergangenen Jahr wurde ein faserbasierter transportabler Frequenzkamm (Bild 3) für Messungen von unterschiedlichen optischen Frequenzen in Kooperationen in Hannover und Paris eingesetzt. Für die Messungen mit dem *Laboratoire national de métrologie et d'essais – Systèmes de Référence Temps Espace* (LNE-SYRTE) in Paris konnte dabei die optische Frequenz auf die dort vorhandene Caesiumfontänenuhr als höchstgenaue Referenz

zurückgeführt werden, während für die Messungen in Hannover eine transportable kommerziell erhältliche Caesiumatomuhr mit geringerer Genauigkeit und Stabilität eingesetzt werden musste.

Um für wissenschaftliche und andere Anwendungen überall die Genauigkeit und Stabilität der besten Caesiumatomuhren zur Verfügung zu haben, wird gegenwärtig ein Konzept untersucht, wie optische Frequenzen höchster Genauigkeit über das vorhandene Lichtleitfasernetz für die Telekommunikation weitergegeben werden können. Dazu wird in der PTB die Frequenz eines Lasers, dessen Wellenlänge im Infraroten über das Telekommunikationsfasernetz übertragen werden kann, mit Hilfe des Frequenzkamms an die Frequenz einer Atomuhr angeschlossen. Die über das Fasernetz übertragene optische Frequenz wird beim Nutzer mit einem zweiten Frequenzkammgenerator umgesetzt und für die höchstgenaue Messung und Erzeugung anderer optischer Frequenzen genutzt. Die flächendeckende Realisierung dieser Vision würde es der PTB erlauben – ähnlich wie bei der Übertragung über den Langwellensender DCF77 – überall dort, wo ein geeigneter Faseranschluss vorhanden ist, optische Frequenzen mit der gleichen Genauigkeit und Stabilität wie in der PTB zur Verfügung zu stellen. Im vergangenen Jahr wurde ein Zugang der PTB zum deutschen Forschungsnetz geschaffen (s. Nachrichten des Jahres) und die

prinzipielle Eignung dieses Konzeptes gezeigt. Weitergehend wird in Kooperationen mit der *Universität Hannover* die Realisierung einer direkten Kurzstreckenverbindung, mit dem *Max-Planck-Institut für Quantenoptik* in Garching eine Mittelstreckenver-

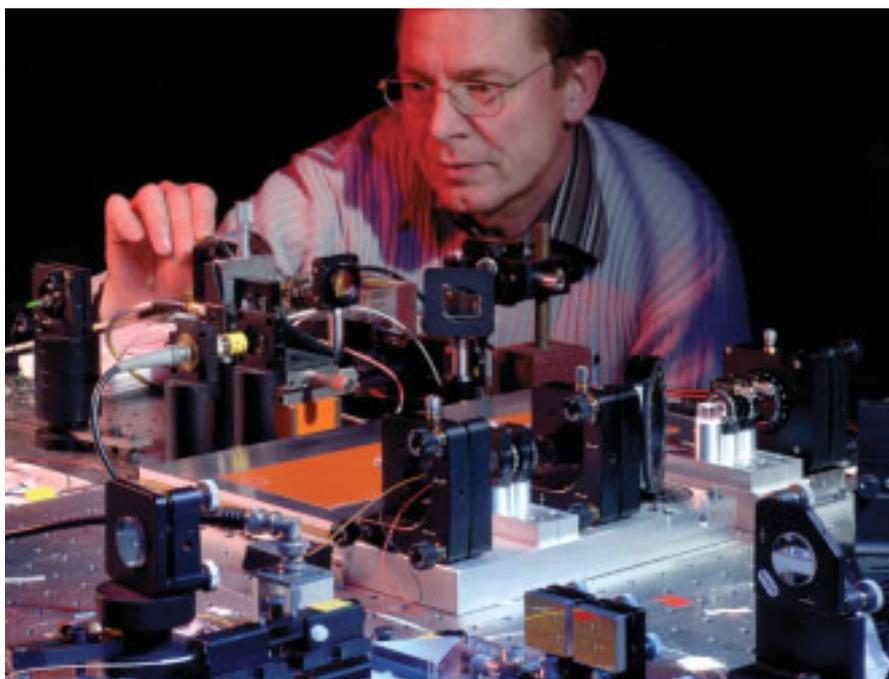


Bild 3: Optischer Frequenzkammgenerator für die höchstgenaue Messung und Übertragung optischer Frequenzen.

bindung mit optischen Verstärkerstationen und mit dem LNE-SYRTE in Paris die Möglichkeit einer europäischen Langstreckenverbindung untersucht.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten im Fachbereich *Quantenoptik und Längeneinheit* betrifft die Röntgenmetrologie. Mit ihr wird gegenwärtig die Wellenlängendarstellung des Meters in den Röntgenbereich ausgedehnt, um die kürzeren Wellenlängen der Röntgenstrahlen zu nutzen, beispielsweise für Anwendungen in der Nanometrologie.

Dazu wird der Gitterparameter des Siliziums als Längenstandard im Subnanometer-Bereich mit relativen Unsicherheiten von typischerweise  $10^{-8}$  benutzt. Der begrenzende Faktor ist die Veränderung des Gitterparameters durch Verunreinigungen und durch Unterschiede im Isotopenverhältnis. Um einen besseren Standard auf dieser Längenskala zu definieren, soll die Wellenlänge der  $^{57}\text{Fe}$ -Mößbauer-Strahlung  $X_M = 0,086 \text{ nm}$  (Photonenenergie  $E_M = 14,4125 \text{ keV}$ ) in der Längeneinheit Meter absolut gemessen werden. Da die relative spektrale Breite der Mößbauer-Strahlung  $3 \cdot 10^{-13}$  beträgt, liegt die erreichbare relative Unsicherheit bei der Wellenlängenbestimmung in der gleichen Größenordnung. Um dieses Ziel zu erreichen, wird gegenwärtig ein kombiniertes durchstimmbares Fabry-Perot-Interferometer für Mößbauer-Strahlung und sichtbares Licht entwickelt.

Die gleichen Techniken der Röntgenmetrologie können für die Messung von speziellen Kombinationen von Naturkonstanten eingesetzt werden. An der Hochfluss-Neutronen-Quelle des Instituts *Laue-Langevin* in Grenoble bestimmt die PTB in Zusammenarbeit mit dem *Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica* (INRIM), dem *National Institute of Standards and Technologies*, Gaithersburg, USA, dem *Maier-Leibnitz-Laboratorium der LMU* und *TU München*, Deutschland (MLL), und dem *Institut Laue-Langevin*, Grenoble, Frankreich (ILL), mit einem Doppelkristall-Spektrometer die molare Planckkonstante. Hierfür werden die Wellenlängen von Gamma-Zerfallslinien mittels Laue-Streuung an perfekten Si-Kristallen ermittelt. Weiterhin kann aus diesen Messungen die relative Neutronenmasse ermittelt werden. Implizit ergibt sich auch eine mögliche Verifikation der Gitterparame-

terbestimmung für das internationale Avogadro-Projekt (s. Jahresbericht 2005).

## Photometrie und angewandte Radiometrie

Im Fachbereich *Photometrie und angewandte Radiometrie* werden vordringlich die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe verschiedenster untereinander verknüpfter photometrischer und zugehöriger radiometrischer Einheiten bearbeitet. Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten konzentrieren sich – neben der Weiterentwicklung der Kalibrierketten vom Kryoradiometer zu den verschiedenen radiometrischen und photometrischen Referenznormalen – auf die Goniophotometrie, Anwendungen in Photometrie und Colorimetrie, die optische Nachrichtenübertragung, die Laserradiometrie, die Photovoltaik und die UV-Dosimetrie. Mit dem Einzug in den neu errichteten Albert-Einstein-Bau lag in den letzten Jahren der Schwerpunkt in der Forschung und Entwicklung hauptsächlich auf der Erstellung einer neuen messtechnischen Basis zur Darstellung und Weitergabe der Einheiten mit verringerten Unsicherheiten. Das gegenwärtig vordringlich verfolgte Ziel besteht jetzt darin, die erreichten Unsicherheiten auf kurzem Wege mit kleinem Aufwand und geringstmöglichen Kosten zu den Anwendern zu bringen. Ein Beispiel soll das erläutern.

Array-Spektroradiometer, bei denen die zu untersuchende Strahlung in einem Gitter spektral aufgefächert und auf einem Diodenarray parallel nachgewiesen wird, werden wegen ihres kompakten und unempfindlichen Aufbaus, ihres Preises und ihrer hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit in immer größerem Umfang in der quantitativen Messtechnik und dem Qualitätsmanagement der Industrie eingesetzt. Als größter Nachteil derartiger Spektroradiometer gelten ihr begrenzter Dynamikbereich, die schlechte Streulichtunterdrückung sowie mögliche Einflüsse von Fluoreszenz und spiegelnden Reflexen (z. B. durch Ordnungsfiler) innerhalb der Spektroradiometer.

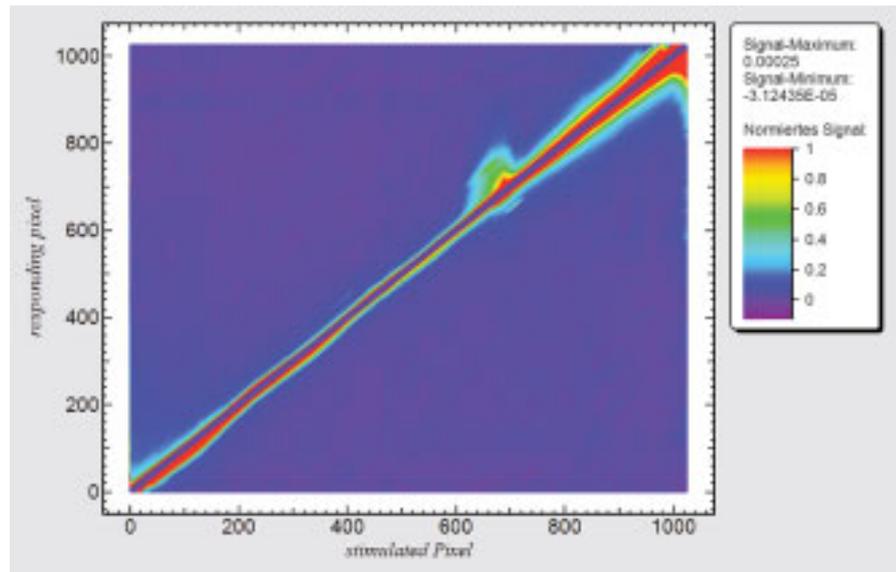
Es wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem mit gepulster Strahlung Messfehler durch Streulicht, Fluoreszenz, höhere Ordnungen und spiegelnde Reflexe sich nahezu vollständig korrigieren lassen, wenn zu jeder gemess-

Bild 4: Visualisierung der Streulichtmatrix eines Array-Spektrometers

senen Wellenlänge die durch andere Wellenlängenbereiche der eingekoppelten Strahlung hervorgerufenen Signalanteile abgezogen werden. Technisch kann dies realisiert werden, indem mit Hilfe der

Messung durchstimmbarer monochromatischer Laserstrahlung eine Streulicht-Korrekturmatrix (Bild 4) bestimmt wird, die jedem der  $n$  Pixel des Detektorarrays einen  $n$ -dimensionalen Streulichtvektor zuordnet (s. Nachrichten aus der Abteilung). Der Dynamikbereich von Array-Spektroradiometern lässt sich durch dieses Streulicht-Korrekturverfahren um bis zu zwei Größenordnungen steigern.

Der Bedarf an messtechnischem Know-how und messtechnischer Erfahrung in der Photometrie aufgrund neuartiger Lichtquellen und Photometer steigt ständig. Gleichzeitig wachsen die bereits erhöhten Anforderungen an die industrielle Messtechnik im Rahmen der Qualitätssicherung und der Qualitätskontrolle. Die PTB führt daher jährlich ein spezielles Seminar über photometrische Messtechnik für Lichttechniker und Ingenieure durch, das stets kurz nach der Ankündigung ausgebucht ist. Vom 12.–17. Juni 2006 fand in Braunschweig in einer kombinierten Veranstaltung das zweite Expertensymposium über Messunsicherheiten in der Photometrie und Radiometrie sowie das Arbeitstreffen der Technischen Komitees der Division 2 „Physikalische Messung von Licht und Strahlung“ statt. Die hohe Zahl von über 140 Teilnehmern aus 32 Nationen, die auch die neuen Laboratorien im Albert-Einstein-Bau besichtigen konnten, sowie die ausgesprochen positive Resonanz zeigen den hohen Stellenwert, den die Photometrie der PTB auf internationaler Ebene hat. Die Tagungen wurde von der PTB in Zusammenarbeit mit dem *Deutschen Nationalen*



*Komitee der CIE (DNK), der Lichttechnischen Gesellschaft (LiTG) sowie der Deutschen Farbwissenschaftlichen Gesellschaft (DFWG) veranstaltet.*

### Bild- und Wellenoptik

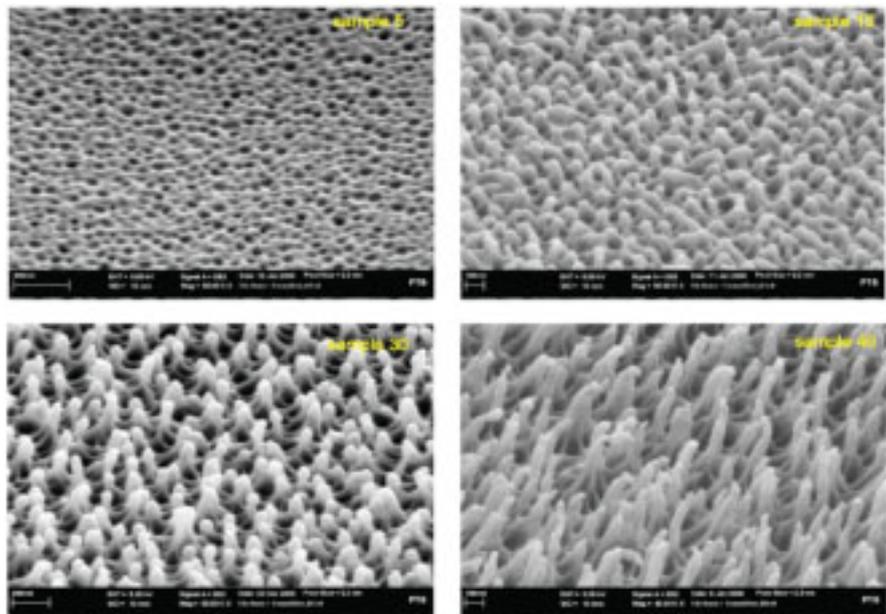
Im Fachbereich *Bild- und Wellenoptik* werden Grundlagenuntersuchungen zur quantitativen Mikroskopie an Oberflächenstrukturen im Mikrometer- und Submikrometerbereich zur dimensionellen Messung an Mikro- und Nanostrukturen mit mikroskopischen Verfahren durchgeführt. Für die ultrapräzise Messung optischer Funktionsflächen werden neue Messverfahren mit Unsicherheiten bis in den Subnanometerbereich entwickelt. Ein gegenwärtiger Schwerpunkt betrifft dabei die Untersuchung und Modellierung der Wechselwirkungen von nanoskaligen Strukturen mit elektromagnetischer Strahlung im Hinblick auf Anwendungen für höchstauflösende Messverfahren. Ziel ist die Entwicklung dimensioneller optischer Messtechnik für zukünftige industrielle Anforderungen insbesondere im Bereich der Nanotechnologie und der Halbleiterindustrie.

Mit immer kleiner werdenden Strukturbreiten z. B. bei Lithographiemasken stoßen abbildende Verfahren jedoch an die Beugungsgrenze. Alternativ können hier nichtabbildende Verfahren zum Einsatz kommen. Zu diesem Zweck wurde ein neuartiges Deep UV-Scatterometer entwickelt und aufgebaut (Bild 5). Die Anlage ermöglicht eine Vielzahl verschiedener Messmodi, wie Scatterometrie, ellipsometrische Scatterometrie, polarisations-



Bild 5: Das neue Deep UV-Scatterometer der PTB.

Bild 6: Nanostrukturierte Oberflächen zeigen eine starke Abhängigkeit der Oberflächenstruktur und der optischen Eigenschaften vom Beschichtungsprozess.



abhängige Reflektometrie und zusätzlich – unter Verwendung einer breitbandigen Strahlungsquelle – spektrale Ellipsometrie und spektrale Reflektometrie.

Die speziellen Messeinrichtungen werden mit hoher Auslastung – neben ihrem Einsatz bei Kalibrierungen – auch in Kooperationen mit industriellen Partnern genutzt, bei denen in enger Zusammenarbeit mit der Industrie ein zeitnaher Transfer der entwickelten Methoden und der gewonnenen Erkenntnisse in industrielle Anwendungen erreicht wird. So zeigt z. B. eine geeignete stochastische Nanostrukturierung an Kunststoffoberflächen von optischen Funktionsflächen (Bild 6) eine um eine Größenordnung reduzierte optische Reflexion an der Grenzfläche. Die optischen Charakterisierungen in der PTB in Verbindung mit der Modellierung werden dabei zur

Ermittlung optimierter Prozessparameter für die Oberflächenmodifikation genutzt (s. Nachrichten aus der Abteilung).

### Optische Technologien

Der Fachbereich *Optische Technologien* war vor drei Jahren eingerichtet worden, um u. a. die Messmöglichkeiten der PTB auf den Gebieten der Mikro- und Nanooptik und der integrierten Optik zu erweitern, die als Schlüsselkomponenten der Photonik zukünftig immer stärkere Bedeutung haben werden. Für die optische Nachrichtentechnik sind insbesondere mikrostrukturierte photonische Strukturen von Bedeutung, wie sie beispielsweise in mikrostrukturierten Fasern zur Übertragung

ultrakurzer Lichtimpulse mit hoher Spitzenleistung benötigt werden. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 407 „Quantenlimitierte Messprozesse mit Atomen, Molekülen und Photonen“ mit der *Universität Hannover* wurde ein neuartiges Messverfahren zur Bestimmung kleinster Nichtlinearitäten entwickelt und erstmals auf eine kommerziell erhältliche photonische Kristallfaser aus Quarzglas mit Hohlkern angewendet (Bild 7). Mit dem Verfahren konnte die effektive Nichtlinearität, die gegenüber einer Vollkernstandardfaser etwa tausendfach reduziert ist, genau bestimmt werden (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Für eine Vielzahl von Anwendungen im Bereich der optischen Technologien, aber auch als Normale für die Papier- oder Textilindustrie sind diffuse Reflexionsmaterialien wichtige Kalibrierstandards. Mit dem neu entwickelten Robotergonioreflektometer der PTB (s. Jahresbericht 2005) sind auf Grund der höheren Stabilität und verbesserten Reproduzierbarkeit jetzt systematische Untersuchungen an verschiedenen Reflexionsmaterialien möglich. In einer Studie mit gängigen und neuen Reflexionsmaterialien wurden jetzt unerwartete Abhängigkeiten der Reflexion von der Winkelorientierung der Probe relativ zur Ebene gefunden, welche durch den einfallenden und reflektierten Strahl aufgespannt wird. Dabei können auch kleine Verdrehungen um die Achse der Oberflächennormale zu Änderungen des reflektierten Strahldichtesignals bis in den Prozentbereich führen, ohne dass die Proben unter einem Mikroskop offensichtliche Oberflächenstrukturen zeigen. Mit den jetzt routinemäßig angebotenen zusätzlichen Untersuchungen wird eine kleinere Unsicherheit bei Standards der diffusen Reflexion erreicht.

### Joint Optical Metrology Center

Die optische Metrologie ist unverzichtbare Grundvoraussetzung für alle optischen Schlüsseltechnologien. Sie liefert die wissenschaftliche und technologische Basis der Messtechnik, ihrer Korrektheit und ihrer Vergleichbarkeit. Damit nimmt sie eine Schlüsselstellung bei der Entwicklung neuer optischer Bauelemente und Technologien ein. Um die Zusammenarbeit mit der *Technischen Universität Braunschweig* auf dem Gebiet der

optischen Metrologie zu stärken, wurde zwischen der *Technischen Universität* und der *Physikalisch-Technischen Bundesanstalt* ein gemeinsames optisches Metrologiezentrum (Joint Optical Metrology Center; JOMC) gegründet. Im Zentrum soll für ausgewählte Projekte die vollständige Kette von einer neuartigen Idee, der Evaluierung des passenden metrologischen Konzeptes bis zur Realisierung eines Prototyps bearbeitet werden. Die Vision des JOMC ist es, die Grenzen optischer Messtechnik zu erweitern und neue metrologische Applikationen vorzugsweise im Sichtbaren und Nah-Infraroten zu begründen. Bisher messtechnisch nicht genutzte Frequenzbereiche werden erschlossen. Die Forschung im JOMC soll zu innovativen Technologien und Abläufen führen sowie zu Prototypen mit neuartigen Eigenschaften bei reduzierten Produktionskosten und standardisiertem, validiertem Verhalten. Als erste Schwerpunkte werden die Arbeitsgebiete Quantitative Detektierung und Identifikation von Nanopartikeln, die Fluoreszenzkennzeichnung und -identifikation in Bio- und Medizintechnologie, Gassensoren, Quantitative Detektion elektromagnetischer Felder und Quanten-Kommunikation bearbeitet.

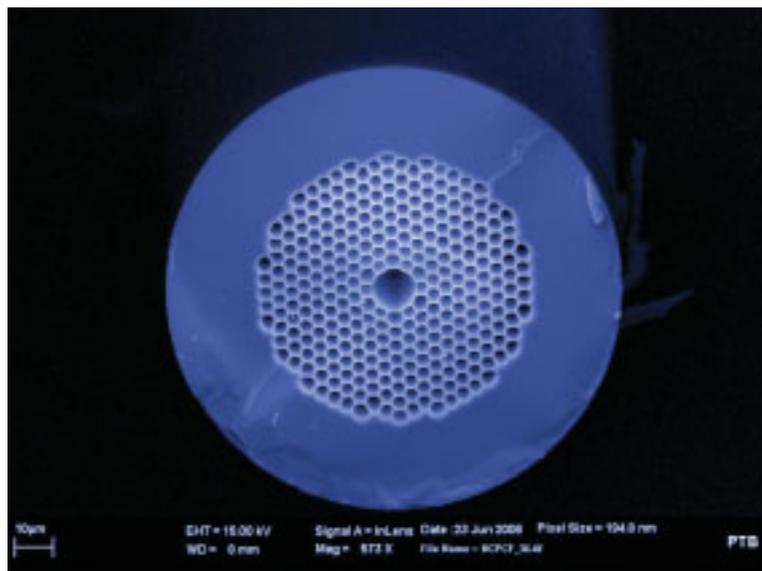


Bild 7: Mikrostrukturierte photonische Hohlkernfaser, wie sie zukünftig für die optische Datenkommunikation genutzt wird.

# In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

## Grundlagen der Metrologie

### Strahlergestützte Spektroradiometrie

Zur Darstellung und Weitergabe der spektralen Bestrahlungsstärke von Strahlern im Gesamt-Spektralbereich von 200 nm bis 2500 nm wurde ein neues Messsystem entwickelt und aufgebaut. Die wesentlichen Komponenten sind zwei Hochtemperatur-Hohlraumstrahler mit Betriebstemperaturen bis zu 3500 K, mehrere für den Spektralbereich von 200 nm bis 2500 nm optimierte Spektroradiometer sowie verschiedene Messplätze zur Charakterisierung von Strahlernormalen. (P. Sperfeld, FB 4.1, [peter.sperfeld@ptb.de](mailto:peter.sperfeld@ptb.de))

### Hochgenaue Winkel-Justage beim deflektometrischen Rastern

Für die Topographiemessung optischer Planflächen bis 500 mm Durchmesser mit Messunsicherheiten von unter einem Nanometer hat die PTB bereits früher eine Messeinrichtung aufgebaut, die auf Differenzmessungen von Reflexionswinkeln an der Prüflingsoberfläche mit großem lateralen Versatz beruht. Ein neu entwickeltes Verfahren erlaubt nun eine schnelle und hochgenaue In-Situ-Justage aller relevanten Winkel der optischen Komponenten und des Prüflings in der Anlage relativ zu den Achsen des Winkelmessgeräts (Autokollimator). Diese erfolgt automatisiert vor jedem Messzyklus mit einer Genauigkeit von unter einer Winkelsekunde. (R. D. Geckeler, FB 4.2, [ralf.geckeler@ptb.de](mailto:ralf.geckeler@ptb.de))

### Leistungssteigerung einfacher Array-Spektroradiometern durch Anwendung von Streulichtmatrizen

Kompakte Array-Spektroradiometer gewinnen wegen Ihrer hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit zunehmend an Bedeutung in der Prozess- und Produktionskontrolle. Der Leistungs- und Dynamikbereich von Array-Spektroradiometern wurde durch ein neues Streulicht-Korrekturverfahren um bis zu zwei Größenordnungen gesteigert. Die hierzu erforderlichen Streulichtmatrizen werden mit einem Lasersystem durchstimmbarer Wellenlänge bestimmt. (A. Sperling, FB 4.1, [armin.sperling@ptb.de](mailto:armin.sperling@ptb.de))

### Picometer-Messunsicherheit bei der Kalibrierung der Gitterkonstante ein- und zweidimensionaler Gitter mit Hilfe optischer Beugung

Mit einem neuen Messplatz kann die Gitterkonstante von ein- und zweidimensionalen Gittern im Bereich von 300 nm bis 3 µm mit einer Messunsicherheit (95 %-Vertrauensintervall) von weniger als 20 pm gemessen werden. Das Messprinzip nutzt die optische Beugung von Laserstrahlung. (E. Buhr, FB 4.2, [egbert.buhr@ptb.de](mailto:egbert.buhr@ptb.de))

### Neuartiges UV-Scatterometer

Es wurde ein neuartiges Scatterometer für den tiefen ultravioletten Spektralbereich entwickelt und aufgebaut, welches eine Vielzahl verschiedener Messmodi wie Scatterometrie, ellipsometrische Scatterometrie und polarisationsabhängige Reflektometrie ermöglicht. Dieses System erlaubt es, periodisch strukturierte Oberflächen sehr genau quantitativ zu charakterisieren. Darüber hinaus sind insbesondere für die Halbleiterindustrie wichtige grundlegende Untersuchungen wie z. B. Müller-Matrix Messungen an 193-nm-Photomasken möglich. (M. Wurm, FB 4.2, [matthias.wurm@PTB.de](mailto:matthias.wurm@PTB.de))

### Einfluss verschiedener Strukturgeometrien in der dimensionellen Mikroskopie an Mikro- und Nanostrukturen besser quantifiziert

Die Einflüsse der Geometrie von Strukturkanten auf die mikroskopische Abbildung der Struktur wurden mittels rigoroser Simulationen sowie mittels Messungen an geeigneten Teststrukturen systematisch untersucht und quantifiziert. Der Vergleich mit Strukturbreitenbestimmungen, die optisch, mit dem Atomkraftmikroskop oder mit dem Rasterelektronenmikroskop ermittelt wurden, zeigen damit nun auch für komplexe Strukturen eine sehr gute Übereinstimmung. (B. Bodermann, FB 4.2, [bernd.bodermann@ptb.de](mailto:bernd.bodermann@ptb.de))

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

Die überragende Stabilität einer optischen Referenzfrequenz lässt sich mit Hilfe eines Frequenzkammes und dem in der PTB entwickelten Transferverfahren in den Mikrowellenbereich übertragen und dort zur Frequenzstabilisierung eines Mikrowellenoszillators nutzen. (H. Schnatz, FB 4.3, harald.schnatz@ptb.de)

### Hochpräzise Phasenrauschmessungen von Mikrowellenoszillatoren mit dem optischen Frequenzkamm

Die Stabilität optischer Uhren übertrifft die der klassischen, auf Mikrowellenübergängen basierenden Uhren um Größenordnungen. In Verbindung mit einem Femtosekunden-Kammgenerator und dem in der PTB entwickelten Transferverfahren wurde die Stabilität aus dem optischen Bereich in den Mikrowellenbereich übertragen und dort für die Analyse von Mikrowellenoszillatoren genutzt. Bei diesem Ansatz ist von entscheidender Bedeutung, dass das Eigenrauschen des Kammgenerators mit Hilfe des Transferverfahrens vollständig eliminiert werden kann. (H. Schnatz, FB 4.3, harald.schnatz@ptb.de)

### Transportabler Frequenzkammgenerator

In einer Zusammenarbeit mit der *Universität Hannover* wurde ein transportabler Frequenzkamm benutzt, um die Frequenzen der Kalium-D-Linien der Isotope  $^{39}\text{K}$ ,  $^{40}\text{K}$  und  $^{41}\text{K}$  mit einer Genauigkeit von  $2 \cdot 10^{-10}$  und spinverbotene Übergänge im Kalium-Dimer zu messen. Die Frequenz des Uhrenüberganges  $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_1$  des optischen Magnesium-Frequenznormal wurde atominterferometrisch spektroskopiert und erstmalig dessen Frequenz gemessen. (H. Schnatz, FB 4.3, harald.schnatz@ptb.de)

### Höchstgenauer Vergleich weit entfernter optischer Frequenzen

Zur Charakterisierung der Frequenzstabilität der beiden Abfragelaser für das Calciumfrequenznormal und die Ytterbium-Einzelionenuhr wurde ein faserbasierter optischer Frequenzkamm eingesetzt. Über eine Frequenzdifferenz von 130 THz hinweg konnten die beiden Laserlinienbreiten im Bereich weniger Hz charakterisiert werden. (U. Sterr, FB 4.3, uwe.sterr@ptb.de)

### Ultrakalte Strontium-Atome für eine optische Gitteruhr

Als wichtiger Schritt zu einer zukünftigen Gitteruhr mit Strontium wurde eine Apparatur zur Kühlung und zum Einfang ultrakalter Strontium-Atome fertig gestellt. Damit ist es jetzt möglich, innerhalb weniger Millisekunden ca.  $10^7$  Atome bis auf eine Temperatur von 1  $\mu\text{K}$  abzukühlen, um sie dann zukünftig in einem optischen Gitter zu speichern. (U. Sterr, FB 4.3, uwe.sterr@ptb.de)

### Relative Messunsicherheit des Si-Gitterparameters erreicht $1 \cdot 10^{-8}$

Nachmessungen des Gitterparameters aller im internationalen Avogadroprojekt benutzten Siliziumkristalle ergaben 2006 innerhalb weniger  $10^{-9}$  denselben Wert und bestätigten den 1981 von der PTB veröffentlichten Wert. In Zusammenarbeit mit dem *Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica* (INRIM) wurde eine relative  $1\sigma$ -Messunsicherheit von  $1 \cdot 10^{-8}$  erreicht. Den größten Beitrag verursachte die Temperaturbestimmung des Kristalls mit  $0,52 \cdot 10^{-8}$ . Diese Ergebnisse wurden CODATA für neue Ausgleichsrechnungen übermittelt. (P. Becker, FB 4.3, peter.becker@ptb.de)

### Röntgenoptik für inelastische Streuung von Röntgenstrahlung

Die Winkeldispersion in asymmetrischen Röntgenreflexen an Kristallen, deren Außenflächen nicht parallel zu den reflektierenden Netzebenen geschnitten sind, wurde zum ersten Mal zur hochauflösenden meV-Monochromatisierung von Synchrotronstrahlung bei Photonenenergien unterhalb von 10 keV erfolgreich angewandt. Damit ist es möglich, Experimente zur inelastischen Röntgenstreuung auch an neuen niederenergetischen Synchrotronstrahlungsquellen durchzuführen. (U. Kuetgens, FB 4.3, ulrich.kuetgens@ptb.de)

### Wie „wiegt“ man die Oxidschicht einer Siliziumkugel?

Nach der thermischen Oxidation einer Testkugel aus Silizium, wie sie für das internationale Avogadroprojekt benötigt wird, konnte eine eigens entwickelte Messstrategie zur „Wägung“ der Oxidschicht der Avogadrokugel erfolgreich getestet werden. Hierzu wird die mittlere Schichtdicke mit Röntgenreflektometrie und Ellipsometrie bestimmt und mit dem zusätzlich neu gemessenen Wert für die Dichte der  $\text{SiO}_2$ -Schicht wird eine „Wägung“ des Oxids erstmals möglich. (I. Busch, FB 4.3, ingo.busch@ptb.de)

### Solitonen auf der Basis von Mikroresonator-Polaritonen

Für die optische Informationsverarbeitung und -speicherung sind Resonator-Solitonen interessant. Gegenüber den bereits früher in Halbleiter-Mikroresonatoren demonstrierten Solitonen sollten Polariton-Materialien auf Grund der verwendbaren Materialeigenschaften größere Designfreiheit und damit flexiblere Solitoneneigenschaften erlauben. Es gelang erstmals, in einem solchen Material räumliche Resonatorsolitonen zu realisieren.

(C. O. Weiss, FB 4.4, carl.weiss@ptb.de)

### Einfluss von Störfeldern auf die Genauigkeit von Atomuhren

Experimentelle Untersuchungen und ihre Beschreibung durch ein theoretisches Modell klären jetzt die Einflüsse kleinster elektromagnetischer Störfelder auf die Frequenz von Atomuhren. Die Untersuchungen ergaben mehrere bisher nicht bekannte Störphänomene. Das gewonnene Modell erlaubt jetzt eine verlässliche Abschätzung der Ungenauigkeit durch mögliche Stör- und „Leckfelder“.

(S. Weyers, FB 4.4, stefan.weyers@ptb.de)

### Elimination der Frequenzverschiebung durch kalte Stöße von Cäsium-Fontänen-uhren

Durch unabhängige Messungen an Fontänen-Atomuhren in der PTB und am NPL (England) konnte ein detailliertes Verständnis des Einflusses der atomaren Stöße auf die Uhrenfrequenz erreicht werden. Die Stoßverschiebung ist einer der dominierenden Beiträge zur Unsicherheit von Fontänenuhren. Neben einer nun möglichen genauen Abschätzung der Unsicherheit durch atomare Stöße zeigte sich auch, dass bei bestimmten Parametern die Stoßverschiebung verschwindet.

(S. Weyers, FB 4.4, stefan.weyers@ptb.de)

### Gravitationskorrektur für Atomuhren

Entsprechend der allgemeinen Relativitätstheorie ändert sich der Gang einer Uhr um etwa  $1,1 \cdot 10^{-16}$  pro Meter Höhe im Schwerfeld an der Erdoberfläche („Geoid“). In Zusammenarbeit mit dem *Institut für Geodäsie* der TU Braunschweig wurden für mehrere Punkte in der Uhrenhalle der PTB die Höhe über dem Geoid mit einer Unsicherheit von 2,5 cm bestimmt. Damit ist der Einfluss des Schwerfeldes auf den Atomuhrengang bis auf  $3 \cdot 10^{-18}$  bestimmbar. (R. Wynands, FB 4.4, robert.wynands@ptb.de)

### Inbetriebnahme der zweiten Cs-Fontänen-uhr der PTB

Eine experimentelle Überprüfung der für Atomuhren abgeschätzten Genauigkeiten wird mit hoher Genauigkeit erst durch Vergleich zweier Uhren am selben Ort möglich. Deshalb hat die PTB eine zweite Fontänenuhr ( $\text{CsF}_2$ ) entwickelt und jetzt in Betrieb genommen. (R. Wynands, FB 4.4, robert.wynands@ptb.de)

### Kalibrierung von Zweiweg-Satelliten-Zeitvergleichseinrichtungen in Europa

Mehrere europäische Zeitinstitute haben erhebliche Anstrengungen unternommen, die Genauigkeit der internationalen Zeitvergleiche zu verbessern. In Zusammenarbeit mit SP (Schweden), VSL (Niederlande), NPL (UK), LNE-SYRTE (Frankreich), INRIM (Italien), TUG (Österreich) und METAS (Schweiz) hat die PTB eine Kampagne zur Kalibrierung der Laufzeit der Signale in Zeitvergleichseinrichtungen durchgeführt, mit der die Unsicherheit der Zeitübertragung auf 1 ns gewährleistet werden kann. (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

### Engere Grenzen für die zeitliche Variation von Naturkonstanten

Aus neuen, in der Genauigkeit verbesserten Messungen der Frequenz eines Yb-Einzelionen-Frequenzstandards konnte eine engere Grenze für mögliche zeitliche Änderungen der Feinstrukturkonstante abgeleitet werden. Bei der derzeitigen Messgenauigkeit sind diese Messungen über wenige Jahre bereits genauer als komplementäre astrophysikalische Messungen, die Daten über einen Zeitraum von 10 Milliarden Jahren auswerten. (E. Peik, FB 4.4, ekkehard.peik@ptb.de)

### Laserfrequenzstabilisierung auf ein einzelnes Ion

Bei den zukünftigen optischen Uhren mit einzelnen Ionen wird dessen Resonanz mit einem Laser abgefragt, wobei die Signale zur Regelung der (Laser-) Strahlungsquelle entsprechend sehr schwach sind. Es wurde ein Verfahren zur optimalen Nutzung der Signalinformationen für die Laserfrequenzregelung entwickelt. Mit diesem zeigt das Ytterbium-Einzelion-Laserfrequenznormal der PTB eine etwa 10-mal höhere Frequenzstabilität als die besten Cs-Fontänenuhren, obwohl diese mehrere Millionen Atome benutzen. (Chr. Tamm, FB 4.4, christian.tamm@ptb.de)

### Charakterisierung photonischer Kristalle

In einer Kooperation mit der *Universität Twente* wurden spezielle durch Laser-Interferenz-Lithographie hergestellte Si-Lochstrukturen, die als mikro-strukturierte Bauelemente einer zukünftigen integrierten Optik dienen können, hinsichtlich ihres Reflexions- und Transmissionsverhaltens in transversaler Geometrie untersucht. (A. Schirmacher, FB 4.5, alfred.schirmacher@ptb.de)

### Optische Nichtlinearität von Hohlkernfasern

Im Fachbereich *Optische Technologien* wurde ein hochempfindliches Messverfahren zur Bestimmung kleinster optischer Nichtlinearitäten entwickelt und erstmalig auf eine photonische Hohlkern-Kristallfaser aus Quarzglas angewendet. Der gemessene Wert ist etwa 1000-mal kleiner als bei Vollkern-Standardfasern und stammt etwa zu gleichen Teilen aus der Luft im Hohlkern und aus der photonischen Bandlückenstruktur, in die das evaneszente Feld geringfügig eindringt. (H. Telle, FB 4.5, harald.telle@ptb.de)

## Metrologie für die Wirtschaft

### Stochastische Nanostrukturierung ermöglicht breitbandige Entspiegelung von Kunststoffoptiken

Die Grenzflächenreflexion optischer Strahlung an Kunststoff-Oberflächen kann durch eine geeignete stochastische Strukturierung der Oberfläche im Subwellenlängenbereich von rund 4 % auf etwa 0,5 % reduziert werden. Die Nanostrukturierung gelingt mit einem speziellen Plasma-Ätzverfahren. (E. Buhr, FB 4.2, egbert.buhr@ptb.de)

### Neues Photometerbanksystem zum Einheiten-Transfer für Industrie und Forschung wesentlich erweitert

Die Messmöglichkeiten am neuen Photometerbanksystem der PTB wurden wesentlich erweitert, so dass jetzt auch Kalibriermöglichkeiten für großflächige Lichtquellen, Luxmeter mit Beleuchtungsstärken bis 20 klx und Transfernormale für die Leuchtdichte bis 10 kcd/m<sup>2</sup> verfügbar sind. Das Photometerbanksystem, mit dem im Jahr 2006 etwa hundert Kalibrierungen von Transfernormalen für Lichtstärke, Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte und Verteilungstemperatur durchgeführt wurden, steht als „European Major Investment“ zukünftig auch für Europas Metrologie bereit. (D. Lindner, FB 4.1, detlef.lindner@ptb.de)

### Leistungsangebot der PTB im Bereich der Kalibrierung von Laserleistungsempfängern deutlich erweitert

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde ein Diodenlasermessplatz mit Freistrahldioden der Wellenlängen 808 nm, 915 nm, 940 nm und 980 nm für Strahlungsleistungen bis zu 25 W aufgebaut. Die erreichten erweiterten relativen Messunsicherheiten ( $k = 2$ ) betragen 0,4 %. Damit wird der Industrie die Rückführung der Messung von Diodenlaserleistung auf nationale Normale der PTB auch in diesem hohen Leistungsbereich ermöglicht. (S. Kück, FB 4.1, stefan.kueck@ptb.de)

### **Erfolgreicher DKD-Ringvergleich zur Strahlungsleistung in der optischen Nachrichtentechnik**

Durch einen von der PTB initiierten und organisierten Ringvergleich wurde die Leistungsfähigkeit der Kalibrierlaboratorien des Deutschen Kalibrierdienstes bzgl. der optischen Strahlungsleistung in der optischen Nachrichtentechnik erfolgreich demonstriert. Der vollständige Abschlussbericht ist unter <http://www.dkd.info/dkd-ring/optstrahlungsleistung.pdf> einzusehen. (S. Kück, FB 4.1, stefan.kueck@ptb.de)

### **Virtuelles Experiment für die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur hochgenauen Asphärenmessung**

Für die Messung von Synchrotronstrahlungsoptiken ist ein neues, interferometrisches Messverfahren zur hochgenauen Messung von Asphären mit Krümmungsradien im Bereich von 2,5 cm bis 10 m zu entwickeln. Um die im Projektziel angestrebte Unsicherheit von  $5 \cdot 10^{-7}$  rad für die ermittelten Winkeltangenten zu realisieren, wurde ein virtuelles Experiment entwickelt, das die Simulation und Analyse von Messungen unter Berücksichtigung der relevanten Unsicherheitsquellen erlaubt. Als Ergebnis konnte eine Messanordnung ermittelt werden, die es erlaubt, die angestrebten Genauigkeiten zu realisieren, und die die Basis für das neue Messverfahren bildet. (R. Geckeler, FB 4.2, ralf.geckeler@ptb.de)

### **Zur Rotationsinvarianz von Reflexionsnormalen**

Mit dem neuen Gonioreflektometer der PTB wurden an 16 verschiedenen Reflexionsnormalen Messungen zur Invarianz der Strahlendichte bei Rotation der Proben um die Oberflächennormale durchgeführt. Zusammen mit den verringerten Unsicherheiten bei der Kalibrierung erfordern die gemessenen Variationen im Reflexionssignal von bis zu 2,5 % für eine volle 360°-Rotation zukünftig selektierte Proben und die Angabe der Orientierung. (A. Höpe, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

### **Machbarkeitsstudie für einen hochauflösenden, referenzwellenfreien Wellenfrontsensor**

Im Rahmen eines Drittmittelprojektes wurde zusammen mit der Arbeitsgruppe *Messdatenanalyse und Messunsicherheit* eine Machbarkeitsstudie zur Verbesserung der räumlichen Auflösung von Shack-Hartmann Wellenfrontsensoren durchgeführt. Dabei wurde untersucht, inwieweit durch die Kombination von lateral verschobenen Messungen dieser Sensoren eine Verbesserung der räumlichen Auflösung erreicht werden kann, ohne die sehr gute Genauigkeit einzelner Messungen zu verringern. Als Ergebnis der Studie konnte gezeigt werden, dass bei einer geeigneten Wahl der Lateralverschiebungen und einer geeigneten Analyse der Daten die immanenten Führungsfehler eliminiert sowie die systematischen Sensorfehler ohne Vorabkalibration bestimmt werden können. (A. Wiegmann, FB 4.2, axel.wiegmann@ptb.de)

### **Präzisionspolarimeter der PTB als weltweite Referenz**

Das Präzisionspolarimeter zur Kalibrierung von Quarzkontrollplatten wurde grundlegend modernisiert und automatisiert. Die Gesamtmessunsicherheit des Präzisionspolarimeters liegt jetzt bei  $0,0003^\circ$ . Damit kalibrierte Quarzkontrollplatten werden weltweit z. B. in der Medizin, der pharmazeutischen Industrie, der Zuckerindustrie oder im Weinbau eingesetzt. (A. Fricke, FB 4.2, andreas.fricke@ptb.de)

### **Bestimmung des Reflexionsgrades von hochreflektierenden Spiegeln**

Zur höchstgenauen Messung von Reflexions- und Transmissionsgraden von Laserspiegeln bei 1064 nm mit Reflexionsgraden nahe 100 % wurde ein Messplatz auf der Basis eines Zweistrahlverfahrens entwickelt und aufgebaut. (A. Schirmacher, FB 4.5, alfred.schirmacher@ptb.de)

### **Optische Münzprüfung anhand spektraler Reflexionseigenschaften**

Auf der Basis von Grundlagenuntersuchungen bzgl. der charakteristischen Reflexionsspektren von Münzlegierungen sowie der Struktur-, Polarisations- und Geometrie-Eigenschaften von Münzen wurde ein Demonstrator zur optischen Münzprüfung entwickelt. Das Projekt wurde im Laufe dieses Jahres mit der Übergabe zweier Prototypen an den Projektpartner abgeschlossen. (A. Höpe, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

### **Wortsynchrone optische Abtastung wiederholter Datenworte zur Darstellung ihrer Wellenform**

Ein neuartiges, wortsynchrones Abtastverfahren zur Darstellung der Wellenform wiederholter optischer Datenworte, wie sie standardmäßig zur Charakterisierung höchstbitratiger optischer Systeme eingesetzt werden, wurde mit dem optischen Abtastoszilloskop der PTB implementiert. Erstmals wurde so mit hoher Zeitauflösung und geringer Zeitinstabilität eine Darstellung der echten Wellenform an Stelle eines Augendiagramms möglich. (E. Benkler, FB 4.5, erik.benkler@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

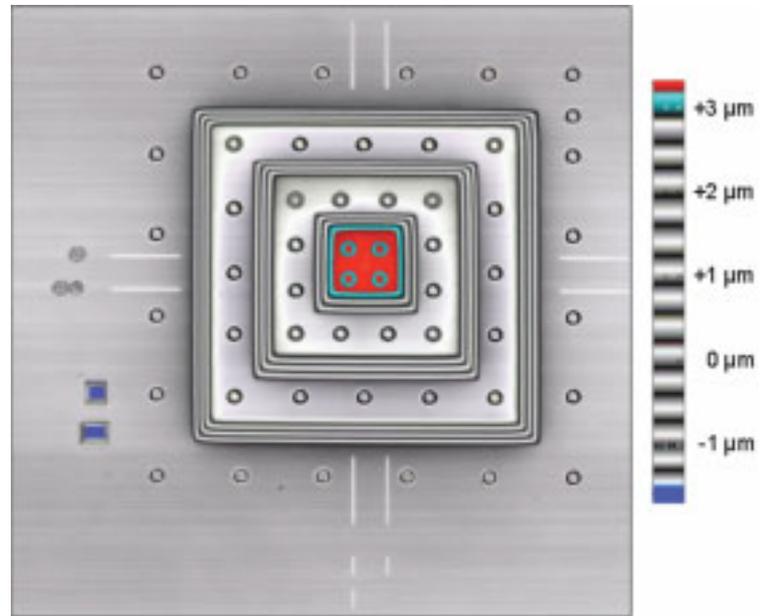
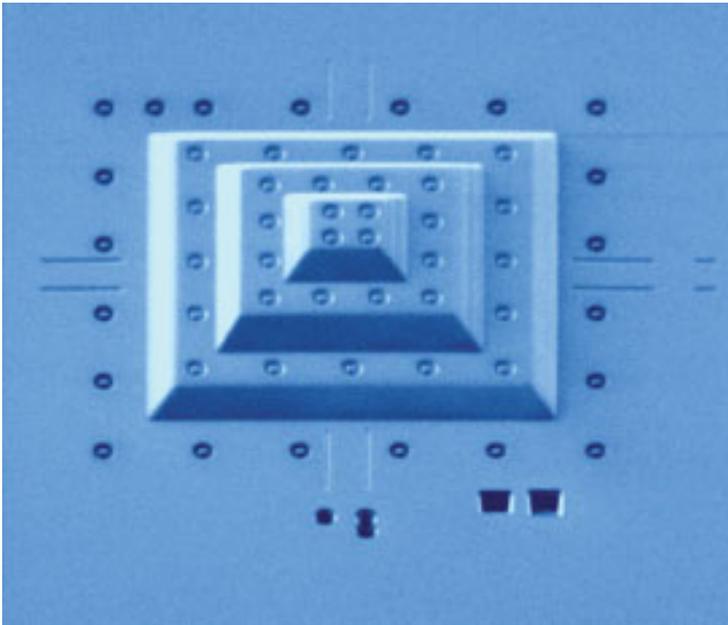
#### **Linearität von Sensoren für die UV-Dosimetrie**

Zur Messung starker UV-Bestrahlungsstärken, wie sie z. B. zur Trinkwasserdesinfektion statt der üblichen chemischen Aufbereitung zunehmend eingesetzt werden, muss die Linearität der verwendeten Sensoren sichergestellt sein. Mit einem modifizierten Messverfahren zur Ermittlung der differentiellen spektralen Empfindlichkeit wurden verschiedene für die UV-Dosimetrie geeignete Detektoren identifiziert und charakterisiert. (S. Winter, FB 4.1, stefan.winter@pbt.de)

### **Zeit für Galileo**

Unter Führung des britischen Consulting-Unternehmens HELIOS entsteht im Auftrag von *Galileo Joint Undertaking*, Brüssel, der *Galileo Time Service Provider* (GTSP). Er stellt den Mittler zwischen einigen europäischen Zeitinstituten, darunter der PTB, und dem Galileo Ground Segment dar. Gemeinsam wird die Galileo-Systemzeit realisiert. Die PTB hat in der Vergangenheit die Anforderungen an den GTSP definiert. Gegenwärtig ist sie beauftragt, die technischen und administrativen Voraussetzungen für die Durchführung von Zeitvergleichen auf der einen Seite zwischen den Elementen des Galileo-Bodensegments und auf der anderen Seite zwischen europäischen Zeitinstituten und dem *United States Naval Observatory* zu schaffen. (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

# Fertigungs- messtechnik



**Berichte der Abteilungen**

**Abteilung**

**5**

# Fertigungs

Die Abteilung Fertigungsmesstechnik bearbeitet zum einen in größerem Umfang Forschungs- und Entwicklungsaufgaben, die aus anwendungsorientierten Fragestellungen bei der Sicherstellung der Rückführung von dimensionellen Messergebnissen in der industriellen Fertigung resultieren. In Ergänzung zu diesen F&E-Aufgaben entwickelt die Abteilung ihr metrologisches Dienstleistungsangebot zielgerichtet weiter. Hierbei ist die Bandbreite der angebotenen Dienstleistungen, beispielsweise festgemacht an den erzielbaren Messunsicherheiten dimensioneller Messgrößen, groß und reicht von Messunsicherheiten im pm-Bereich, z. B. bei der Bestimmung der mittleren Periodenlänge nanostrukturierter Gitterteilungen, die sich über einige mm erstrecken, bis in den mm-Bereich, z. B. bei Entfernungsmessgeräten im Längenmessbereich von einigen 100 m. Die wissenschaftlichen Kurzberichte, die dem Geschäftsbereich „Messtechnik für die Wirtschaft“ zugeordnet sind, geben einen orientierenden Überblick über die entsprechenden Aktivitäten der Abteilung im Berichtsjahr. Auch das Einstiegsbild in den diesjährigen Bericht der Abteilung zeigt ein Beispiel einer anwendungsorientierten Projektarbeit, in diesem Fall war das Ziel der Entwicklung die hoch auflösende dimensionelle Messtechnik an komplexen Objekten mit hohem Aspektverhältnis aus der mikrosystemtechnischen Industrie.

#### Titelbild

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines in der „Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung“ (BAM) neu entwickelten 3D-Mikronormals sowie Darstellung der mit einem Rastersondenmikroskop der PTB bestimmten Messergebnisse an diesem Normaltyp (Rasterbereich:  $34\ \mu\text{m} \times 34\ \mu\text{m}$ ).

Zum anderen ist die Abteilung auch, und zwar in nicht unerheblichem Umfang, bei metrologischen Querschnittsprojekten der PTB aktiv beteiligt, bei denen es um die Weiterentwicklung des SI-Einheitensystems geht. Beispiele hierfür sind das Avogadro-Projekt, bei dem eine Neubestimmung der Avogadro-Konstanten mit einer Unsicherheit von  $2 \cdot 10^{-8}$  im Rahmen der Neudefinition der SI-Einheit für die Masse (kg) angestrebt wird, sowie das Projekt zur Neubestimmung der Boltzmann-Konstante  $k_B$  mit einer Unsicherheit von  $2 \cdot 10^{-6}$ , ein wichtiger Schritt hin zur möglichen Neudefinition der Temperaturskala. Bei beiden der genannten Projekte und den hierfür jeweils in der PTB eingesetzten Messverfahren sind die Anforderungen an die erzielbaren Messunsicherheiten dimensioneller Messgrößen außerordentlich hoch. Nachstehend wird auf diese speziellen Anforderungen etwas genauer eingegangen.

Beide oben genannten Aspekte der Aktivitäten der Abteilung haben Eingang in die strategische Ziel- und Aufgabenplanung (Roadmaps) gefunden, der sich die europäischen metrologischen Staatsinstitute im Rahmen des iMERA-Projektes der EU im Berichtsjahr angenommen haben. Innerhalb des Technischen Komitees „Länge“ von EUROMET wurden vier so genannte Roadmaps erarbeitet, in denen die generellen Ziele und Entwicklungslinien künftiger, auf europäischer Ebene in Abstimmung zu bearbeitender Forschungs- und Entwicklungsaufgaben für die dimensionelle Metrologie skizziert sind. Die Roadmaps beziehen sich auf die folgenden vier Gebiete: „Dimensional metrology for micro- and nanotechnology“, „Dimensional metrology for advanced manufacturing technologies“, „Long range dimensional metrology“ und „Dimensional metrology as enabling technology for long-term fundamental research“.

# messtechnik

## Aktivitäten im Rahmen des Avogadro-Projektes

Das Ziel des in internationaler Abstimmung bearbeiteten Avogadro-Projektes ist die Neubestimmung der Avogadro-Konstanten  $N_A$  basierend auf Messungen an hochangereichertem (99,99 %), fast isopenreinem  $^{28}\text{Silicium}$ -Material mit einer relativen Unsicherheit von  $2 \cdot 10^{-8}$ , welches bis zum Jahr 2010 erreicht sein soll. Eine mit hoher Genauigkeit bestimmte Avogadro-Konstante kann eine wichtige Rolle bei der angestrebten Neudefinition der SI-Basiseinheit der Masse spielen. Im physikalischen Einheitensystem verknüpft die Avogadro-Konstante mikroskopische bzw. atomare Größen mit makroskopischen Größen. Die Einheit der Masse ist die letzte SI-Basiseinheit, die bislang noch durch ein verkörpertes Normal, das Kilogramm-Prototyp aus Platin-Iridium, aufbewahrt im *Bureau International des Poids et Mesure* (BIPM) in Paris, definiert ist. Ist also  $N_A$  mit einer sehr geringen Unsicherheit bestimmt worden, wäre eine Neudefinition der SI-Einheit der Masse auf Basis atomarer Masseinheiten möglich, die eine mindestens gleich große oder auch bessere Realisierungsunsicherheit besitzt als die bislang gültige Definition, aber eine Langzeitstabilität gewährleistet, die die jetzige Realisierung nicht aufweist.

In den metrologischen Staatsinstituten werden alternative Wege zur Neudefinition des Kilogramm verfolgt. Bei dem in der PTB unter Einbeziehung anderer Institute verfolgten Avogadro-Projekt geht es darum, eine Kugel mit einer Masse von ca. 1 kg aus einkristallinem, hochangereichertem  $^{28}\text{Silicium}$ -Material sowohl bzgl. ihrer mikroskopischen als auch ihrer makroskopischen Dichte mit höchster Präzision zu charakterisieren und hieraus die Avogadro-Konstante zu bestimmen.

Die hierzu erforderliche exakte Bestimmung dimensioneller Größen betrifft einerseits das Volumen der Si-Kugel mit einem Durchmesser von etwa 93 mm sowie andererseits den atomaren Gitterabstand im Kristallgitter des  $^{28}\text{Si}$ -Einkristalls. Alle dimensionellen Messgrößen, sowohl die makroskopischen als auch die mikroskopischen, sind dabei auf die SI-Längeneinheit, das Meter, rückzuführen.

Für die Volumenbestimmung an der Si-Kugel wird das in der PTB entwickelte Kugelinterferometer verwendet, über das bereits zuvor berichtet wurde (Jahresbericht 2004). Im Berichtsjahr wurde das Interferometer im Wesentlichen durch eine verbesserte Bestimmung der Wellenfrontaberrationen der Kugelobjektive sowie durch die Reduzierung der Messunsicherheit bei der Temperaturmessung

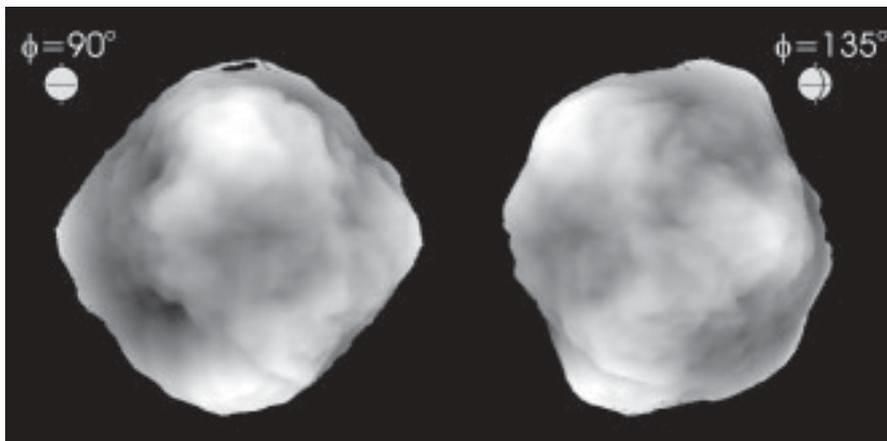
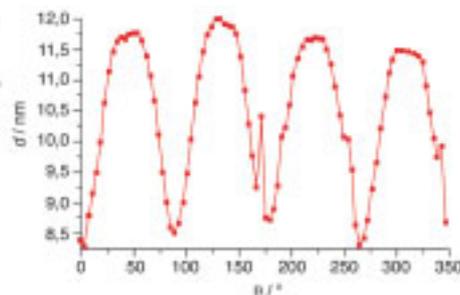


Bild 1: Kugeldurchmessertopographie der Si-Kugel Avo#1 in zwei Betrachtungswinkeln. Dargestellt sind die Abweichungen von einem Kugeldurchmesser von 93 627 550 nm. Die verbleibende Durchmesservariation beträgt etwa +30 nm bis +90 nm.

optimiert. Im Rahmen der Evaluation der durchgeführten Optimierungen wurde erstmals eine komplette Durchmesser-Topografie einer bereits zuvor gemessenen Avogadro-Kugel aufgenommen (Avo#1, aus natürlichem Si, s. Bild 1). Es wurde nunmehr eine Messunsicherheit DV/V von  $3,4 \cdot 10^{-8}$  erreicht, hierbei ist die Unsicherheit für die Bestimmung der Oxidschichtdicke noch nicht enthalten.

Die bislang im Rahmen des Avogadro-Projektes verwendeten Si-Kugeln wiesen eine natürliche Oxidschicht ( $\text{SiO}_x$ ) von etwa 2-3 nm Dicke auf, die allerdings auf den unterschiedlich orientierten Kristallebenen der Si-Kugel unregelmäßig und in nicht genau bekannter Stöchiometrie aufwuchs und somit messtechnisch schwierig zu erfassen war. Die  $^{28}\text{Si}$ -Kugel wird deshalb kontrolliert thermisch oxidiert ( $\text{SiO}_2$ ), um die Oxidschichtdicken mit der geforderten Messunsicherheit von 0,1 nm bestimmen zu können. Für die Charakterisierung der thermischen Oxidschichten wird ein zweistufiges Verfahren angewandt. Zunächst werden im Radiometrielabor der PTB am Synchrotronspeicherung BESSY II an einigen Referenzpunkten auf der Kugeloberfläche die Schichtdicken durch röntgenreflektometrische Messungen (XRR) mit verschiedenen Wellenlängen bestimmt. Anschließend wird die Kugeloberfläche durch ellipsometrische Messungen im Reinraumzentrum der PTB entlang von Großkreisen charakterisiert, wobei die Messwerte des Ellipsometers an die Ergebnisse der XRR-Messungen angeschlossen werden (Bild 2). Im Berichtsjahr erfolgten zu diesem Verfahren umfangreiche Voruntersuchungen, auf deren Basis zurzeit eine Messunsicherheit für die Oxidschichtdicke von 0,2 nm abgeschätzt wird, die sich weiter reduzieren lässt.



Für das Avogadro-Projekt wird ein spezieller Einkristall aus  $^{28}\text{Silicium}$  hergestellt, aus dem neben dem Material für die Avogadro-Kugel auch Silicium für den Aufbau eines speziellen Röntgeninterferometers zur Bestimmung des Kristallgitterabstandes sowie für weitergehende Material-Untersuchungen entnommen wird. Für die Messung des  $d_{220}$ -Kristallgitterabstandes von ca. 0,2 nm wird eine Messunsicherheit von  $3 \cdot 10^{-9}$  gefordert, die deutlich über die bislang erzielbaren Unsicherheiten hinaus geht. In Zusammenarbeit mit der Abteilung *Optik* wird eine Kombination aus einem hoch auflösendem optischen Heterodyn-Interferometer und einem aus separaten  $^{28}\text{Si}$ -Kristallen zu fertigenden Röntgenverschiebe-Interferometer mit einem Messweg von 2 mm aufgebaut (Bild 3). Um die geforderten Messunsicherheiten erreichen zu können, wird der Messaufbau in einer Vakuumkammer betrieben.

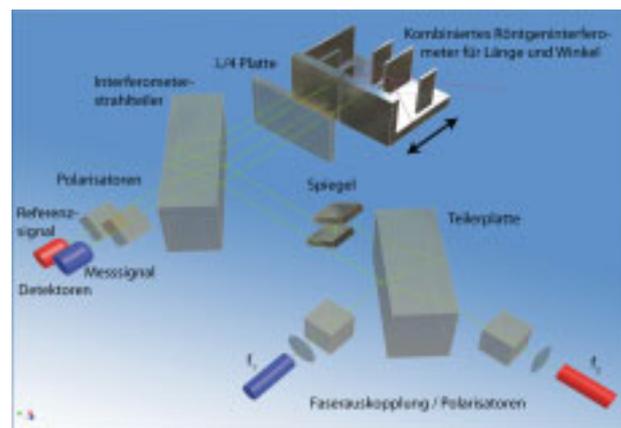


Bild 3: Prinzipskizze des neu aufzubauenden kombinierten optischen und Röntgenverschiebe-Interferometers zur Präzisions-Bestimmung der Gitterkonstante von  $^{28}\text{Si}$ .

Bild 2: Strategie für die Messung der Schichtdicke an der Avogadro-Kugel mit Ellipsometrie und Röntgenreflektometrie (XRR) durch Anschluss der ellipsometrischen an röntgenreflektometrische Messungen an den Polen (links) und ein Beispiel für eine ellipsometrisch gemessene Variation der thermischen Oxidschichtdicke über einen Großkreis an einer Si-Testkugel (rechts).

## Aktivitäten im Rahmen des Boltzmann-Projektes

In auf internationaler Ebene abgestimmten Vorhaben werden zurzeit verschiedene Wege zu einer Präzisions-Bestimmung der Boltzmann-Konstanten  $k_B$  mit dem Ziel einer möglichen neuen Definition der Temperatureinheit Kelvin verfolgt. In der PTB wird hierzu das Messverfahren der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie mit Helium mit dem Ziel weiterentwickelt, eine relative Unsicherheit der Bestimmung von  $k_B$  von etwa  $2 \cdot 10^{-6}$  zu erreichen. In diesem Zusammenhang werden auch an die Druckmessung erhöhte Anforderungen gestellt, welche wiederum auf präzisen Messungen der Dimensionen der in Druckwaagen verwendeten Kolben-Zylinder-Paare beruhen. Die dimensionelle Charakterisierung der Kolben-Zylinder-Paare erfolgt durch Präzisionsmessungen von Durchmessern und Formabweichungen (Geradheit, Parallelität, Rundheit, s. Bild 4). Die erhöhten Anforderungen im Rahmen des Boltzmann-Projektes erfordern Weiterentwicklungen sowohl hinsichtlich der eingesetzten Messverfahren und -geräte als auch bezüglich der anzuwendenden Auswerteverfahren. Ziel ist es hierbei, eine 3D-Messunsicherheit von deutlich unter 50 nm zu erreichen, sowohl für den Außen- als auch den Innenzylinder.

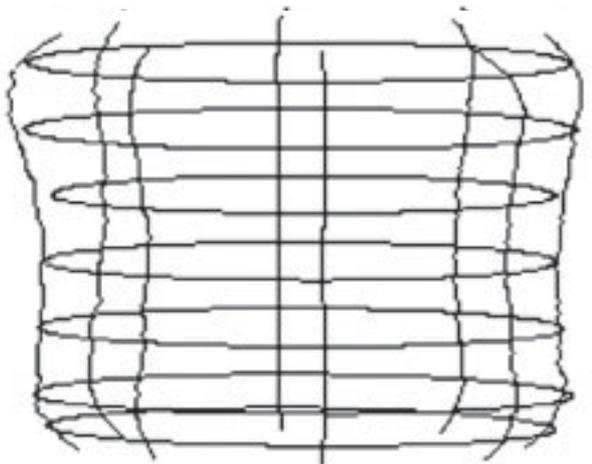


Bild 4: Bild eines Kolben-Zylinder-Paares einer Druckwaage (oben) und Drahtgitter-Visualisierung (Mitte, überhöhte Darstellung) der bislang durch Verknüpfung von separaten Durchmesser- und Formmessungen bestimmten Zylindergeometrie sowie Visualisierung der angestrebten, möglichst vollständigen 3D-Charakterisierung der Zylinderoberfläche mit geringen Messunsicherheiten (unten).

### Aufbau einer Nanokraft-Messeinrichtung

Ursprünglich angetrieben von Fragestellungen aus dem Bereich der Rastersondenmikroskopie und der bei taktilen Antastungen an empfindlichen Oberflächen zulässigen Antastkräfte hat sich die Fachabteilung mit dem Thema der rückführbaren Messung auch kleinster Kräfte bis in den Nano-Newton-Bereich und darunter beschäftigt. Auch molekulare Bindungskräfte und Gewichtskräfte von Molekülen liegen in diesen Größenordnungen und werden bereits in technischen Anwendungen wie z. B. bei „elektronischen Nasen“ genutzt. Im Berichtsjahr wurden erste Messungen mit einem neu entwickelten Prototypen einer Nanokraft-Messeinrichtung durchgeführt. Das Prinzip der Messeinrichtung basiert auf der elektrostatischen Steifigkeitsreduktion und der elektrostatischen Auslenkungskompensation eines dünnen Scheibenpendels, welches durch die externe Prüfkraft beaufschlagt wird. Bild 5 zeigt ein Prinzipbild der wesentlichen Komponenten der Messeinrichtung. Erste Messergebnisse mit einer nachgewiesenen Auflösung der Kraftmessung von 0,1 nN bei einer Messzeit von 100 s konnten demonstriert werden.

In dem diesjährigen Bericht aus der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* wurde der Schwerpunkt auf die Darstellung von grundlagenorientierten Arbeiten für die Weiterentwicklung der Metrologie gelegt. In den Schlagzeilen und den zugeordneten Kurzberichten wird ein Überblick über die weiteren Aktivitäten der Abteilung in den verschiedenen Geschäftsbereichen der PTB gegeben, hierbei liegt der Schwerpunkt im Bereich „Metrologie für die Wirtschaft“.

Die bei den grundlagenorientierten Arbeiten entwickelten Messverfahren und realisierten Messplätze werden häufig in Folge auch für besondere Aufgaben aus dem Bereich der industriellen Messtechnik verwendet bzw. weiterentwickelt. Beispiele hierfür sind die Anwendung des Prinzips des Kugelinterferometers für präzise Messungen auch an kleineren Kugeln, wie sie z. B. als Antastkugeln in der taktilen Koordinatenmesstechnik eingesetzt werden, sowie die Nutzung des kombinierten optischen und Röntgenverschiebe-Interferometers für Messungen an hoch auflösenden Wegmessensoren der Nanotechnologie.

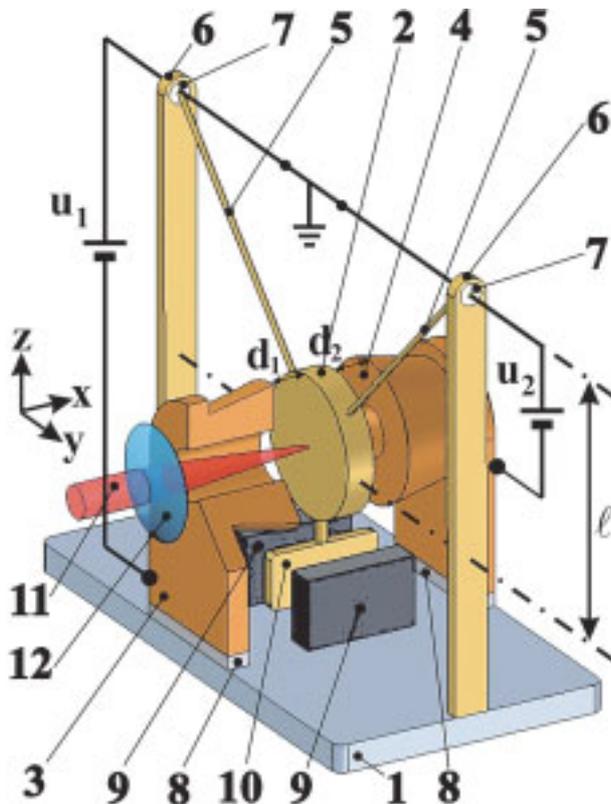


Bild 5: Funktionsschema der elektrostatischen Nanokraft-Messeinrichtung (detaillierte Erläuterung in den Nachrichten aus der Abteilung).

Der wissenschaftliche Gerätebau der PTB ist der Fachabteilung *Fertigungsmesstechnik* zugeordnet und in vielfältiger Weise in den zuvor beschriebenen Entwicklungsprojekten eingebunden, und zwar sowohl bei der Konstruktion als auch der Fertigung von Komponenten der realisierten Messplätze. Zu erwähnen sind hierbei die besonderen Anforderungen an die anzuwendenden Bearbeitungsmethoden beispielsweise bei der Fertigung des Röntgenverschiebe-Interferometers, der

Kernkomponenten der Nanokraft-Messeinrichtung, der Fertigung von Massestücken eng tolerierter Oberflächenqualität für das Boltzmann-Projekt sowie einer Kugelpolier-einrichtung zur Fertigung von Testkugeln für das Avogadro-Projekt (Bild 6).

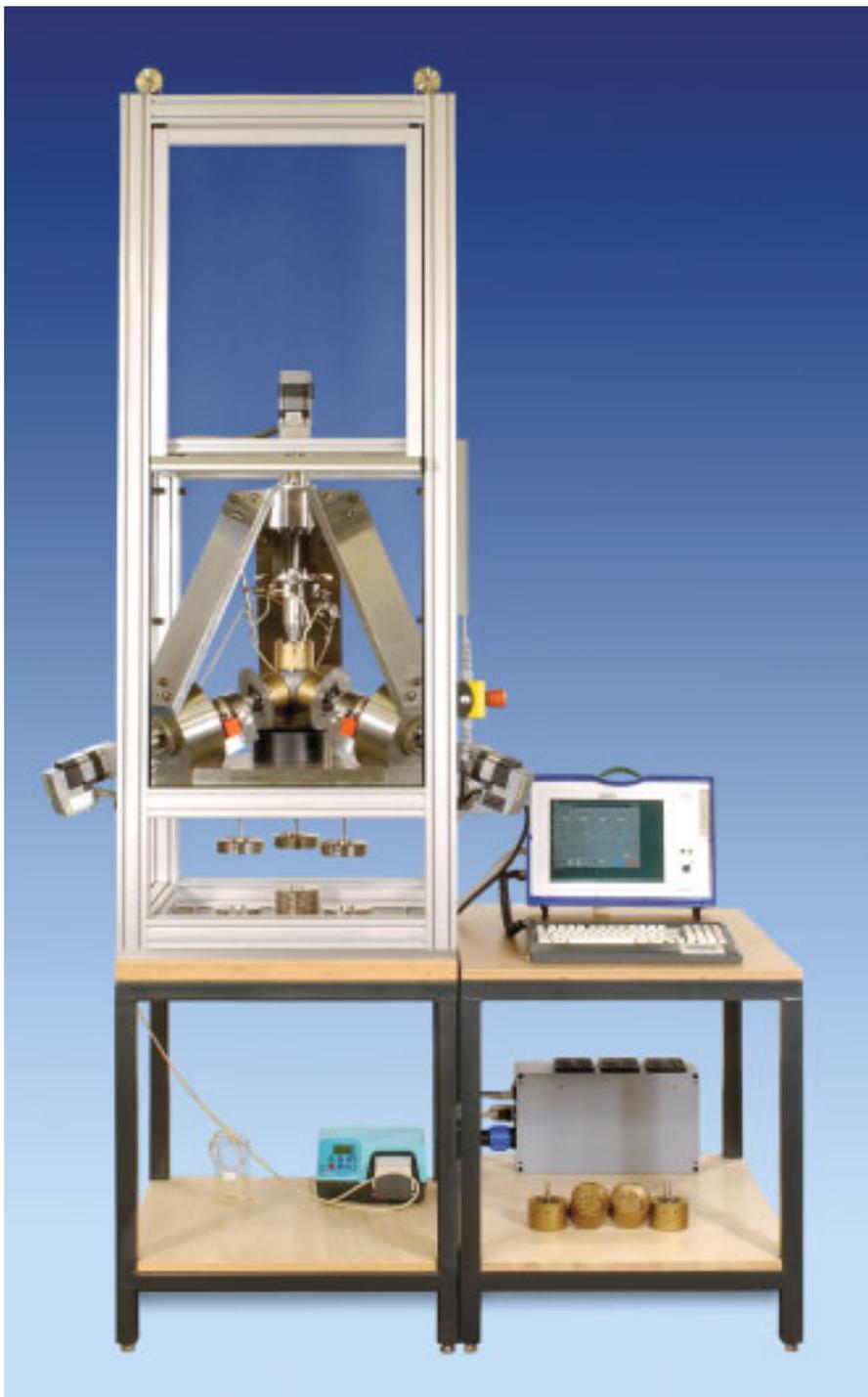


Bild 6: Neu entwickelte Kugelpolier-einrichtung auf Basis eines stabilen Tetraeder-Grundkörpers und vier rechnergesteuerten Polierkalotten mit einstellbaren Prozesskräften.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Rückführung atomarer Stufen auf die SI-Längeneinheit

Zur ersten Charakterisierung eines neuen Rasterkraftmikroskops wurden atomare Stufen auf Siliciumoberflächen untersucht. Die großflächig präparierten glatten Flächen mit einzelnen atomaren Stufen konnten dabei sehr gut aufgelöst werden. Die Höhe der atomaren Stufe konnte dabei über das integrierte Differentialinterferometer gut aufgelöst werden. Damit ist eine direkte Rückführung atomar hoher Stufen auf die Längeneinheit möglich. (L. Koenders, FB 5.1, [ludger.koenders@ptb.de](mailto:ludger.koenders@ptb.de))

#### Test einer elektrostatischen Nanokraftmess-einrichtung

Zur Messung statischer Kräfte im Nanonewtonbereich wurde das Prinzip der elektrostatischen Steifigkeitsreduktion und elektrostatischen Auslenkungskompensation eines Scheibenpendels untersucht. Eine erste Kraftmessung an Luft mit reduzierter Steifigkeit des Pendels ( $3 \cdot 10^{-3}$  N/m) und einer Kraftauflösung  $< 0,1$  nN wurde durchgeführt. (V. Nesterov, FB 5.1, [vladimir.nesterov@ptb.de](mailto:vladimir.nesterov@ptb.de))

#### Präzise Bestimmung der Oxidschichtdicke der Avogadro-Kugel

Für das Avogadroprojekt wird eine Messunsicherheit der Oxidschichtdicke  $d$  einer isotopenreinen  $^{28}\text{Si}$ -Einkristallkugel von  $\delta d = 0,1$  nm bei  $d \approx 5$  nm angestrebt. Aufgrund der Abhängigkeit der Wachstumsgeschwindigkeit des thermischen Oxids von der Kristallorientierung des Substrats variiert die Oxiddicke im vorliegenden Fall zwischen 7 nm und 12 nm über der Kugel. Erste Messungen mit einer Kombination von Röntgenreflektometrie (XRR) und Ellipsometrie an einer Testkugel sind erfolgreich durchgeführt worden. (I. Busch, FB 5.1, [ingo.busch@ptb.de](mailto:ingo.busch@ptb.de))

#### Simulation der Elektronentransmission durch Membranen mit Stützstruktur

Dünne elektronen-permeable Membranen mit Stützstruktur kommen beispielsweise in miniaturisierten Elektronenquellen zum Einsatz und müssen dort hohen Druckunterschieden standhalten (Atmosphärendruck gegen Hochvakuum). Zur Optimierung der Membraneigenschaften wurde mittels Monte-Carlo-Simulationen die Elektronen-Transmission durch Membranen verschiedener Dicke und Materialzusammensetzung für verschiedene Energien simuliert und hinsichtlich Transmissivität und Winkeldispersion charakterisiert. (D. Gnieser, C. G. Frase, FB 5.2, [dominic.gnieser@ptb.de](mailto:dominic.gnieser@ptb.de), [carl.g.frase@ptb.de](mailto:carl.g.frase@ptb.de))

#### Deutliche Verringerung der Messunsicherheit bei der Volumenbestimmung für das Avogadro-Projekt

Eine Präzisionsbestimmung der Avogadro-Konstanten wird als wesentlicher Beitrag in die geplante Neudefinition der SI-Einheit Kilogramm einfließen. Die zu erzielende Messunsicherheit für das Volumen einer  $^{28}\text{Si}$ -Einkristallkugel stellt allerdings mit  $1 \cdot 10^{-8}$  noch nie erreichte Grenzen auf. Aufwändige Detailarbeit am Kugelinterferometer der PTB ermöglichte nun eine Annäherung an diese Grenze: mit einem optimierten Einsatz feinjustierter Kugelobjektive und nach umfangreichen Untersuchungen zur Messung der Körpertemperatur an Siliziumkugeln konnte die Messunsicherheit um einen Faktor 3 auf  $DV/V = 3,4 \cdot 10^{-8}$  reduziert werden. (A. Nicolaus, FB 5.4, [arnold.nicolaus@ptb.de](mailto:arnold.nicolaus@ptb.de))

### **Absolutinterferometrie mit zwei Diodenlasern unter Nutzung der synthetischen Wellenlänge**

Es wurde ein mit zwei Diodenlasern arbeitendes Absolutinterferometer entwickelt, wobei ein Laser zwischen modulierter und stabiler (Rubidium-D2-Linie) Betriebsart umgeschaltet werden kann, während der zweite Laser ständig auf die Rubidium D1-Linie stabilisiert ist. Das sich daraus ergebende zweistufige Verfahren zur Längenmessung wurde mit einem zählenden Interferometer verglichen. Die Abweichung zwischen beiden Verfahren beträgt für Distanzen  $< 1$  m weniger als  $\pm 0,4 \mu\text{m}$ . (L. Hartmann, FB 5.4, lutz.hartmann@ptb.de)

### **Hochgenaue Bestimmung des Brechungsindex von Wasserdampf mittels Längeninterferometrie**

Bei der Bestimmung des Brechungsindex der Luft mittels empirischer Gleichung („Edlén-Formel“) ist der Feuchteinfluss eine wesentliche Komponente der erzielbaren Messunsicherheit. Deshalb wurde eine neue Methode entwickelt, mit welcher der Brechungsindex von Wasserdampf bei drei verschiedenen Wellenlängen deutlich genauer als bislang gemessen werden konnte. Die Methode basiert auf sub-nm-genauen Längenmessungen im Vakuum und anschließenden Messungen unter wohl definierten Wasserdampfdrücken. (R. Schödel, FB 5.4, rene.schoedel@ptb.de)

### **Innenflächen von Zylindern hochwertig beschichtet**

Im Rahmen eines internationalen Weltraumprojektes müssen Zylinder zum Einsatz in Präzisionssensoren innen mit einer Metallschicht versehen werden. Unter Verwendung einer Stabkathode und durch geeignete Anpassung eines Magnetrons war es möglich, die Innenzylinderfläche von nur 10 mm im Durchmesser gleichmäßig zu beschichten. (F. Löffler, FB 5.5, frank.loeffler@ptb.de, R. Meeß, FB 5.5, rudolf.meess@ptb.de)

### **Konstruktion und Optimierung eines Schwingungssystems mittels der FEM-Methode**

Um den Bedarf an einem hoch auflösenden Tast- und Positioniersystem für die Mikro- und Nanometrologie abdecken zu können, wurde in Zusammenarbeit mit AG 5.15 ein monolithisches Aktor- und/oder Sensorelement entwickelt. Mithilfe von FEM-Eigenfrequenz-Simulationen waren dabei die seitlichen Festkörpergelenke zu optimieren, die den schwingenden unteren Steg einspannen, ohne selbst schwingen zu dürfen. Ebenso wurde das gesamte Bauteil auf definierte Resonanzfrequenzen ausgelegt. (H. Drösemeyer, FB 5.5, holger.droesemeyer@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Entwicklung einer Kalibriereinrichtung für Härteeindringkörper**

Mit einer neu entwickelten Messeinrichtung können pyramidenförmige und kegliche Eindringkörper (Vickers, Berkovich, u.a.) interferentiell kalibriert werden. Die aus der ISO-Normung resultierenden Bedingungen für die Kalibrierung von Härtevergleichsplatten werden damit erfüllt. (K. Hermann, FB 5.1, konrad.hermann@ptb.de)

#### **Selbstkalibrierung und Fehleranalyse von Rastersondenmikroskopen**

Selbstkalibrierverfahren mit Artefakten werden in der dimensionellen Messtechnik häufig eingesetzt, um systematische Messabweichungen von Messgeräten festzustellen. Dabei wird ein stabiles Artefakt (z. B. ein Normal) bei verschiedenen Lagen und Orientierungen innerhalb des Messvolumens des Gerätes gemessen, wodurch sich Geräte- von Artefakteigenschaften trennen lassen. Diese etablierte Technik wurde nun erstmals bei einem Rasterkraftmikroskop (SFM) systematisch erprobt (M. Xu, FB 5.1, min.xu@ptb.de)

### **Neuartige 3D-Normale für die Nanometrologie**

Die BAM (Berlin) und die PTB haben gemeinsam neuartige 3D-Normale entwickelt, die für die Kalibrierung von Rastersondenmikroskopen (SPM) ebenso geeignet sind wie für Kalibrierung von Rasterelektronenmikroskopen (REM), konfokalen Laser-Scanning-Mikroskopen (CLSM) und vielen anderen dimensionell hochauflösenden Messverfahren. Damit lassen sich die Kalibrierfaktoren aller drei Achsen inkl. der Kopplungen der Achsen in nur einem Kalibrierschritt bestimmen. (T. Dziomba, FB 5.1, thorsten.dziomba@ptb.de)

### **Integration eines neuen Rasterelektronen-Mikroskopes (REM) in das Elektronen-optische Metrologiesystem (EOMS)**

Das EOMS dient der dimensionellen Charakterisierung von Nano- und Mikrostrukturen, insbesondere auf Masken und Wafern. Um den steigenden Anforderungen an die mikroskopische Strukturantastung aufgrund fortschreitender Miniaturisierung der Messstrukturen begegnen zu können, wurde ein neues, hoch auflösendes ULTRA-REM in das EOMS integriert. (W. Häßler-Grohne, K. Hahm, B. Przebierala, FB 5.2, wolfgang.haessler-grohne@ptb.de, kai.hahm@ptb.de, bernd.przebierala@ptb.de)

### **Neues Verfahren für die Strukturbreiten-Metrologie im REM**

Ein auf physikalischen Wechselwirkungen basierender, neu entwickelter Auswertalgorithmus erlaubt die umfassende dimensionelle Charakterisierung von im Rasterelektronenmikroskop (REM) gemessenen Mikro- bzw. Nanostrukturen. Der Algorithmus basiert auf einem mathematischen Modell, welches die Abbildung von trapezförmigen Strukturkanten (Steg oder Graben) im REM beschreibt und parametrisiert. (K. Dirscherl, C. G. Frase, FB 5.2, E. Buhr, FB 4.2, carl.g.frase@ptb.de, egbert.buhr@ptb.de)

### **Untersuchung eines neu entwickelten Winkelinterferometers zur Kalibrierung kleiner Winkel**

Ein in der PTB entwickeltes hoch auflösendes Winkelinterferometer wurde durch Vergleichsmessungen auf dem Winkelkomparator im Reinraumzentrum untersucht. Innerhalb des vollen Messbereichs von  $\pm 6^\circ$  ergaben sich in mehreren Teilmessbereichen von  $\pm 1000''$  maximale Messdifferenzen zwischen Winkelinterferometer und Komparator von  $\pm 0,003''$  bei Standardabweichungen von  $0,002''$ . Die Ergebnisse sind eine wichtige Grundlage zur Verwendung des Winkelinterferometers in einem neuen Messplatz, der vor allem zur Kalibrierung hochgenauer Autokollimatoren genutzt werden soll. (A. Just, FB 5.2, andreas.just@ptb.de)

### **Neuartige Prüfkörper für die Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Um Sensoren und Messgeräte für die Messung kleiner Geometrien (Abmessungen ca.  $1 \mu\text{m} - 1 \text{mm}$ ) gemäß den Normen und Richtlinien der Koordinatenmesstechnik (ISO 10360, VDI 2617) zu prüfen, wurden neuartige Prüfkörper realisiert. Für die Fertigung dieser Kugelplatten und Kugelkalottenwürfel kamen Erodier- und Trommelpoliervverfahren zum Einsatz, um eine sowohl für optische als auch für taktile Sensoren geeignete, sog. „kooperative“ Prüfkörperoberfläche zu erhalten. (M. Neugebauer, FB 5.3, michael.neugebauer@ptb.de; U. Neuschaefer-Rube, FB 5.3, ulrich.neuschaefer-rube@ptb.de)

### **Kalibrierung einer Mikroverschiebeeinheit durch sequentielle Multilateration**

Ein in der PTB entwickeltes Verfahren für die Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten und Werkzeugmaschinen wurde erstmals auf eine hochgenaue Mikroverschiebeeinheit angewendet. Das Verfahren erwies sich auch für diesen Einsatz als sehr gut geeignet. In sehr kurzer Messzeit konnten Positions- und Geradheitsabweichungen sowie Nicken, Gieren und Rollen aller Achsen mit höchster Präzision erfasst werden. (H. Schwenke, FB 5.3, Heinrich.Schwenke@ptb.de, U. Neuschaefer-Rube, FB 5.3, ulrich.neuschaefer-rube@ptb.de)

### **Neue Messmethode für einen taktil-optischen 3D-Mikrotaster**

Es wurde eine neuartige Messmethode entwickelt, die mit dem taktil-optischen Mikrotaster die volle 3D-Messfähigkeit erreicht. Sie nutzt die Specklemuster, die sich ergeben, wenn eine kohärente Laser-Lichtquelle zur Beleuchtung des Tastelementes verwendet wird. Die Methode kommt ohne zusätzliche Hardware am Messgerät aus, wodurch der bisherige Einsatz eines zweiten Kamerasystems entfällt. (M. Wissmann, FB 5.3, mark.wissmann@ptb.de, U. Neuschaefer-Rube, FB 5.3, ulrich.neuschaefer-rube@ptb.de)

### **Dienstleistungen für Verzahnungs- und Gewindemesstechnik abrufbar über das virtuelle Institut EVIGeM**

Das virtuelle Institut EVIGeM ist eine Business-To-Business Plattform. Im Verbund mit europäischen metrologischer Instituten, Hochschuleinrichtungen und der Industrie werden Dienstleistungen im Bereich der dimensional Metrologie angeboten. Die PTB ist mit ihrer Verzahnungs- und Gewindemesstechnik vertreten. (F. Härtig, FB 5.3, frank.haertig@ptb.de)

### **Scanning-Normal zur Abschätzung dynamischer Einflüsse in der Koordinatenmesstechnik**

Im Bereich der taktilen Koordinatenmesstechnik hat die PTB einen Prüfkörper (Scanning Artefact SAFT) entwickelt, mit dem sich die Beiträge zur Ermittlung der Messunsicherheit bei dynamischer Messpunktaufnahme abschätzen lassen. (F. Härtig, FB 5.3, frank.haertig@ptb.de)

### **Etablierung der Computertomographie (CT) als Koordinatenmesstechnik**

Seit 2001 arbeitet die PTB im Rahmen von zwei Industrieprojekten aktiv an der Etablierung der industriellen Computertomographie (CT) als Koordinatenmesstechnik. Zur Ermittlung von Kenngrößen, Erfassung und Korrektur von Messabweichungen der Mikro-CT wurden aktuell spezielle Miniatur-Prüfkörper entwickelt, gefertigt und kalibriert. Durch die Prüfkörper und Verfahren konnten bereits Messabweichungen unterhalb der einfachen volumetrischen Auflösung erreicht werden (Abweichungen im Subvoxelbereich). (U. Neuschaefer-Rube, FB 5.3, ulrich.neuschaefer-rube@ptb.de, U. Hilpert, FB 5.3, uwe.hilpert@ptb.de)

### **Brechzahlkompensierende Interferometrie**

Die bekannte Methode der Zweifarben-Interferometrie zur Kompensation des Einflusses des Brechungsindex der Luft auf interferometrische Längenmessungen kann in feuchter Luft zu systematischen Messabweichungen führen. Diese wurden beseitigt, indem Luftdruck und -feuchte gemessen wurden und die Temperatur der Luft aus den mit beiden Farben gemessenen Längen berechnet wurde. (K. Meiners-Hagen, FB 5.4, karl.meiners-hagen@ptb.de)

### **Manostatierung des Komparators zur Kalibrierung von Laserinterferometern im Einsatz**

Erstmalig wurde die Manostatierung an der bisher nur thermostatierten Messkammer bei der Kalibrierung von drei Laserinterferometern, einem Luftrefraktometer und einer sog. Wetterstation erfolgreich angewandt. Der Luftdruck kann jetzt unabhängig von atmosphärischen Wetterbedingungen gezielt variiert und konstant gehalten werden, wodurch die Messzeit und der druckbedingte Messunsicherheitseinfluss verringert werden. (G. Sparrer, T. Meyer, FB 5.4, gerald.sparrer@ptb.de, tobias.meyer@ptb.de)

### **4-Achs-Laserbearbeitung**

Im Rahmen eines abteilungsübergreifenden Drittmittelprojektes werden Kraftaufnehmer auf Basis von Dünnschichttechnik entwickelt. Hierzu wurde eine 4-Achs-Robotik konstruiert, die es ermöglicht, Laserbearbeitung und Bewegung im Raum derart zu koppeln, dass Schichtstrukturen mit komplexen Geometrien auf zylindrischen Oberflächen abgetragen oder belichtet werden können. (R. Meeß, FB 5.5, rudolf.meess@ptb.de)

### **Erste Ergebnisse der EUROMET-Vergleichsmessung L.K6 an einer Kugelplatte**

Erste Ergebnisse der EUROMET-Vergleichsmessung L.K6 an einer Kugelplatte werden präsentiert. Es wurde eine Übereinstimmung aller Teilnehmer innerhalb der Messunsicherheit realisiert. Die weitere Auswertung wird zusammen mit der CCL Key Comparison K6 erfolgen. (O. Jusko, FB 5.3, otto.jusko@ptb.de)

## **Metrologie für die Gesellschaft**

### **Prüfung von automatischen Annahmesystemen für Briefsendungen**

Die Post AG bereitet die Installation von Annahmesystemen für Briefsendungen, sog. Briefstationen, vor. Diese Briefstationen führen eine halbautomatische Preisermittlung und Frankierung anhand von Kundenangaben und physikalischen Messwerten durch. Hierzu werden Länge, Dicke und Gewicht gemessen sowie die Breite eines jeden Briefes klassifiziert und so das Porto bestimmt. Nach eingehenden messtechnischen Untersuchungen in der PTB wurde ein zeitlich befristeter Feldversuch mit drei Briefstationen im Bereich des Eichamtes Köln durchgeführt. (M. Wolf, FB 5.4, michael.wolf@ptb.de)

### **Konstruktion und Fertigung einer Extrapolationskammer**

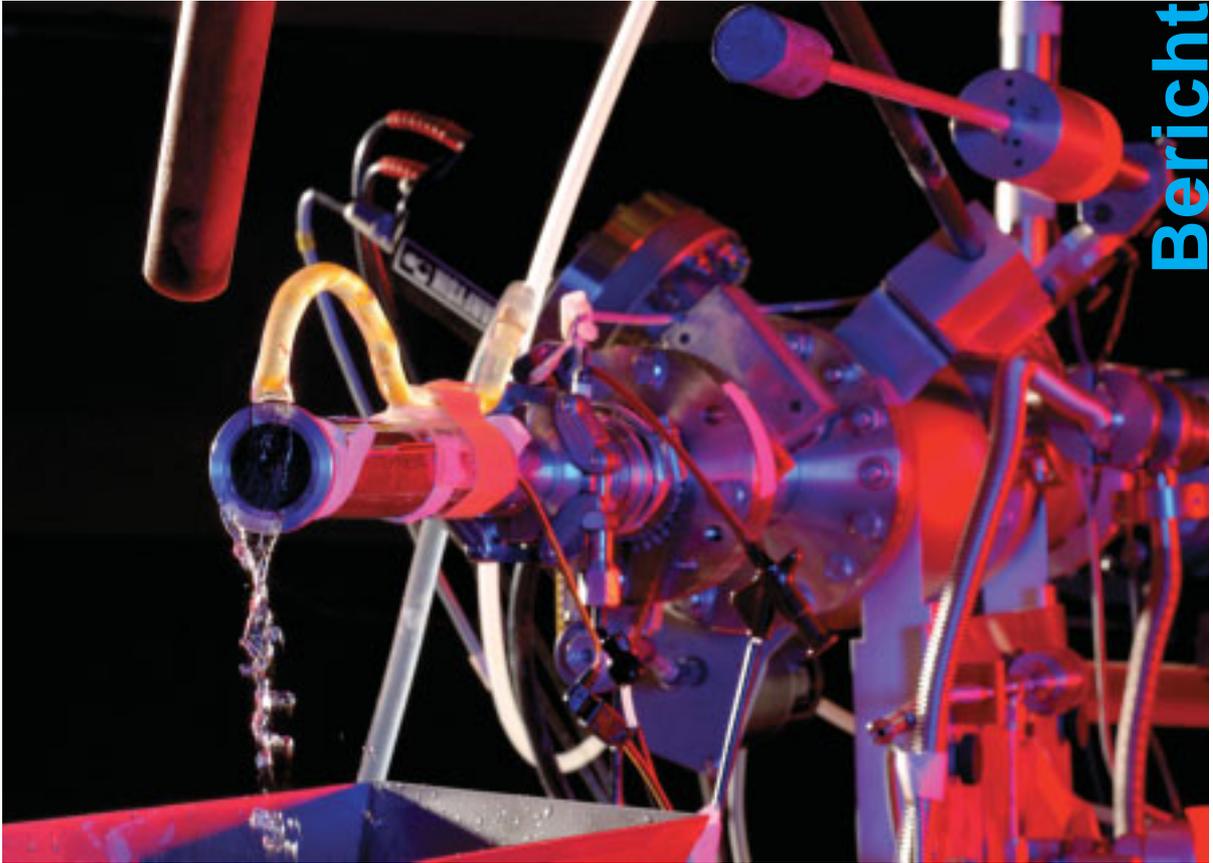
Für den FB 6.3 wurde eine Extrapolationskammer als Primärnormalmessenrichtung konstruiert, um die Gewebe-Energiedosisleistung von Betastrahlern zu messen. Anwendungsbereich dieser Primärnormalmessenrichtung ist der Strahlenschutz. (M. Müller, FB 5.5, michael.mueller@ptb.de)

## **Internationale Angelegenheiten**

### **Ringvergleich von Stufenhöhenmessungen im Nano- und Mikrometerbereich**

Im Rahmen des EUROMET wurde ein Vergleich über die Messung von Stufenhöhen mit Rastersondenmikroskopen abgeschlossen. Die zu messenden Normale hatten Stufenhöhen im Bereich von 40 nm bis 2000 nm. Der Vergleich zeigte, dass an qualitativ hochwertigen Normalen Messunsicherheiten im Subnanometerbereich erzielbar sind. (L. Koenders, FB 5.1, ludger.koenders@ptb.de)

# Ionisierende Strahlung



Berichte der Abteilungen

Abteilung

6

# Ionisierende

Die Arbeiten der Abteilung *Ionisierende Strahlung* erstrecken sich über alle vier Geschäftsbereiche der PTB, die Grundlagen der Metrologie, die Metrologie für die Wirtschaft, für die Gesellschaft und die internationalen Angelegenheiten. Mit ihren sechs Fachbereichen stellt die Abteilung Fortschritt und Zuverlässigkeit in der Messtechnik der ionisierenden Strahlung sicher.

Zu den grundlegenden Aufgaben gehören die Darstellung und die Weitergabe der SI-Einheiten der Aktivität, der Teilchenfluenz, der Luftkerma, der Energiedosis und der Äquivalentdosis. Dafür werden Primär- und Transfornormale entwickelt und bereitgestellt, die die heutigen und die für die Zukunft absehbaren Anforderungen erfüllen. Ein erheblicher Teil der Ressourcen wird für die Erhaltung und die Weiterentwicklung von Referenzstrahlungsfeldern aufgewandt, die zum Teil einzigartige Feldeigenschaften und Experimentierbedingungen besitzen. Zur Zeit wird in der PTB eine neue Elektronenbeschleuniger-Anlage errichtet. In einem jetzt im Bau befindlichen Gebäude werden drei Elektronenbeschleuniger für die Dosimetrie in der Strahlentherapie installiert. Zwei davon sind klinische Linearbeschleuniger, der dritte Beschleuniger wird im Energiebereich von 0,5 MeV bis 50 MeV einen Elektronen-Nadelstrahl liefern.

#### Titelbild

Farbig beleuchtetes Strahlrohrende und Target am Van-de-Graaff-Beschleuniger der PTB. Auf das wassergekühlte  $\text{CaF}_2$ -Target treffen Protonen mit einer Energie von 2,7 MeV, die dort in einer Kernreaktion Photonen im Energiebereich zwischen 6 MeV und 7 MeV erzeugen. Die „Relative Biologische Wirksamkeit“ dieser Strahlung war Gegenstand eines Forschungsvorhabens.

Im Bereich der natürlichen Umgebungsstrahlung verfügt die Abteilung über eine Reihe von Mess- und Kalibriereinrichtungen, mit denen alle Strahlungskomponenten der Umgebungsstrahlung untersucht werden können. Dazu zählt eine Schwimmplattform in einem See nahe der PTB in Braunschweig, auf der exklusiv die kosmische Strahlung gemessen werden kann. Auf dem Referenzmessplatz Umgebungsstrahlung in der PTB werden dagegen alle Komponenten der Umgebungsstrahlung erfasst, während das Untergrundlabor UDO für Dosimetrie und Spektrometrie eine extrem geringe Umgebungsstrahlung aufweist. Mit einer weiteren Messeinrichtung kann durch Radionuklidquellen das Vorbeiziehen einer „Radioaktiven Wolke“ simuliert werden. Diese Einrichtungen wurden erneut für eine Vergleichsmessung von Frühwarn-Netzwerksystemen mehrerer Länder eingesetzt.

Die genaue Kenntnis von Atom- und Kern- daten ist eine Grundvoraussetzung für die Metrologie ionisierender Strahlung und in vielen Anwendungsbereichen in Forschung, Medizin und Technik. Deshalb sind die Fachbereiche der Abteilung in die Messung und Evaluierung zum Beispiel von Halbwertszeiten und Photonen-Emissionswahrscheinlichkeiten von Radionukliden, von Wirkungsquerschnitten für die Fusionsforschung und für die Nanodosimetrie eingebunden.

Der betriebliche Strahlenschutz der PTB wurde im letzten Jahr weiter zentralisiert und modernisiert. Für die gesetzlich vorgeschriebenen radiologischen Überwachungsaufgaben wurde ein neuer Multi-Low-Level-Counter zur Messung niedriger Alpha- und Beta-Aktivitäten beschafft und in Betrieb genommen.

Der Betrieb des Zwischenlagers für radioaktive Abfälle aus der Stilllegung des Forschungs- und Messreaktors Braunschweig verlief störungsfrei.

# e Strahlung

## EURADOS-Vergleich von Frühwarn-Netzwerkssystemen

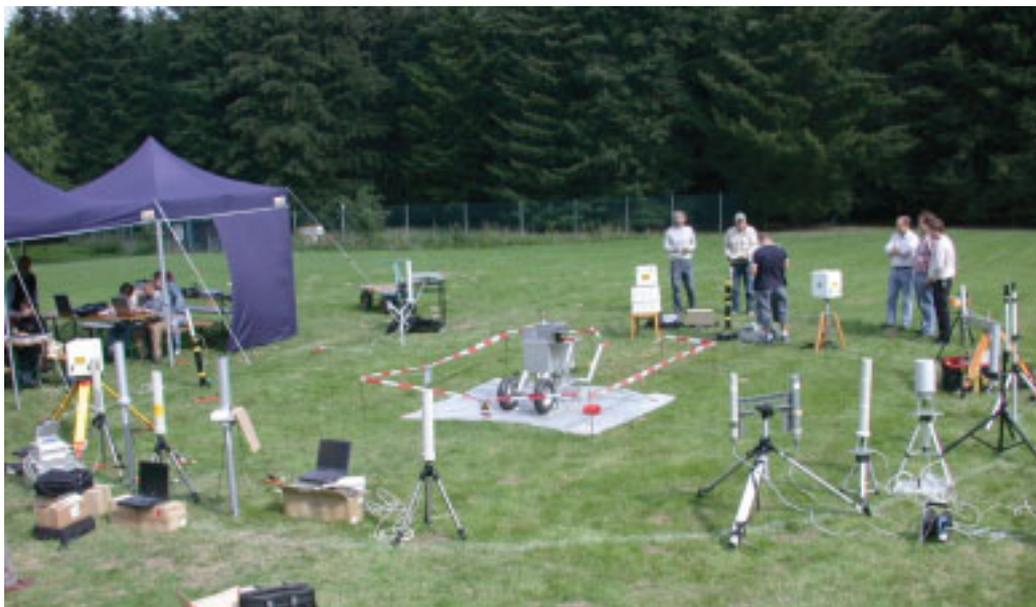
Als Konsequenz des Reaktorunfalls in Tschernobyl wurden in allen Mitgliedsstaaten der Europäischen Union flächendeckende Frühwarnsysteme installiert, um nukleare Unfälle frühzeitig aufdecken zu können. In Zusammenarbeit mit der *European Radiation Dosimetry Group* (EURADOS), die sich in ihrer *Working Group 3* mit Umweltdosimetrie befasst, führte die PTB im Jahr 2006 einen dritten internationalen Messvergleich von Frühwarnsystemen durch. Das Ziel dieser Vergleiche besteht darin, die Eigenschaften der Dosimetrie-Systeme unter identischen Messbedingungen zu testen. Dies betrifft die Messgröße selbst, in diesem Vergleich „Umgebungs-Äquivalentdosisleistung“, als auch das Ansprechvermögen bezüglich kosmischer und terrestrischer Strahlung. Langfristig sollen dadurch bei grenzüberschreitenden Freisetzungen die Messwerte verschiedener Staaten konsistent und vergleichbar werden.

Die Bilanz der drei Vergleiche ergibt, dass nunmehr 46 Dosimetrie-Systeme aus 16 EU-

Staaten geprüft wurden. An diesem dritten Vergleich beteiligten sich die folgenden Staaten und Institutionen: Frankreich (IRSN), Griechenland (GAEC), Italien (APAT), Slowenien (AMES, J. Stefan Institute), Spanien (Universität des Baskenlandes), Tschechien (SURO) und Deutschland (BfS).

In diesem Messvergleich wurde das Ansprechvermögen bezüglich kosmischer Strahlung auf einer schwimmenden See-Plattform gemessen, der inhärente Detektoruntergrund und die Abhängigkeit des Ansprechvermögens von der Dosisleistung und der Energie im Untergrundlaboratorium (UDO) bestimmt und die Fähigkeit der Detektoren untersucht, kleine Veränderungen der Umgebungsstrahlung nachzuweisen. Für Letzteres wurde auf einer Freimessfläche eine spezielle Bestrahlungseinrichtung, siehe Bild 1, eingesetzt.

Bild 1: Anordnung der Dosimetrie-Systeme auf der Freimessfläche. Die rechnergesteuerte Bestrahlungseinrichtung, die „Wolkenmaschine“, befindet sich im umgrenzten Kontrollbereich in der Mitte des Bildes. In einem Radius von 5 m um die Strahlenquelle herum sind die Dosimetrie-Systeme der Teilnehmer angeordnet.



### In Bodenproben keine Spur von „Hitlers Bombe“

Mit den Thesen des Historikers Rainer Karlsch, die er im vergangenen Jahr in seinem Buch „Hitlers Bombe“ veröffentlicht hat, wurden erneut Spekulationen um eine mögliche Kernexplosion in Hitler-Deutschland im Jahre 1945 genährt. Diese wurden von den Medien aufgegriffen und auch in der naturwissenschaftlichen Fachwelt zum Teil heftig diskutiert. Bodenproben von einem Truppenübungsplatz der Bundeswehr bei Ohrdruf in Thüringen – dem vermuteten Explosionsort – wurden deshalb von der Arbeitsgruppe *Umweltradioaktivität* der PTB im Auftrag des *Zweiten Deutschen Fernsehens* (ZDF) untersucht. Denn eine Kernexplosion, wann immer sie stattgefunden hat, könnte sich auch heute, angesichts der langen Halbwertszeiten einiger Radionuklide, noch nachweisen lassen.

Zunächst wurden die Proben gammaspektrometrisch untersucht. Alle gemessenen Aktivitäten sind gering und stammen vorwiegend von natürlich vorkommenden Radionukliden. Als künstlich erzeugtes Radionuklid konnte in den Proben nur Cs-137 nachgewiesen werden. Die für dieses Nuklid gefundenen spezifischen Aktivitäten lagen im Rahmen der überall in Deutschland zu findenden Bodenkontaminationen, die vor allem auf den Reaktorunfall in Tschernobyl zurückzuführen sind.

In einem zweiten Schritt wurden dann nach radiochemischer Aufbereitung der Proben deren Uranaktivitäten untersucht. Eine explodierende Kernwaffe, für die hoch angereichertes Uran benötigt wird, müsste in der näheren Umgebung das natürliche Verhältnis der Uranisotope U-235 und U-238 verschieben. Die Aktivitäten der Uranisotope wurden durch die Messung der Alphastrahlung an speziellen Probenpräparaten bestimmt. Um die Aktivitätsverhältnisse der Uranisotope U-235 und U-238 sicher bewerten zu können, mussten die Messzeiten für jede einzelne Probe auf mehrere Monate ausgedehnt werden. Auch hier ergaben die Messungen keinen Hinweis auf eine Kernexplosion: Die gemessenen Aktivitätsverhältnisse beider Uranisotope stimmen im Rahmen der Messunsicherheit mit dem natürlichen Aktivitätsverhältnis überein.

Insgesamt ergaben die Radionuklidanalysen keinen Hinweis auf eine Kernexplosion im thüringischen Ohrdruf. Die Bodenproben zeigen lediglich Kontaminationen, die unter anderem auf den Reaktorunfall in Tschernobyl zurückgehen.

### Dosimetrische Charakterisierung des quasi-monoenergetischen Photonen-Referenzstrahlungsfeldes

Neue, bisher noch nicht publizierte Untersuchungen weisen auf einen unerwarteten Anstieg der Relativen Biologischen Wirksamkeit (RBW) von Photonenstrahlung mit Energien größer als 1 MeV hin. Diese Ergebnisse wurden in Photonenstrahlungsfeldern eines medizinischen Linearbeschleunigers erhalten. Auf Grund der breiten Energieverteilungen dieser Bremsstrahlungsfelder ist die Zuordnung der erhaltenen RBW zu einer bestimmten Photonenenergie schwierig. Deshalb sollten die entsprechenden Untersuchungen im Rahmen eines vom *Bundesamt für Strahlenschutz* geförderten Projektes mit quasi-monoenergetischen Photonenstrahlungsfeldern wiederholt werden, so dass eine genauere Kenntnis der Abhängigkeit der RBW von der Photonenenergie erlangt werden kann.

Ein solches quasi-monoenergetisches Photonenstrahlungsfeld steht in der PTB zur Verfügung (siehe Titelfoto). Die Photonenstrahlung wird erzeugt, indem Protonen, die mittels eines Van-de-Graaff-Beschleunigers auf eine Energie von 2,7 MeV beschleunigt wurden, auf ein dünnes  $\text{CaF}_2$ -Target treffen. Bei den hierbei auftretenden Kernreaktionen mit Fluor-19 entstehen Photonen im Energiebereich von 6,1 MeV bis 7,1 MeV (sowie niederenergetische Kontaminationsphotonen und hochenergetische Elektronen und Positronen durch weitere Kernreaktionen).

Die Bestimmung der Wasser-Energiedosisleistung erfolgte in Analogie zu der in verschiedenen Dosimetrieprotokollen beschriebenen Vorgehensweise mit einer Ionisationskammer. Auf Grund der geringen Dosisleistung konnte keiner der üblicherweise in der Strahlentherapie eingesetzten Ionisationskammertypen verwendet werden. Deshalb wurde speziell für die Messungen im quasi-monoenergetischen Photonenfeld eine wasser-dichte Ionisationskammer mit einem Messvolumen von ca.  $3 \text{ cm}^3$  konstruiert und

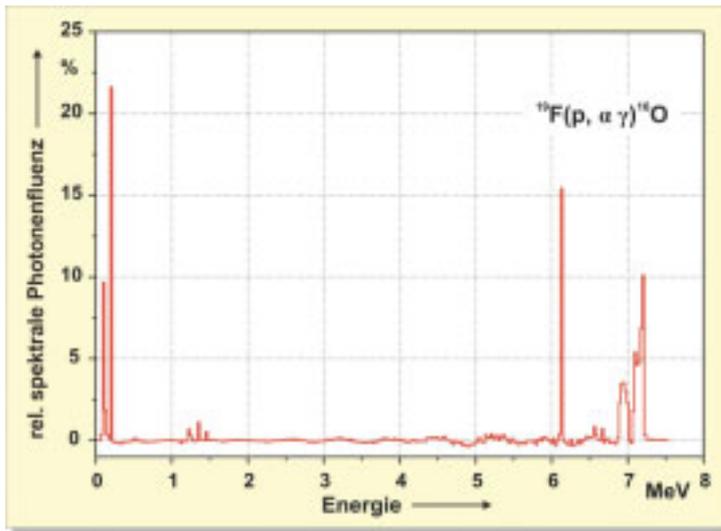


Bild 2: Spektrale Verteilung der Photonenfluenz im quasi-monoenergetischen Photonenstrahlungsfeld.

gebaut, deren prinzipieller Aufbau dem einer Roos-Kammer ähnelt. Für diesen speziellen Ionisationskammertyp mussten sämtliche für die Messung der Wasser-Energiedosis benötigten Korrekturfaktoren selbst bestimmt werden. Dazu wurde zunächst mittels eines hochreinen Germanium-Detektors die spektrale Verteilung der Photonenfluenz im quasi-monoenergetischen Photonenstrahlungsfeld gemessen, siehe Bild 2.

Unter Verwendung dieses Spektrums konnten dann die energieabhängigen Korrekturfaktoren wie das Massen-Stoßbremsvermögensverhältnis Wasser zu Luft oder der globale Feldstörungsfaktor der Ionisationskammer durch Monte-Carlo-Simulation des Teilchentransports berechnet werden. Zur Verifikation der Monte-Carlo Rechnungen wurde eine Tiefen-Dosiskurve im Wasserphantom berechnet und mit einer experimentell bestimmten Tiefendosiskurve verglichen. Beide Tiefendosiskurven sind in Bild 3 dargestellt.

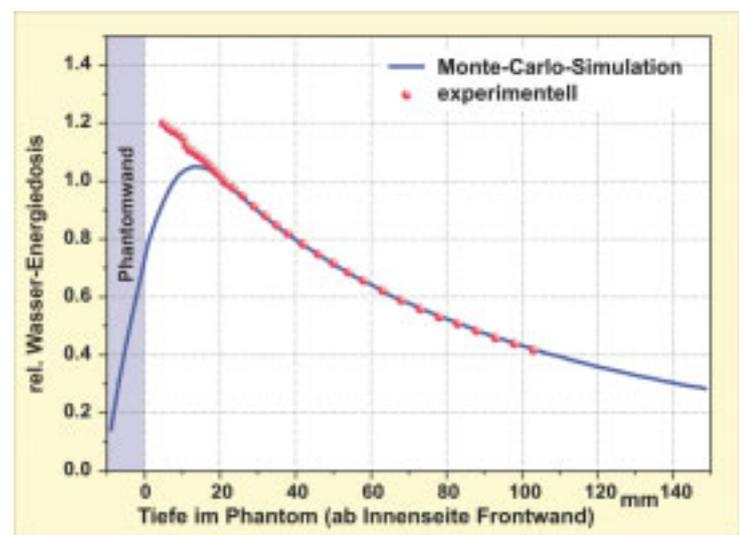
Für Wassertiefen größer als 20 mm stimmen beide Kurven im Rahmen der Unsicherheiten überein; die Ursache der Diskrepanz in geringeren Tiefen besteht darin, dass in der Monte-Carlo-Simulation der Einfluss der im Strahlungsfeld vorhandenen Kontaminations-

Bild 3: Vergleich der experimentell bestimmten und mittels Monte-Carlo-Simulation berechneten Tiefendosiskurven im quasi-monoenergetischen Photonenfeld. Beide Kurven wurden so normiert, dass die relative Wasser-Energiedosis in der Tiefe 21 mm den Wert 1 hat.

elektronen und -positronen nicht berücksichtigt werden konnte. Dieser Einfluss ist jedoch für Wassertiefen größer als 20 mm vernachlässigbar, so dass die Monte-Carlo-Simulation hier zuverlässige Daten liefert.

Nachdem alle erforderlichen Korrekturfaktoren per Monte-Carlo-Simulation berechnet oder experimentell bestimmt waren, konnte die Wasser-Energiedosisleistung im quasi-monoenergetischen Photonenstrahlungsfeld mit einer relativen Standard-Messunsicherheit von 4,0 % bestimmt werden.

Ende Juli 2006 wurden dann fünf Proben menschlichen Blutes mit Dosen im Bereich von 0,2 Gy bis 1,0 Gy bestrahlt. Gegenwärtig wird im *Bundesamt für Strahlenschutz* die Anzahl der in jeder Blutprobe in Abhängigkeit von der Dosis erzeugten dizentrischen Chromosomen bestimmt, die ein Maß für die Relative Biologische Wirksamkeit der hochenergetischen, quasi-monoenergetischen Photonenstrahlung ist.



### Teilchenspuren in nanometrischen Volumina

Ein wesentlicher Faktor bei der Schädigung lebender Zellen durch ionisierende Strahlung ist die räumliche Verteilung aller Reaktionsprodukte, die an den Wechselwirkungsorten zwischen Strahlung und Materie entstehen und die Spurstruktur eines ionisierenden Teilchens ausmachen. Die einzelnen Punkte einer Teilchenspur sind dabei in der Regel sehr inhomogen verteilt und weisen Abstände untereinander auf, die zum Teil im Nanometerbereich liegen. Die Struktur von Teilchenspuren hängt stark von der Art, dem Ladungszustand und der Energie der ionisierenden Strahlung ab und führt z. B. in der Strahlenbiologie dazu, dass die Bestrahlung von lebenden Organismen mit ionisierender Strahlung unterschiedlicher Qualität auch bei gleicher Energiedosis zu unterschiedlichen strahlenbiologischen Effekten führen kann. Daher können die durch die Eigenschaften einer Spurstruktur bewirkten Strahlenschädigungen nicht vollständig mit den traditionellen Mitteln der Strahlendosimetrie erfasst werden. Zukunftsweisend ist hier die Nanodosimetrie, bei der theoretisch Teilchenspuren mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode simuliert und experimentell Strahlungsdetektoren verwendet werden, die in der Lage sind, die Ionisationskomponente einer Teilchenspur messtechnisch zu erfassen. Beide Verfahren werden in der Abteilung systematisch untersucht und weiterentwickelt. Von besonderer Bedeutung sind hier die an dem Van-de-Graaff-Beschleuniger der PTB durchgeführten Experimente für niederenergetische  $\alpha$ -Teilchen mit Energien zwischen 0,4 MeV und 3,2 MeV, da die Wirkungsquerschnitte für  $\alpha$ -Teilchen, die zur Simulation der Experimente benötigt werden, in diesem Energiebereich nicht gut bekannt sind. Bild 4 zeigt die erhaltenen Messergebnisse für die in einem zylindrischen Messvolumen (1,2 mbar Propan; Durchmesser:  $0,35 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) erzeugte mittlere Anzahl von Ionisationsereignissen in Abhängigkeit von der Teilchenenergie im Vergleich zu den Ergebnissen von zwei verschiedenen Monte-Carlo-Simulationsrechnungen. Bei der ersten Simulationsrechnung wurden die Ionisationsquerschnitte für niederenergetische  $\alpha$ -Teilchen gemäß einer Empfehlung der ICRU korrigiert, während die zweite Simulation ohne diese Korrektur durchgeführt

wurde. Wie aus dem Bild zu entnehmen ist, stimmen die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation ohne Korrektur der Wirkungsquerschnitte, im Gegensatz zu den ursprünglichen Erwartungen, viel besser mit den Messergebnissen überein als die Ergebnisse mit Berücksichtigung der Korrektur. Es ist daher davon auszugehen, dass die empfohlene Korrektur nicht für  $\alpha$ -Teilchen in Propan anwendbar ist.

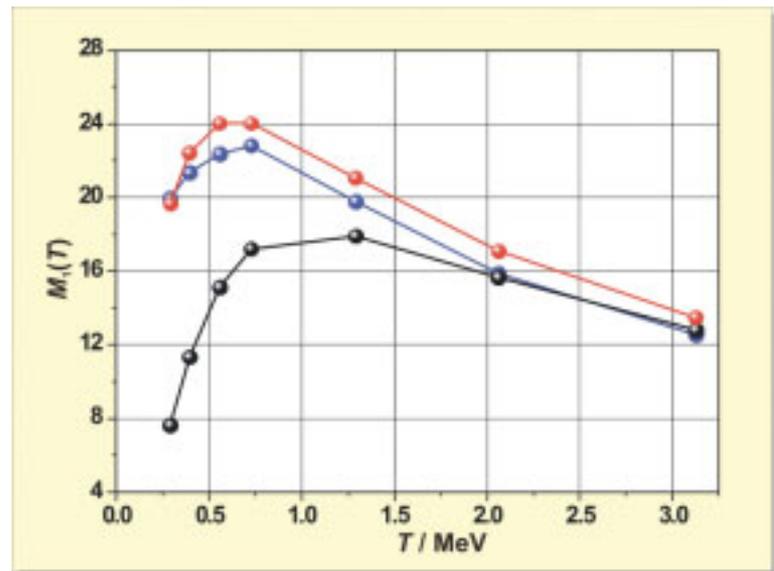


Bild 4: Mittlere Anzahl  $M_1$  von Ionisationsereignissen, die durch  $\alpha$ -Teilchen in einem nanometrischen zylindrischen Volumen (1,2 mbar Propan; Massenbelegung des Durchmessers etwa  $0,35 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) erzeugt wird, in Abhängigkeit von der Teilchenenergie  $T$  im Vergleich zu Monte-Carlo-Simulationsrechnungen: (●) Messergebnisse, (●) Monte-Carlo-Simulation unter Berücksichtigung einer für niederenergetische  $\alpha$ -Teilchen von der ICRU empfohlenen Korrektur der Ionisationsquerschnitte, (●) Monte-Carlo-Simulation ohne Berücksichtigung der Korrektur.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Fortschritte bei der Aktivitätsbestimmung von Elektroneneinfangnukliden mit Hilfe von Flüssigszintillationszählern

Mit einem verbesserten theoretischen Modell lassen sich nun auch Aktivitätsbestimmungen für Radionuklide mit Elektroneneinfang bei kleiner Ordnungszahl ( $Z \leq 30$ ) mit Hilfe der Flüssigszintillationszählung durchführen. In der PTB experimentell bestimmte Nachweiswahrscheinlichkeiten stimmen gut mit den Rechenergebnissen eines in Madrid entwickelten Programms überein. Dadurch werden interessante neue Anwendungen, wie die Aktivitätsbestimmung des langlebigen  $^{41}\text{Ca}$ , möglich. (K. Kossert, FB 6.1, [karsten.kossert@ptb.de](mailto:karsten.kossert@ptb.de))

#### Messbereich für Radon-Folgeprodukte erweitert

Im Rahmen einer umfangreichen Auftragskalibrierung wurden an der Radonnormal-Kammer der PTB erstmalig die Größen Gleichgewichtsfaktor  $F$  und unangelagerter Anteil  $fp$  aus den Extrembereichen (nahe Null bzw. nahe Eins) weitergegeben. Bei dieser Kalibrierung wurden  $F$ -Werte von  $0,06 \pm 0,06$  bis  $0,89 \pm 0,06$  erreicht. Die  $fp$ -Werte konnten zwischen  $(5,3 \pm 4,8) \cdot 10^{-3}$  und  $0,980 \pm 0,014$  eingestellt werden. Damit bietet die Radonnormal-Kammer die weltweit umfangreichsten Möglichkeiten zur Kalibrierung von Radon-Folgeprodukten. (A. Röttger und A. Honig, FB 6.1, [annette.roettger@ptb.de](mailto:annette.roettger@ptb.de), [anja.honig@ptb.de](mailto:anja.honig@ptb.de))

#### Vergleichsmessung mit der Primärnormal-Messeinrichtung zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis von Beta-Brachytherapiequellen.

Zusammen mit dem *National Institute of Standards and Technology* (NIST) in den USA wurden die Primärnormal-Messeinrichtungen zur Darstellung der Wasser-Energiedosis von Beta-Brachytherapiequellen bilateral verglichen. Als Vergleichsfeld wurde das Nahfeld einer  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -Linienquelle ausgesucht, die baugleich in der Gefäß-Strahlentherapie eingesetzt wird. Dabei wurde eine im Rahmen der Unsicherheiten liegende relative Differenz von 6,4 % festgestellt.

(M. Bambynek, FB 6.2, [markus.bambynek@ptb.de](mailto:markus.bambynek@ptb.de))

#### Key comparison für die Wasser-Energiedosis abgeschlossen

Ende des Jahres 2005 wurden Messungen für einen Schlüsselvergleich zwischen dem neuen deutschen Primärnormal für die Einheit der Wasser-Energiedosis – einem Wasser-Kalorimeter – und dem Primärnormal des BIPM durchgeführt. Diese Messungen wurden nun vollständig ausgewertet, die Ergebnisse sind publiziert und der Eintrag in die am BIPM gepflegte „key comparison database“ (KCDB) ist erfolgt. (R.-P. Kapsch, FB 6.2, [ralf-peter.kapsch@ptb.de](mailto:ralf-peter.kapsch@ptb.de))

#### Untersuchungen des $^{60}\text{Co}$ -Referenzstrahlungsfeldes der PTB

Unter Berücksichtigung der Geometrie von Quelle und Bestrahlungsanlage wurde das Photonen-Fluenzspektrum des  $^{60}\text{Co}$ -Referenzstrahlungsfeldes der PTB per Strahlungstransport-Simulationsrechnung bestimmt. Mit Hilfe dieses Spektrums wurde in weitergehenden Rechnungen die Tiefendosiskurve im Wasserphantom berechnet und mit der für gleiche Bedingungen experimentell ermittelten verglichen. Im untersuchten Tiefenbereich bis 15 cm ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung mit Maximalabweichungen kleiner als 0,3 %. Die im Rahmen der Statistik der Rechnung allerdings hochsignifikanten Unterschiede wurden auf Ihre Ursachen untersucht. (H.-M. Kramer, FB 6.2, [hans-michael.kramer@ptb.de](mailto:hans-michael.kramer@ptb.de))

### **Neue hochenergetische Röntgen-Referenzstrahlungsfelder**

Für die Kalibrierung und Bauartprüfung von Strahlenschutzdosimetern wurden neue hochenergetische Röntgen-Referenzstrahlungsfelder, die mit Röhrenspannungen von 350 kV bzw. 400 kV erzeugt werden, realisiert. Die Spektren der Felder wurden gemessen und die charakteristischen Daten bestimmt. (U. Ankerhold, FB 6.3, [ulrike.ankerhold@ptb.de](mailto:ulrike.ankerhold@ptb.de))

### **Betrieb der Ionenbeschleuniger im Fachbereich 6.4**

Der Fachbereich betreibt zwei Ionenbeschleuniger. In dem Zeitraum vom 1.10.2005 bis zum 30.9.2006 betrug die Betriebszeit der beiden Beschleuniger 2532 Stunden, davon wurden 2176 Stunden (86 %) von den Experimentatoren als Strahlzeit für ihre Experimente genutzt. Die Strahlzeit verteilt sich zu je ca. 50 % auf PTB-interne und externe Projekte. (W. Beverung, FB 6.4, [Wolfgang.Beverung@ptb.de](mailto:Wolfgang.Beverung@ptb.de))

### **PTB erweitert Zusammenarbeit im Bereich Fusionsforschung**

Die Zusammenarbeit der PTB mit Instituten aus dem Bereich der Fusionsforschung wird durch den Abschluss einer Rahmenvereinbarung mit dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching und Greifswald intensiviert. (A. Zimbal, FB 6.5, [andreas.zimbal@ptb.de](mailto:andreas.zimbal@ptb.de))

### **Radiographie mit einer Terawatt-Laser $\gamma$ -Quelle**

Für Anwendungen in der Gepäckkontrolle wurde ein zeitauflösendes Messsystem für die Radiographie mit Gammastrahlung und schnellen Neutronen entwickelt und erstmals am Terawattlaser der Universität Jena eingesetzt. (V. Dangendorf, FB 6.5, [volker.dangendorf@ptb.de](mailto:volker.dangendorf@ptb.de))

### **Basisgrößen der Strahlenmetrologie nicht auf DNA-Segmente anwendbar**

Bei der Simulation der Spurstrukturen von Elektronen in Wasser zeigte sich, dass die traditionellen Basisgrößen der Strahlenmetrologie (wie der W-Wert oder der Fano-Faktor) nicht zur Beschreibung der Ionisationscluster-Erzeugung in einem nanometrischen Volumen mit den Abmessungen eines DNA-Segments ausreichen. (B. Großwendt, FB 6.6, [bernd.grosswendt@ptb.de](mailto:bernd.grosswendt@ptb.de))

### **Nanodosimetrische Aspekte der Strahlenqualitäten leichter Ionen**

Durch Simulation der Ionisationscluster-Erzeugung in einem Zielvolumen mit den Abmessungen eines DNA-Segments konnte auch für Protonen und  $\text{He}^{2+}$ -Ionen gezeigt werden, dass nanodosimetrische Messgrößen stark mit strahlenbiologischen Effekten in der DNA korreliert sind. Sie sind damit auch gut zur Charakterisierung der Strahlenqualitäten leichter Ionen geeignet. (B. Großwendt, FB 6.6, [bernd.grosswendt@ptb.de](mailto:bernd.grosswendt@ptb.de))

### **Nanodosimetrische Verteilungen zum ersten Mal für niederenergetische Protonen gemessen**

Nach Weiterentwicklung des vom *Weizmann Institut* übernommenen Nanodosimeters wurde am Van-de-Graaff-Beschleuniger der PTB zum ersten Mal die Ionisationscluster-Erzeugung durch niederenergetische Protonen mit Energien unter 3,5 MeV systematisch untersucht. (G. Hilgers, FB 6.6, [gerhard.hilgers@ptb.de](mailto:gerhard.hilgers@ptb.de))

### **W-Werte für Protonen sind in flüssigem Wasser deutlich kleiner als in der Dampfphase**

Unter Verwendung neuer Datensätze für die Wirkungsquerschnitte von Protonen in Wasser wurde gezeigt, dass der W-Wert von Protonen in Wasser in der flüssigen Phase um etwa 3 eV kleiner ist als in der Dampfphase. Grund hierfür ist der in flüssigem Wasser deutlich größere Wirkungsquerschnitt für Ionisation. (W.-Y. Baek, FB 6.6, [WoonYong.Baek@ptb.de](mailto:WoonYong.Baek@ptb.de))

### **Dringender Bedarf an neuen Wirkungsquerschnittsdaten für die Monte-Carlo-Simulation der Ionisationscluster-Erzeugung.**

Zwei theoretische Modelle für die Bestimmung der Wirkungsquerschnitte für Ionisation durch Protonen in zwei herkömmlichen Messgasen für Anwendungen in der Nanodosimetrie wurden mit Hilfe eines im FB 6.6 entwickelten Monte-Carlo-Programms untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Datenabweichung auf die resultierende Häufigkeitsverteilung der Ionisationsclustergröße erheblich ist. Daher es ist dringend notwendig, eine genauere Kenntnis der Ionisationsquerschnitte zu gewinnen. (E. Gargioni, FB 6.6, [elisabetta.gargioni@ptb.de](mailto:elisabetta.gargioni@ptb.de))

### Indirekter Vergleich zwischen Kryoradiometer SYRES und Ionisationskammer PK100 am BESSY II

Die Strahlungsleistung von Photonenstrahlung im Energiebereich von 10 keV bis 60 keV an der BAMline am Elektronenspeicherring BESSY II in Berlin wurde zum einen mit dem neu entwickelten Kryoradiometer (SYRES) und zum anderen mit der Freiluft-Ionisationskammer PK100 gemessen. Aus einem indirekten Vergleich zwischen beiden Methoden, mit Hilfe von vier Halbleiter-Photodioden als Transfornormale, ergaben sich neue Erkenntnisse über die Literaturwerte der Massen-Energieabsorptionskoeffizienten von Photonen in Luft. (H. Rabus, FB 6.6, hans.rabus@ptb.de)

### Metrologie für die Wirtschaft

#### Messungen des Gehalts natürlicher Radionuklide in Blei und Glas

Die PTB war durch die Messungen des  $^{210}\text{Pb}$ - und  $^{210}\text{Po}$ -Gehalts an über 50 Bleiprobe eines Industrieunternehmens an Entscheidungen zur Wahl des richtigen Bleis mit einer Gesamtmasse von 2000 t für ein Neutrinoexperiment beteiligt. Die PTB unterstützt durch Messungen an Glasrohstoffen und Endprodukten ein größeres deutsches Unternehmen bei der Einhaltung der Qualitätsanforderungen in Bezug auf einen extrem niedrigen Anteil an Alphateilchen, emittierenden Radionukliden. (D. Arnold, FB 6.1, dirk.arnold@ptb.de)

#### PTB-Bericht zur Umsetzung eines Länderausschussbeschlusses zur Sicherheit von Vollschutzgeräten erschienen

Vom Länderausschuss Röntgenverordnung beim BMU wurden, durch Beschluss vom 27. März 2001, hohe technische Anforderungen an die Sicherheitsvorrichtungen von Hoch- und Vollschutzgeräten gestellt. Diese Anforderungen und deren Prüfung im Rahmen der Bauartprüfungen der PTB sind im Bericht PTB-Dos-49 in Form eines Leitfadens für Hersteller und Gutachter detailliert zusammengestellt. (S. Neumaier, FB 6.3, stefan.neumaier@ptb.de)

### Die Neutronenkomponente in zwei hochenergetischen Photonen-Referenzfeldern

Experimentelle Messung des differentiellen  $0^\circ$ -Neutronenemissionswirkungsquerschnitts für die Reaktion  $^{13}\text{C}(p,n)^{13}\text{N}$  als Funktion der Protonenenergie  $E_p$ , zur quantitativen Bestimmung der Neutronenkontamination in den hochenergetischen Photonenfeldern nach ISO 4037. Neues gemischtes Photonen/Neutronen-Feld für die Kalibrierung von z. B. TEPCs. (S. Röttger, FB 6.4, stefan.roettger@ptb.de)

### Metrologie für die Gesellschaft

#### Organisation eines nationalen Vergleichs zur Aktivitätsbestimmung von $^{99m}\text{Tc}$ in der Nuklearmedizin

Die PTB hat in Zusammenarbeit mit der Firma *QSA Global GmbH* aus Braunschweig einen nationalen Vergleich zur Aktivitätsbestimmung von  $^{99m}\text{Tc}$  in Krankenhäusern und nuklearmedizinischen Praxen organisiert. Die von den Teilnehmern gemeldeten und anschließend in der PTB ausgewerteten Daten zeigen eine leichte Verbesserung der Qualität gegenüber früheren ähnlichen Projekten. Die Auswertung gibt aber auch Hinweise auf die Ursachen von Diskrepanzen, die bei einigen Teilnehmern festgestellt wurden. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

#### Klimakammer für Thoron-Folgeprodukt-Referenzatmosphären fertig gestellt

Für die Messung der Thoron-Folgeprodukte wird z. Zt. in einem vom *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit* geförderten Projekt eine Thoron-Folgeprodukt-Kammer aufgebaut. Diese besteht aus einer  $6\text{ m}^3$  fassenden, begehbaren Klimakammer, in der die Umweltparameter Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Aerosolgehalt eingestellt und kontrolliert werden können. Als Modell-aerosol wird analog zur Radonnormal-Kammer Carnaubawachs-Aerosol verwendet. Der Aufbau der Klimakammer sowie deren Inbetriebnahme konnten erfolgreich abgeschlossen werden. (A. Röttger und D. Arnold, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de; dirk.arnold@ptb.de)

### **Unsicherheit der auf Alanin basierenden Sekundärnormal-Messeinrichtung für die Wasser-Energiedosis $D_w$ zwischen 2 Gy und 25 Gy**

Das Unsicherheitsbudget für die Sekundärnormal-Messeinrichtung für die Wasser-Energiedosis in Strahlungsfeldern hoher Energie auf der Basis von Alanin/ESR wurde etabliert. Die relative Standard-Messunsicherheit beträgt 0,15 % bei 25 Gy, 0,53 % bei 5 Gy und 1,5 % bei 2 Gy. Die angegebenen Werte gelten für Bestrahlungen mit  $^{60}\text{Co}$ , ohne die Unsicherheit des Primärnormals. (M. Anton, FB 6.2, mathias.anton@ptb.de)

### **Dosimetrische Charakterisierung des quasi-monoenergetischen Photonen-Referenzstrahlungsfeldes**

Im Rahmen eines vom *Bundesamt für Strahlenschutz* geförderten Projektes zur Bestimmung der Relativen Biologischen Wirksamkeit (RBW) für hochenergetische, quasi-monoenergetische Photonenstrahlung wurde das in der PTB vorhandene quasi-monoenergetische Photonen-Referenzstrahlungsfeld (Photonenenergien 6...7 MeV) hinsichtlich der erzeugten Wasser-Energiedosisleistung charakterisiert. In diesem Strahlungsfeld wurden sodann 5 Proben menschlichen Blutes mit Wasser-Energiedosen zwischen 0,2 Gy und 1,0 Gy bestrahlt. Im *Bundesamt für Strahlenschutz* wird gegenwärtig die Anzahl der in den Blutzellen durch die Bestrahlung verursachten dizentrischen Chromosomen bestimmt, die ein Maß für die relative biologische Wirksamkeit hochenergetischer Photonenstrahlung ist. (R.-P. Kapsch, FB 6.2, ralf-peter.kapsch@ptb.de)

### **Erweiterung des Definitionsbereichs der Praktischen Spitzenspannung**

Der Definitionsbereich der Praktischen Spitzenspannung wurde auf den Spannungsbereich von 150 kV bis 300 kV ausgedehnt. Die bisherige Definition im Bereich von 20 kV bis 150 kV bleibt von der Erweiterung unberührt. (H.-M. Kramer, FB 6.2, hans-michael.kramer@ptb.de)

### **Kalorimetrische Bestimmung strahlungsqualitätsabhängiger Faktoren $k_Q$ bei 8 MV und 16 MV Photonenstrahlung**

Mit Hilfe eines Wasserkalorimeters konnten für verschiedene Ionisationskammern der NE2571 und NE2561 Typen die strahlungsqualitätsabhängigen Korrekturfaktoren  $k_Q$  bei 8 MV und 16 MV Photonenstrahlung bestimmt werden. Die Standardmessunsicherheit der experimentell bestimmten  $k_Q$ -Faktoren beträgt für eine einzelne Ionisationskammer ca. 0,3 %. Damit lässt sich die Messunsicherheit bei der ionometrischen Bestimmung der Wasser-Energiedosis  $D_w$  deutlich reduzieren, da bislang berechnete  $k_Q$ -Faktoren mit einer Standardmessunsicherheit von 1 % verwendet werden. (A. Krauss, FB 6.2, achim.krauss@ptb.de)

### **Luftdruckabhängigkeit der Anzeige einer Monitor-Ionisationskammer bei hochenergetischer Photonenstrahlung**

Bei der Bestimmung der Wasser-Energiedosis unter Referenzbedingungen an einem Messort innerhalb eines Wasserphantoms wird im Photonenstrahlungsfeld eines Linearbeschleunigers häufig eine großflächige Folien-Ionisationskammer zur Monitorierung der Strahlung verwendet, die vor dem Wasserphantom montiert ist. Die übliche Korrektur der Luftdruckabhängigkeit der Anzeige dieser Monitorkammer nach Maßgabe der Luftdichte im Messvolumen der Kammer vernachlässigt, dass für Photonenstrahlung das Luftvolumen zwischen Strahlungsquelle und Monitorkammer prinzipiell als Dosisaufbauschicht wirkt. Bei Variation des Luftdruckes führt dieser Effekt am Linearbeschleuniger der PTB zu einer zusätzlichen Änderung der Monitoranzeige von ca. 0,2 % pro Prozent Luftdruckänderung. (A. Krauss, FB 6.2, achim.krauss@ptb.de)

### **Bestimmung der Wasser-Energiedosis für die interstitielle Brachytherapie**

Die Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis für die interstitielle Brachytherapie von Prostatakarzinom ist ein Stück näher gerückt. Für niederenergetische Photonenstrahlung (bis ca. 35 keV) gelang die Weiterentwicklung des auf einer Graphit-Extrapolationskammer beruhenden Messverfahrens. (Th. Schneider, FB 6.2, thorsten.schneider@ptb.de)

### Neue Kalibrieranlage für $^{192}\text{Ir}$ - und $^{60}\text{Co}$ -Brachytherapie-Strahlungsquellen

Die PTB kalibriert schon seit ca. 15 Jahren  $^{192}\text{Ir}$ -Brachytherapie-Quellen und seit kurzem auch  $^{60}\text{Co}$ -Quellen in der Messgröße Reference Air Kerma Rate (RAKR). Der Trend, immer stärkere Quellen für die Therapie zu verwenden, machte aus Strahlenschutzgründen den Aufbau einer neuen ferngesteuerten Kalibrieranlage für diese hochradioaktiven Strahlungsquellen notwendig. (H.-J. Selbach, FB 6.2, hans-joachim.selbach@ptb.de)

### Ermittlung der Strahlenbelastung helfender Personen in der Tiermedizin

Im Rahmen eines vom BMU geförderten Forschungsvorhabens wurde die Strahlenbelastung helfender Personen in der Tiermedizin gemessen. Anhand dieser Daten wird für diese Personen eine vereinfachte Methode zur Dosisermittlung entwickelt. (O. Hupe, FB 6.3, oliver.hupe@ptb.de)

### Halbzeit beim AKD-PTB-Messvergleich von passiven $\text{H}^*(10)$ -Dosimetern

Dieser Messvergleich findet in dem Zeitraum vom Herbst 2005 bis zum Herbst 2007 statt. Die zehn teilnehmenden Institutionen kommen aus Deutschland, der Schweiz und aus Österreich. In der ersten Messperiode wurden insgesamt 188 Dosimeter auf drei verschiedenen PTB-Messflächen exponiert. 57 Dosimeter wurden zusätzlich in PTB-Photonenfeldern bestrahlt. Es wurden erste Ergebnisse bezüglich der Streuung der Messwerte, aber auch bezüglich der praktischen Handhabung der Dosimeter erzielt. (H. Dombrowski, FB 6.3, harald.dombrowski@ptb.de)

### Bestimmung der Ansprechfunktion und Energiekalibrierung von Teilchendetektoren für eine NASA-Mission

Für die STEREO-Mission der NASA entwickelten Wissenschaftler der Universität Kiel ein ausgeklügeltes Experiment mit zwei Paaren von Teilchendetektoren. Diese SEPT-Module (Solar Electron and Proton Telescope) messen und unterscheiden energiereiche Materieteilchen von der Sonne, hauptsächlich Elektronen und Protonen. Die Energiekalibrierung und die Nachweisschwellen wurden an den Teilchenbeschleunigern der PTB im Energiebereich von 0,07 MeV bis 15 MeV bestimmt. (Ulrich Giesen, FB 6.4, ulrich.giesen@ptb.de)

### Untersuchung der $^{15}\text{N}(p,n)$ -Reaktion als Neutronenquelle in Streuexperimenten

Messungen von Neutronen-Streuquerschnitten im Energiebereich von 2 MeV bis 4 MeV am Flugzeitspektrometer der PTB sind in Planung. Für die Durchführung dieser Experimente wird eine Neutronenquelle zur Erzeugung monoenergetischer Neutronen in diesem Energiebereich benötigt.

Die  $^{15}\text{N}(p,n)$ -Reaktion wurde in Hinblick auf ihre Eignung als Neutronenquelle in Streuexperimenten untersucht. (E. Pönitz, FB 6.4, erik.poenitz@ptb.de)

### Untersuchung amtlicher Personendosimeter mit gemischten Neutronen- und Photonenbestrahlungen

Im Rahmen der jährlichen Vergleichsmessungen der amtlichen Neutronenpersonendosimeter wurde mit Zusatzbestrahlungen gezeigt, dass eine zusätzliche Photonenbestrahlung die Auswertung der Neutronenkomponente nicht beeinflusst und dass alle so bestrahlten Albedodosimeter die Kriterien für ein Bestehen der Vergleichsmessungen erfüllen. (A. Zimbal, FB 6.5, andreas.zimbal@ptb.de)

### Elektronisches Personendosimeter für hochenergetische Neutronen

Das in der PTB entwickelte elektronische Personendosimeter DOS-2002 für Neutronenstrahlung wurde erfolgreich in die Industrie transferiert. Aufbauend auf diesem System wurde ein neues Prototyp-Dosimeter mit verbessertem Ansprechvermögen für hochenergetische Neutronen entwickelt, das für Anwendungen an Hochenergie-Beschleunigern geeignet ist. (M. Luszik-Bhadra, FB 6.5, marlies.luszik-bhadra@ptb.de)

### **Verbessertes Messverfahren zur Bestimmung der Schwächungseigenschaften von Röntgenschutzkleidung**

Bei der Messung der Schwächungseigenschaften von Röntgenschutzkleidung muss im geschwächten Strahl die durch das Schutzmaterial selbst erzeugte Streu- und Fluoreszenzstrahlung vollständig mit erfasst werden. Die PTB hat hierfür ein neues Messverfahren entwickelt, welches im Vergleich zur bisher angewendeten Methode wesentlich leichter zu realisieren ist, mit kleineren Materialproben auskommt und zudem mit kleineren Unsicherheiten behaftet ist. Die neue Messmethode wurde über die Norm DIN 6813-1 in die Praxis eingeführt. (L. Büermann, FB 6.6, ludwig.bueermann@ptb.de)

### **Neue Röntgenstrahlungsqualitäten für die digitale Mammographie**

Beim „Mammographie-Screening“ werden u.a. auch neuere, digitale Mammographieranlagen eingesetzt, deren Röntgenspektren sich deutlich von konventionellen Anlagen unterscheiden. Das Dosisansprechvermögen von modernen Diagnostikdosimetern mit Halbleiterdetektoren hängt aber sehr empfindlich von der spektralen Form der Röntgenstrahlung ab. Die PTB hat deshalb neue Röntgenstrahlungsqualitäten für die Mammographie etabliert und ist nun in der Lage, Diagnostikdosimeter den aktuellen Anforderungen entsprechend zu prüfen und zu kalibrieren. Damit leistet die PTB einen wichtigen Beitrag zur Qualitätssicherung in der digitalen Mammographie. (L. Büermann, FB 6.6, ludwig.bueermann@ptb.de)

## **Internationale Angelegenheiten**

### **Gammaskopimetrische Messung an aktivierten JET-Metallproben**

Zusammen mit weiteren Partnern der *Collaboration of European Low-level Underground Laboratories* (CELLAR) hat sich die PTB erstmals an der Messung aktivierter Metallproben aus Experimenten am *Joint European Torus* (JET) beteiligt. Ziel ist es, durch die Messung der Aktivierungsprodukte Rückschlüsse auf das Spektrum der Neutronen und geladener Teilchen im Plasma zu erhalten. (D. Arnold, FB 6.1, dirk.arnold@ptb.de ; S. Neumaier, FB 6.3; stefan.neumaier@ptb.de )

### **Kalibrierung einer Ionisationskammer für das NCM in Bulgarien**

Im Rahmen des Euromet-Projekts 909 wird eine Ionisationskammer des bulgarischen nationalen Metrologie-Instituts NCM mit Aktivitätsnormalen der PTB kalibriert. Das Projekt, das den Aufbau einer automatisierten Datenerfassung, die Kalibrierung sowie die Etablierung von Prozeduren zur Auswertung und Qualitätskontrolle umfasst, wird das NCM in die Lage versetzen, Kalibrierdienste für Aktivitätsmessungen, die rückführbar auf die Normale der PTB sind, anzubieten und damit insbesondere dem großen Bedarf im Bereich der Nuklearmedizin nachzukommen. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

### **Konzeption für die Vergleichsmessung CCRI(III)-K8 für die Messung der Fluenz thermischer Neutronen**

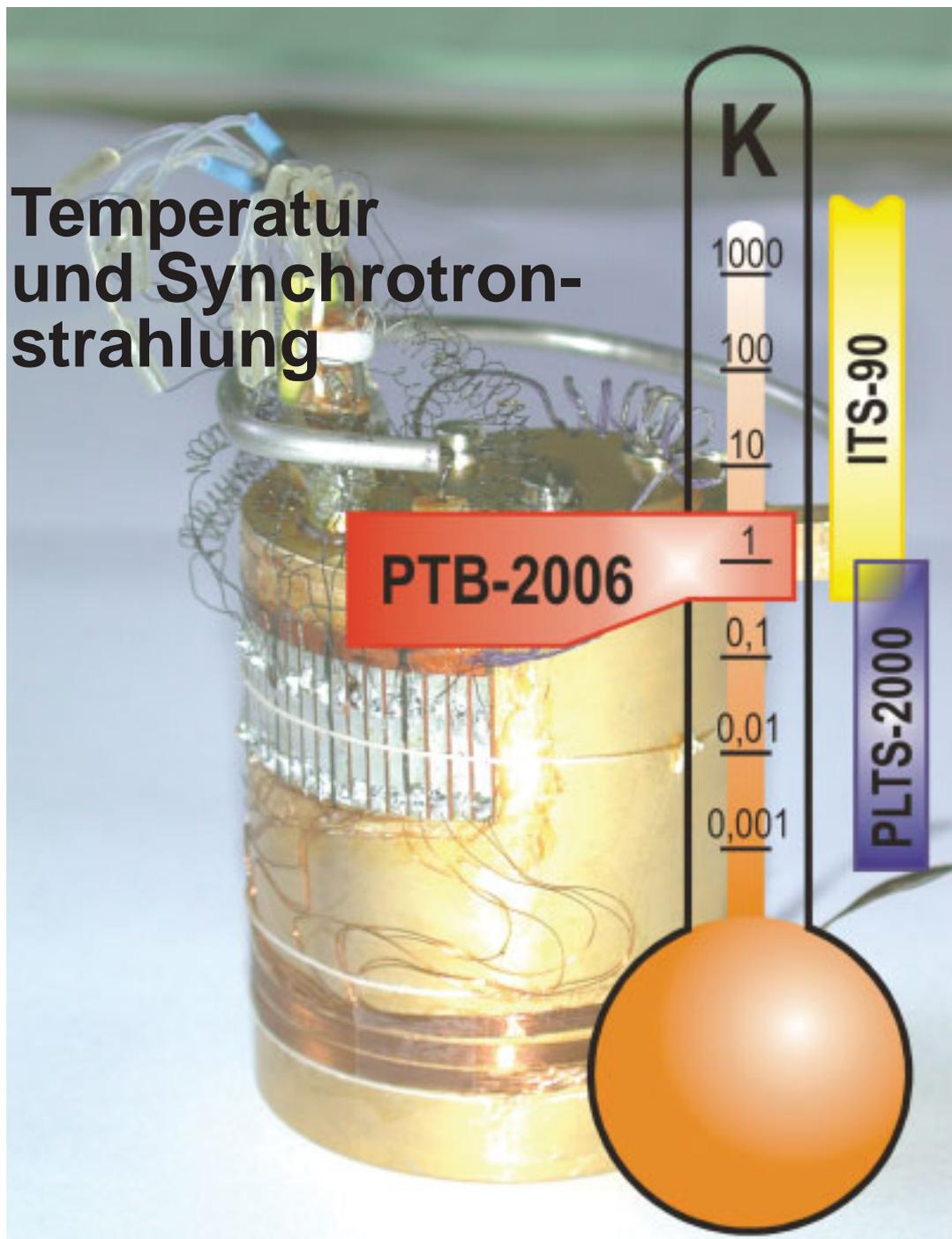
Die PTB ist verantwortlich für Konzeption, Durchführung und Auswertung eines internationalen Schlüsselvergleichs für Messung der Fluenz thermischer Neutronen. Für den Vergleich wurden Transferinstrumente ausgewählt, die auch Rückschlüsse auf die von den Teilnehmern für ihre Referenzfelder angenommene spektrale Verteilung zulassen. (R. Nolte, FB 6.4, ralf.nolte@ptb.de)

## **Weitere Informationen**

### **Mobile Bestrahlungseinrichtung zur Simulation einer radioaktiven Wolke**

Ortsdosimeter müssen in der Lage sein, kleine Änderungen der Umgebungsstrahlung, wie sie beim Vorbeizug einer radioaktiven Wolke auftreten, sicher zu messen. Um diese Eigenschaft untersuchen zu können, wurde im Fachbereich 6.3 eine Bestrahlungseinrichtung entwickelt, mit der die Simulation der zeitlichen Entwicklung der Dosisleistung einer vorbeiziehenden radioaktiven Wolke möglich ist. Zur Erzeugung der erhöhten Umgebungsstrahlung werden je zwei  $^{60}\text{Co}$ - und  $^{137}\text{Cs}$ -Quellen eingesetzt. Zusätzlich kann die Dosisleistung mit drei verschiedenen dicken Bleiabsorbern variiert werden. (G. Buchholz, FB 6.3, gerd.buchholz@ptb.de)

# Temperatur und Synchrotron- strahlung



Berichte der Abteilungen

Abteilung

# Temperatur Synchrotron

## Institut Berlin

Auch im Jahr nach den Albert-Einstein-Gedenkveranstaltungen gilt es von einigen „Highlights“ zu berichten, die in Berlin stattfanden und nicht nur die Abteilung 7, sondern das ganze Berliner Institut bzw. die gesamte PTB betrafen. Das Kuratorium tagte Anfang Mai in Berlin und konnte die feierliche Einweihung des Gebäudes des Willy-Wien-Laboratoriums in Berlin-Adlershof miterleben, für dessen Bau es sich über viele Jahre eingesetzt hatte. Dass die PTB nunmehr auch sichtbar auf Europas größtem Campus für Wissenschaft, Wirtschaft und Medien mit einer eigenen Adresse angekommen ist, zeigt die Gästeliste, angeführt von Berlins Bürgermeister und Wirtschaftssenator Harald Wolf (Bild 1), der die PTB in seinem Grußwort ausdrücklich in Adlershof willkommen hieß und seiner Erwartung an substantielle wissenschaftliche Beiträge Ausdruck verlieh. Nach der Fertigstellung des Gebäudes und der Herstellung der notwendigen Voraussetzungen an Infrastrukturversorgung und Sauberkeit arbeitet die BESSY GmbH jetzt mit Hochdruck am Aufbau des Niederenergie-Speicherrings Metrology Light Source. Trotz einiger bei einem Projekt solcher Dimension kaum vermeidbarer Schwierigkeiten ist die PTB am Ende dieses Jahres im Zeitplan und daher besteht gute Hoffnung, am Jahresbeginn 2008 den Nutzern den ersten Strahl von Synchrotronlicht zur Verfügung stellen zu können.

### Titelbild

Es gibt signifikante Unterschiede zwischen den Temperaturskalen ITS-90 und PLTS-2000 im Überlappungsbereich. Die PTB liefert mit ihrem Dampfdruckthermometer (Hintergrundfoto) einen wichtigen Beitrag (PTB-2006) zur Harmonisierung in der neuen internationalen Temperaturskala ITS-201x.



Bild 1: Das Willy-Wien-Laboratorium neben dem Speicherring BESSY II in Berlin-Adlershof aus der Luft und Berlins Bürgermeister und Wirtschaftssenator Harald Wolf bei seinem Grußwort



Bild 2: Die Teilnehmer der diesjährigen nationalen Konferenz über Temperatur und Feuchte vor dem Hermann-von-Helmholtz-Bau

Mitte Mai fand zum dritten Mal die größtenteils national geprägte Konferenz „Temperatur 2006“ (s. „Nachrichten des Jahres“) im Hermann-von-Helmholtz-Bau statt (Bild 2), die traditionell zusammen mit der VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik GMA veranstaltet wird. Rund 160

# r und nstrahlung

Teilnehmer erlebten zwei Tage lang eine aktuelle Darstellung des Standes der Temperatur- und Gasfeuchtemesstechnik in großer Breite von den Grundlagen der Temperaturskala und der angestrebten Neudefinition des Kelvin bis zu Anwendungen in der Weltraumfahrt, dem praktischen Einsatz neuer Fixpunkte und der Entwicklung mikromechanischer Sensoren. Der Praxisbezug wurde eindrucksvoll unterstrichen durch die hohe Industriebeteiligung von mehr als 50 %.

Schließlich gab es auch einen Anlass zum Gedenken: Der Geburtstag Emil Warburgs, der 17 Jahre Präsident der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt war, jährte sich zum 160., sein Todestag zum 85. Mal. Die *Deutsche Physikalische Gesellschaft* (DPG), die *Physikalische Gesellschaft zu Berlin* (PGzB), die *Emil-Warburg-Stiftung* und die PTB ehrten den bedeutenden Physiker und Forschungsmanager zusammen mit zahlreichen Gästen aus Wissenschaft und Politik mit einer Fest-

veranstaltung: Emil Warburg – Vision und Präzision im Berliner Institut der PTB (s. „Nachrichten des Jahres“) (Bild 3).

Die Beziehungen des Instituts zu seinem Berliner Bezirk Charlottenburg-Wilmersdorf haben sich im letzten Jahr weiter vertieft. Die Bezirksbürgermeisterin Monika Thiemen (Bild 4) kam bei einem ihrer monatlichen Kiezspaziergänge am zweiten Samstag im Januar in Begleitung von 250 Charlottenburgern zu Besuch. Wegen der großen Anzahl konnten nach einem einführenden Vortrag im Hörsaal des Hermann-von-Helmholtz-Baus bei einem Rundgang die überwiegend denkmalgeschützten Gebäude nur von außen gezeigt und dabei vorgestellt werden, was drinnen geforscht wird.



Bild 3: In der ersten Reihe Peter Hintze, Staatssekretär im Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Dr. Hans-Gerhardt Husung, Staatssekretär in der Berliner Senatsverwaltung für Wissenschaft, Forschung und Kultur, Prof. Dr. Eberhard Umbach, Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und Monika Thiemen, Bürgermeisterin des Berliner Bezirks Charlottenburg-Wilmersdorf (v.l.n.r.) bei der Gedenkveranstaltung für Emil Warburg



Bild 4: Bezirksbürgermeisterin von Charlottenburg-Wilmersdorf, Thiemen, beim „Kiezspaziergang“

### Abteilung 7 „Temperatur und Synchrotronstrahlung“

Die Kernaufgaben der Abteilung 7, die gemeinsam mit der nachfolgend dargestellten Abteilung 8 im Institut Berlin untergebracht ist, sind die Darstellung und Weitergabe der Temperatureinheit und ihrer Skala, der radio-metrischen Größen vom Terahertz- bis zum Röntgenbereich sowie der Druckskala im Vakuumbereich. Untrennbar zur Weitergabe der Einheiten gehören die Betreuung einer großen Zahl von Kalibrierlaboratorien und Prüfstellen und – in besonderen Fällen – die Kalibrierung und Bauart- bzw. Konformitätsprüfung im eigenen Hause. Diese Tätigkeit ist neben der Organisation von Fachtagungen dringend notwendig für den unmittelbaren Kontakt mit den Endkunden und zur Ermittlung von Entwicklungstendenzen und künftigen messtechnischem Bedarf.

### Basiseinheit Kelvin und Skala der Temperatur

Der Verpflichtung der PTB aufgrund ihrer zahlreichen und bedeutsamen Beiträge zur Temperaturmetrologie seit Ende des 19. Jahrhunderts folgend sind die Arbeiten hierzu in großer Breite fortgesetzt worden. Ein herausragendes Beispiel ist die Weiterentwicklung der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie – bei tiefen Temperaturen seit vielen Jahren eine Domäne im Hause – für den Temperaturbereich um den Wassertripelpunkt. Die nötigen Investitionen wurden vorbereitet, damit im kommenden Jahr ein merklicher Schritt in Richtung auf die

präzisere Bestimmung der Boltzmann-Konstanten und die durch ihre Festlegung ermöglichte Neudefinition des Kelvin getan werden kann. Mitte Oktober traf sich die weltweit daran arbeitende Expertenrunde erneut in Berlin und stellte fest, dass Zeitplan und Erreichbarkeit der angestrebten Unsicherheiten sich immer noch mit den vom CIPM vorgegebenen Rahmen vereinbaren lassen. Alle bis zum Jahresende 2010 beim CODATA-Team eingereichten neu bestimmten Werte der Boltzmann-Konstanten werden in einer Ausgleichsrechnung bewertet und gehen entsprechend in den dann zur Neudefinition des Kelvin vorgeschlagenen Wert der Boltzmann-Konstanten ein.

Parallel, jedoch nicht mit ganz so hohem Zeitdruck, wird weltweit an der Verbesserung der Internationalen Temperaturskala, derzeit die ITS-90, gearbeitet. Die PTB leistet dazu in verschiedenen Temperaturbereichen wichtige konkrete Beiträge. Sie sind im Folgenden von hohen zu tiefen Temperaturen geordnet.

Bei Temperaturen oberhalb von 1100 °C, wo es bisher keine geeigneten Fixpunktmaterialien gab, wurde im Rahmen des europäischen Joint-iMERA-Projekts „High-temperature fixed-points for a future temperature scale“ ein konkreter Zeitplan bis 2011 erstellt, bei dem auch Kollegen aus Japan und Russland beteiligt sind. In engem Austausch von Erfahrungen und Ergebnissen – im Juni fand dazu ein Workshop am LNE in Paris statt – sind robuste, auch für den industriellen Einsatz geeignete Fixpunktzellen mit eutektischen Metall-Kohlenstoff-Legierungen in Graphit-Tiegeln für Temperaturen bis 3000 °C das Entwicklungsziel verschiedener Arbeitsgruppen. Die PTB hat, um den Einsatz dieser Fixpunkte sowohl in der Strahlungs- als auch in der Berührungsthermometrie sicher zu stellen, eine patentierte Kombizelle entwickelt und im Einsatz. Alleinstellungsmerkmal der PTB bei dieser Kooperation ist ihre herausragende Erfahrung und Ausrüstung bei der Messung der thermodynamischen Temperaturen von Fixpunkten aufgrund der sehr präzise auf absolut-radiometrische Messungen zurückgeführten Strahlungsthermometrie. Die PTB ist demzufolge auch Workpackage Leader für thermodynamische Temperaturbestimmung in dem erwähnten europäischen Programm. Als erreichbares Ziel wird

dabei die Reduzierung der Unsicherheiten von augenblicklich 1 K auf 0,2 K im Bereich von 3000 °C angestrebt. Bis 2000 °C kommt dies auch unmittelbar einer Verbesserung der Berührungsthermometrie mit Thermoelementen aus Edelmetallen zugute (Bild 5).



Bild 5: Isothermer Hochtemperatur-Thermostat zur Entwicklung von eutektischen Fixpunktzellen

Im Bereich der Reinstmetallfixpunkte der ITS-90 zwischen 400 °C und 1100 °C hat die PTB eine führende Rolle bei der Reduzierung der Unsicherheiten der zugeordneten Temperaturen. Auch hier leistet sie wichtige Beiträge zu einem iMERA/EUROMET-Projekt „Toward more accurate temperature fixed points“. Spezielle Arbeiten zur Herstellung zertifizierter Reinstmaterialien werden in einem DFG-geförderten Vorhaben zusammen mit der *Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung* (BAM), die ihre exzellenten experimentellen Möglichkeiten in der Glimmentladungs-Massenspektrometrie zur Analyse der Verunreinigungen unterhalb des ppm-Bereichs einbringt, und der TU Ilmenau durchgeführt. Ein entsprechender gemeinsamer Beitrag mit dem kanadischen NRC in der Zeitschrift *Metrologia* über die Abhängigkeit der Thermometrie von der Metrologie in der Chemie wurde von den Herausgebern Anfang dieses Jahres als Highlight 2005 geehrt.

Bei ganz tiefen Temperaturen im Überlappbereich der ITS-90 und der Provisorischen Tieftemperaturskala PLTS-2000 zwischen 0,65 K und 3,2 K gibt es erhebliche Diskrepanzen zwischen beiden Skalen, die auf die Extrapolation der ITS-90 mit Hilfe magnetischer Thermometer zurückzuführen waren. Durch vergleichende Messungen mit  $^3\text{He}$ -Dampfdruckthermometrie konnten die Ursachen aufgeklärt werden (Titelbild und Bild 6). Mit ihrer neuen Skala PTB-2006, die auf dem  $^3\text{He}$ -Dampfdruck- und dem  $^3\text{He}$ -Schmelzdruckthermometer basiert, hat die PTB die ersten Messungen vorgelegt, die es bei Bestätigung durch andere metrologische Staatseinstitute ermöglichen, die PLTS-2000 in konsistenter Weise in die Nachfolgeskala der ITS-90, die ITS-201X, zu integrieren.

### Ultratiefe Temperaturen

Bei noch tieferen Temperaturen im Millikelvinbereich gibt es bis heute kein einfach handhabbares Thermometer, das ohne Fremdkalibrierung auskommt, die teilweise sogar bei jedem Abkühlen erneuert werden muss. Zusammen mit der Universität Heidelberg sind erste erfolgreiche Schritte gelungen, die thermischen Fluktuationen der Elektronen in einem an der Messstelle befestigten Metallstück, deren Temperaturabhängigkeit durch die fundamentale Nyquist-Formel beschrieben wird, für die Temperaturmessung auszunutzen. Dabei wird nicht das übliche Spannungsrauschen an einem Widerstand elektrisch nachgewiesen, sondern das durch die Elektronenbewegungen verursachte fluktuierende Magnetfeld außerhalb des Metalls. Dazu sind höchstempfindliche Magnetfeld-Detektoren erforderlich, die mit der neuen Generation von in der Abteilung 7 entwickelten SQUIDs zur Verfügung stehen (Bild 7). Diese Sensoren sind so robust und störungsresistent, dass sie mit großem Erfolg bis in den unteren Millikelvinbereich einsetzbar sind. Damit ist ein ganz neuer, wesentlich einfacher und vielleicht auch als Primärthermometer verwendbarer Rauschthermometertyp zu erwarten, der jetzt mit industriellen Partnern zur Serienreife für die Anwender fortentwickelt werden muss.

Bild 6: Unterschiede zwischen den Temperaturskalen ITS-90 und PLTS-2000 im Überlappbereich  
 a) Differenz zwischen ITS-90 und PTB-2006  
 b) Residuen der Differenzfunktion.

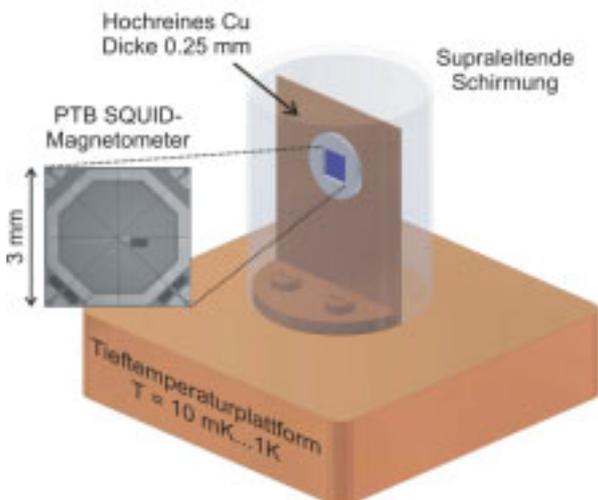
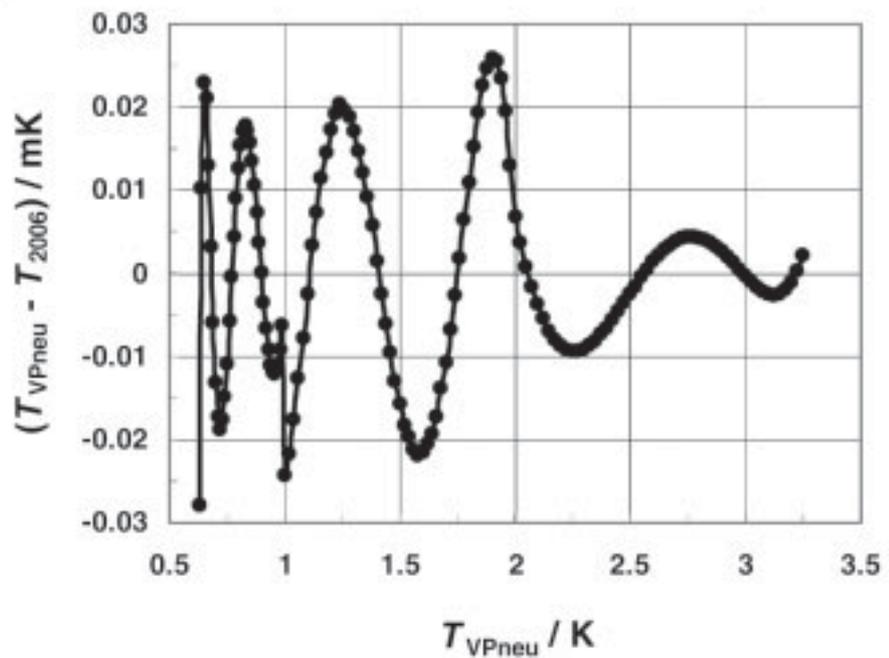
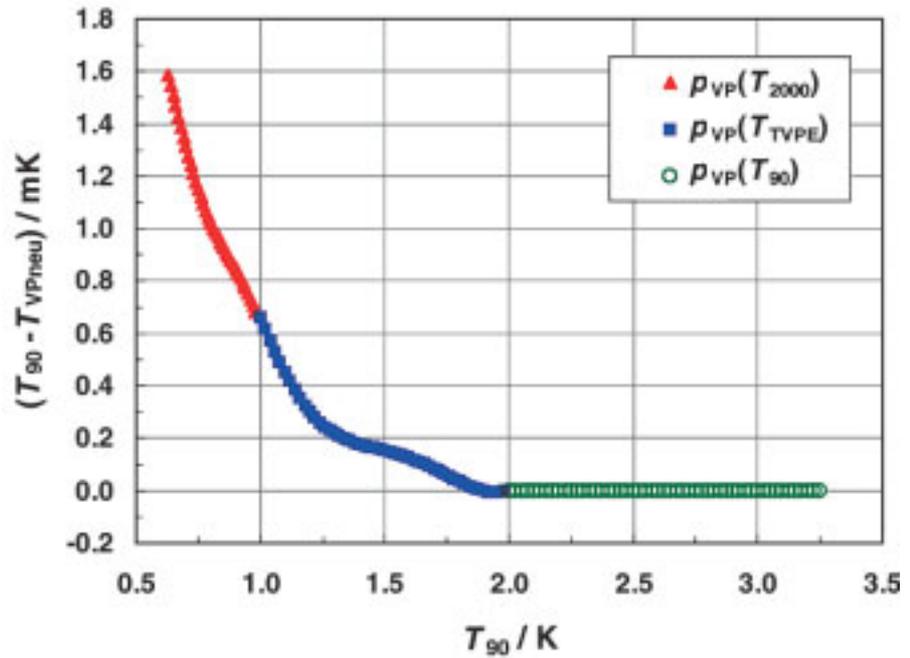


Bild 7: Neuartiges Fluktuationsrauschthermometer für Temperaturen unter 1 K mit einem robusten, millikelvintauglichen SQUID-Magnetometer

## Metrologie mit Synchrotronstrahlung

Die Mitarbeiter im Bereich der Anwendung der Synchrotronstrahlung sind in hohem Maße mit Konzeption und Aufbau der Strahlrohre an der Metrology Light Source im *Willy-Wien-Laboratorium* beschäftigt, nachdem mit der Fertigstellung des Gebäudes die notwendigen baulichen Voraussetzungen dafür geschaffen sind. Über ihre Fortschritte wird in den Folgejahren ausführlich zu berichten sein.

An den Strahlrohren der PTB am Speicherring BESSY II in Berlin-Adlershof muss parallel dazu die Forschung möglichst unbeeinträchtigt weitergehen. Neben der schon mehrfach beschriebenen At-Wavelength-Charakterisierung von optischen Komponenten für die EUV-Lithographie – zwei EUV- $\alpha$ -Demo-Tools wurden inzwischen installiert – liegt im Röntgenbereich ein Schwergewicht weiterhin auf dem Gebiet der Oberflächenanalytik, u. a. bei der Untersuchung des Ergebnisses der Reinigung von Halbleiter-Wafer-Oberflächen und ggf. von Rückständen aus diesen Reinigungsprozeduren. Die dafür verwendete Methode ist die referenzprobenfreie Röntgenfluoreszenzanalyse. Durch geeignete iterative Auswertung der Spektren konnten überlappende Linien besser quantifiziert und die Nachweisempfindlichkeit erheblich gesteigert werden. Ein neues hochauflösendes Spektrometer für weiche Röntgenstrahlung wurde in Betrieb genommen, das zur Bestimmung atomarer Fundamentalparameter genutzt wird, die zur absoluten Quantifizierung der Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse erforderlich sind.

Eine lange Tradition haben die Arbeiten zur Charakterisierung von Femtosekunden-Röntgenpulsen, die in Stanford und in Hamburg in Zusammenarbeit mit Kollegen von DESY durchgeführt werden (Bild 8). Hierbei wurde ein Verfahren entwickelt, das künftig die Grundlage für Monitordetektoren an Freie-Elektronen-Röntgen-Lasern wie dem LCLS in Stanford oder dem XFEL in Hamburg bilden wird.

## Metrologie für die Weltraumforschung

Traditionell nutzt die PTB ihre messtechnischen Möglichkeiten in der Radiometrie für die Unterstützung von astronomischen und Weltraummissionen auf höchstem metrologischem Niveau. Quantitative Untersuchungen der Sonnenaktivität haben u. a. große Relevanz für die Vorhersage der Klimaentwicklung auf unserem Planeten. Das ESA-Instrument SOL-ACES (Bild 9), das für solche Untersuchungen im Vakuum-UV-Spektralbereich auf der internationalen Raumstation ISS eingesetzt werden soll, wurde in Zusammenarbeit mit dem *Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik* in Freiburg an einem Strahlrohr von BESSY II charakterisiert. Drei weitere Instrumente zur Sonnenerforschung sind 2006 erfolgreich in den Weltraum befördert worden: Die VUV-Spektrometer EIS, MOSES und EUNIS wurden zuvor radiometrisch an das primäre Strahlernormal BESSY II angeschlossen (Bild 10). Und schließlich befindet sich ein an einen entsprechenden Hohlraumstrahler primär angeschlossenes IR-Spektrometer mit der Mission Venus-Express auf dem Wege zu seinem Zielplaneten.

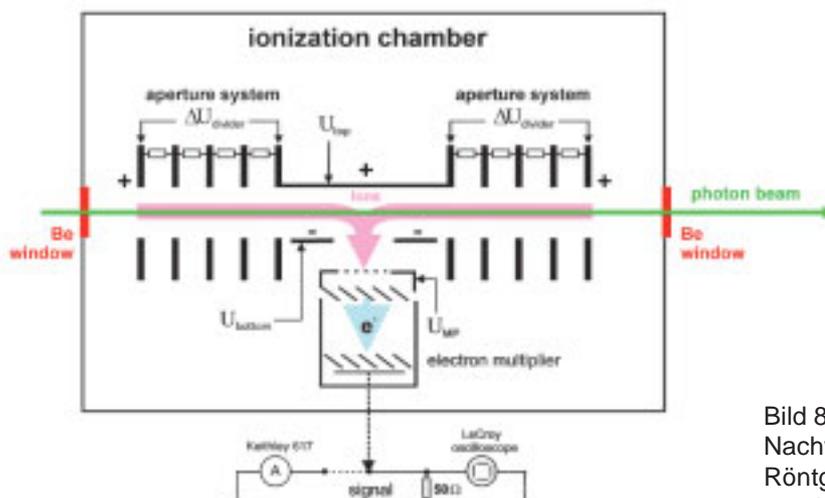


Bild 8: Ionisationskammer zum Nachweis von Femtosekunden-Röntgenpulsen aus Freie-Elektronen-Lasern



Bild 9: Solarspektrometer SOL-ACES für das europäische COLUMBUS-Modul der internationalen Raumstation ISS im geöffneten Tank des EUV-Reflektometers bei BESSY II

Bild 10: MOSES (gestartet am 8. Februar 2006) während der Kalibrierung am Rutherford Appleton Laboratory; im Hintergrund das PTB-Transferstrahlernormal.

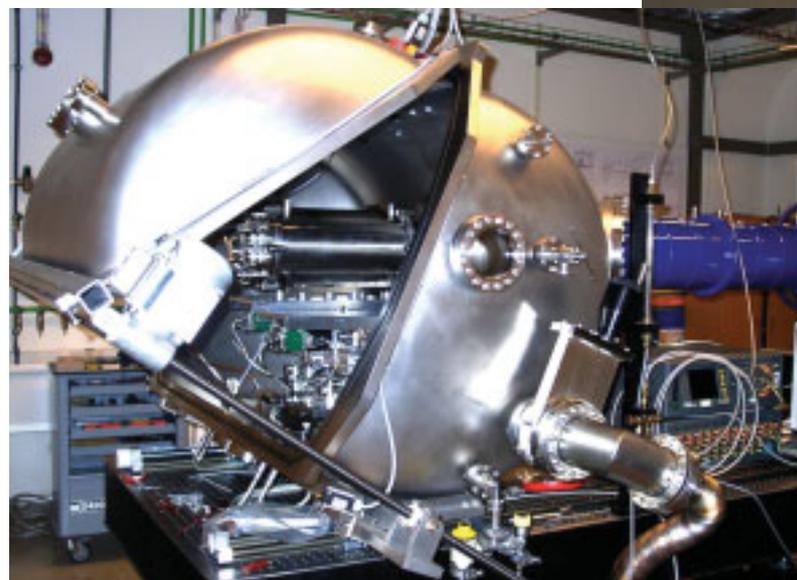
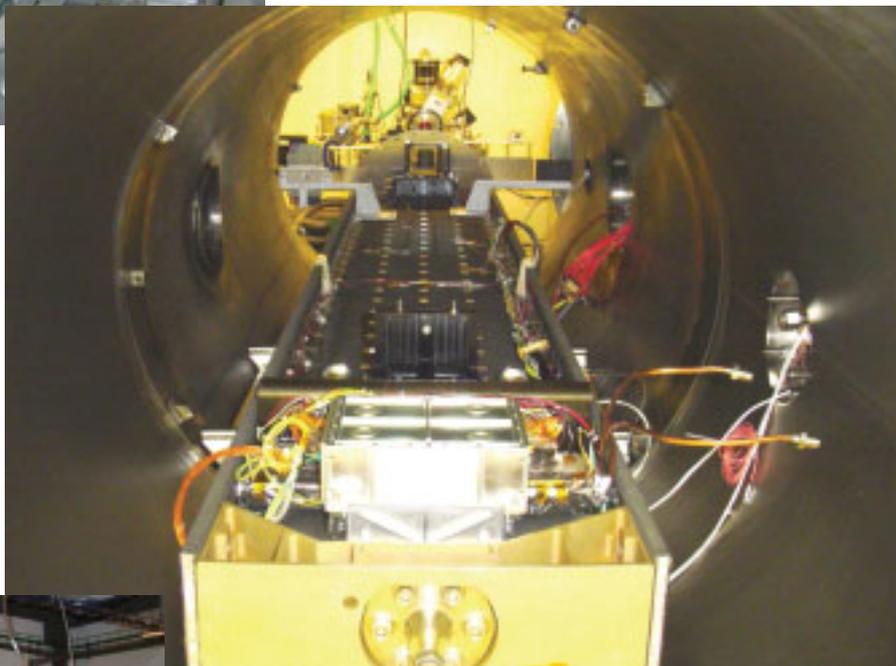


Bild 11: Vakuumtauglicher Kalibriermessplatz mit niedrigem Strahlungshintergrund

Der Aufbau eines Infrarot-Kalibriermessplatzes, an dem sich – einmalig in Europa – Strahlungsthermometer und IR-Detektoren unter Vakuum und bei reduziertem Strahlungshintergrund charakterisieren lassen, ist weit fortgeschritten (Bild 11). Hiermit werden künftig u. a. weltraumgestützte Instrumentierungen zur Bestimmung von aus dem Weltall einfallender IR-Strahlung oder zur Beobachtung der Erderwärmung mit hoher Präzision kalibriert.

### Vakuumphysik

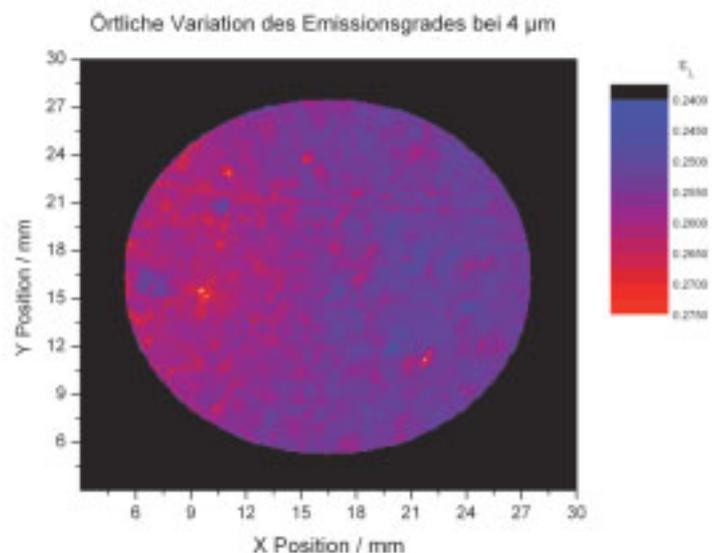
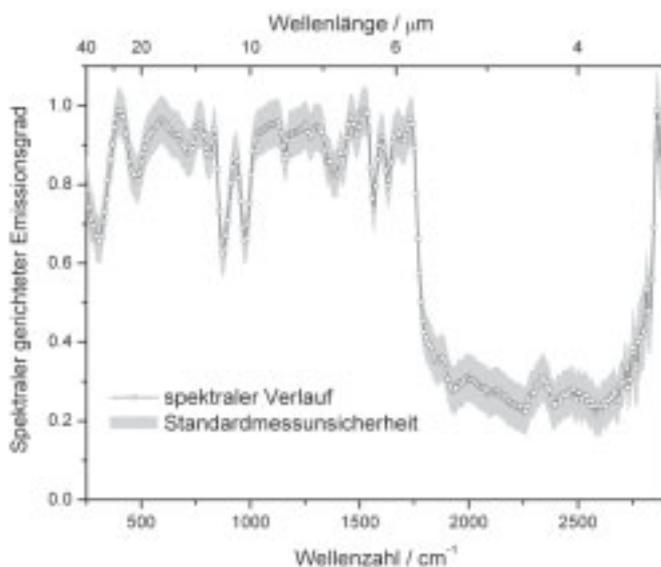
Obwohl die Arbeitsgruppe *Vakuumphysik* überwiegend mit Kalibrierungen und der Rückführung der Normale anderer Staatsinstitute auf die eigenen Primärnormale befasst ist, gibt es auch hier interessante Ergebnisse zu berichten. Durch Einsatz einer neuen, im Drucklaboratorium der PTB charakterisierten Druckwaage mit großem Querschnitt konnte die Unsicherheit der Druckmessung im Bereich zwischen 30 Pa und 1000 Pa um rund eine Größenordnung verbessert und damit eine führende Stellung in Europa erreicht werden.

Für die Anwender von Wärmeleitungs-vakuummetern wird es aufgrund der Auswertung einer umfangreichen Untersuchung der Eigenschaften verschiedener Typen solcher Messgeräte möglich, deren Messfehler fundiert abzuschätzen und ein belastbares Messunsicherheitsbudget aufzustellen.

### Materialeigenschaften

Der spektrale Emissionsgrad von Oberflächen ist eine wichtige thermophysikalische Materialeigenschaft. Seine genaue Kenntnis ist u. a. Voraussetzung für rückführbare Temperaturmessungen mit Strahlungsthermometern und Thermographiekameras. Solche Messungen haben eine große Bedeutung für weltraumgestützte Klimabeobachtungen und die berührungslose Verfolgung des Temperaturverlaufs industrieller Prozesse (Bild 12). Daher wurde eine entsprechende Apparatur aufgebaut, die bisher Messungen im Wellenlängenbereich zwischen 4 mm und 40 mm bei Oberflächentemperaturen von 80 °C bis 250 °C ermöglicht. Die positiven Ergebnisse der ersten Kalibrierungen und der daraufhin inzwischen nachgefragte Bedarf legen eine Ausweitung der Messkapazitäten und eine Erweiterung des Temperaturbereichs nahe.

Bild 12: Spektraler, gerichteter Emissionsgrad einer Autolack-Probe



## 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

#### Femtosekunden-Röntgenpulse in Stanford charakterisiert

In Zusammenarbeit mit DESY (Hamburg) wurden an der *Sub-Picosecond Pulse Source* (SPPS) in Stanford ein Detektionssystem zum quantitativen Online-Nachweis von Femtosekunden-Röntgenpulsen erfolgreich getestet und dabei etwa 1 Million Photonen pro Puls bei einer Photonenenergie von 9,4 keV nachgewiesen. Das Gerät, das auf der Photoionisation von Gasen basiert, ist die Vorstufe transparenter Monitordetektoren für zukünftige Röntgen-Freie-Elektronen-Laser in Stanford (LCLS) und Hamburg (XFEL). (A. A. Sorokin, M. Richter, FB 7.1, [mathias.richter@ptb.de](mailto:mathias.richter@ptb.de))

#### Multi-Photon-Anregung im VUV und EUV

Am neuen Freie-Elektronen-Laser FLASH in Hamburg wurden in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern von DESY, der *Universität Hamburg* und des *Ioffe-Instituts* in St. Petersburg erstmals direkte Multi-Photon-Prozesse im Spektralbereich von VUV- und EUV-Strahlung beobachtet und quantitativ untersucht. Die Ergebnisse zeigen sowohl Analogien als auch klare Unterschiede zur Anregung mit optischen Ultrakurzzeit-Lasern. (A. A. Sorokin, M. Richter, FB 7.1, [mathias.richter@ptb.de](mailto:mathias.richter@ptb.de))

#### Hochauflösende Spektrometrie im Spektralbereich weicher Röntgenstrahlung

Am Plangittermonochromator-Strahlrohr für Undulatorstrahlung der PTB bei BESSY II wurde eine aus sphärischem Gitter und CCD-Kamera bestehende Spektrometereinheit in Betrieb genommen. Sie dient zur Bestimmung atomarer Fundamentalparameter, die für die Quantifizierung der Röntgenfluoreszenzanalyse relevant sind. (B. Beckhoff, FB 7.1, [burkhard.beckhoff@ptb.de](mailto:burkhard.beckhoff@ptb.de))

#### ISS-Instrument bei BESSY charakterisiert

In Zusammenarbeit mit dem *Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik* in Freiburg ist das ESA-Instrument SolACES im PTB-Labor bei BESSY erfolgreich charakterisiert worden. SolACES besteht aus vier Spektrometern und zwei Doppelionisations-

kammern und soll auf der internationalen Raumstation ISS für quantitative Untersuchungen der Sonnenstrahlung im Vakuum-UV-Spektralbereich eingesetzt werden, die eine wichtige Energiequelle für die Vorgänge insbesondere in der hohen Erdatmosphäre darstellt. (Ch. Laubis, A. Gottwald, M. Richter, FB 7.1, [mathias.richter@ptb.de](mailto:mathias.richter@ptb.de))

#### PTB-kalibrierte Instrumente erfolgreich im All

Mit den VUV-Spektrometern EIS der Solar-B-Mission sowie MOSES und EUNIS auf Höhenforschungsraketen sind im Jahr 2006 gleich drei Instrumente der Sonnenforschung erfolgreich ins All gestartet, die zuvor von der PTB in Kooperation mit dem *Rutherford Appleton Laboratory* radiometrisch an das primäre Strahlernormal BESSY angeschlossen worden waren. (W. Paustian, M. Richter, FB 7.1, [mathias.richter@ptb.de](mailto:mathias.richter@ptb.de))

#### Wellenlängenschieber als primäres Strahlernormal

Durch eine veränderte Elektronentrajektorie und den Betrieb des BAM-Wellenlängenschiebers im Elektronenspeicherring BESSY II bei 6 T statt der üblichen 7 T konnte eine horizontal homogene Intensitätsverteilung der emittierten Röntgenstrahlung erreicht werden. Damit ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Nutzung des Wellenlängenschiebers als primäres Strahlernormal getan. (R. Klein, FB 7.1, [roman.klein@ptb.de](mailto:roman.klein@ptb.de))

#### Kalibrierung von IR-Strahlungsempfängern

An der neuen Messapparatur, die Strahlungsleistungen mit einem Kryoradiometer als Primärnormal bestimmt (PTB-Jahresbericht 2005), können IR-Strahlungsempfänger mit Hilfe abstimmbarer Diodenlaser jetzt in den Wellenlängenbereichen von 1260 nm bis 1344 nm und 1460 nm bis 1580 nm mit relativen Standardunsicherheiten von weniger als 0,05 % kalibriert werden. Diese Wellenlängenbereiche werden vor allem in der optischen Nachrichtentechnik, aber auch bei der „absolut“-radiometrischen Messung vergleichsweise niedriger Strahlungstemperaturen genutzt. (P. Meindl, FB 7.2, [peter.meindl@ptb.de](mailto:peter.meindl@ptb.de))

### Verbesserte Darstellung der Druckskala im Grob- und Feinvakuum

Mit Hilfe einer neuen Druckwaage konnte die Unsicherheit der Druckdarstellung zwischen 30 Pa und 1000 Pa um teilweise mehr als eine Größenordnung verbessert werden. Die Bestimmung des effektiven Querschnitts erfolgte am Quecksilbermanometer der PTB in der Arbeitsgruppe 3.23. Ein unterstützender Vergleich mit dem tschechischen Staatsinstitut zur Veranlassung des Eintrags in die BIPM-Datenbank wurde erfolgreich durchgeführt. (Th. Bock, FB 7.3, thomas.bock@ptb.de, K. Jousten, FB 7.3, karl.jousten@ptb.de)

### Erste Untersuchungen zum Kernmagnetismus des Platinisotops $^{195}\text{Pt}$

Der Wechselwirkung zwischen elektronischen und kernmagnetischen Zuständen kommt bei der Suche nach neuen Speichermaterialien ein hohes Innovationspotenzial zu. Daher wurden am Modellsystem  $^{195}\text{Pt}$  umfangreiche Untersuchungen der elektronischen und kernmagnetischen Eigenschaften der Wechselfeldsuszeptibilität, der Wärmekapazität und der Kernspinresonanz bei Gleichgewichtstemperaturen bis unterhalb 500  $\mu\text{K}$  und in Magnetfeldern bis zu 12 T durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse sind konsistent mit theoretischen Berechnungen, nach denen bei einer Temperatur von 1  $\mu\text{K}$  kernmagnetische Ordnung auftreten sollte. Der experimentelle Nachweis dieses Phasenübergangs bei einer bisher noch nie erreichten Gleichgewichtstemperatur ist Gegenstand der gegenwärtigen Untersuchungen an der Mikrokelvinanlage MKA 3. (P. Strehlow, FB 7.5, peter.strehlow@ptb.de)

### Verbesserte Definition der Temperatur des Wassertripelpunktes

Die Einheit der Temperatur, das Kelvin, ist über die Temperatur des Wassertripelpunktes mit  $T_{\text{TPW}} = 273,16 \text{ K}$  definiert. Die als Normale verwendeten Wassertripelpunktzellen der Staatsinstitute wiesen aufgrund unterschiedlicher Isotopenzusammensetzung beim jüngsten Schlüsselvergleich allerdings Temperaturunterschiede von bis zu 0,1 mK auf. Auf Empfehlung des CCT hat das CIPM deshalb die zu verwendende Isotopenzusammensetzung festgelegt. Damit wird zukünftig die Unsicherheit der Realisierung von  $T_{\text{TPW}}$  halbiert. (E. Tegeler, FB 7.4, erich.tegeler@ptb.de)

### Neue Tieftemperaturskala PTB-2006

Aktuell existieren im Tieftemperaturbereich unterhalb von 1 K zwei überlappende, aber unterschiedliche Internationale Temperaturskalen: die ITS-90 und die PLTS-2000, wobei die ITS-90 deutliche Abweichungen von der thermodynamischen Temperaturskala aufweist. Basierend auf hochpräzisen  $^3\text{He}$ -Dampf- und Schmelzdruckmessungen sowie Rechnungen zur thermodynamischen Dampfdruckgleichung wurde eine neue  $^3\text{He}$ -Dampfdruckskala, die PTB-2006, für den Temperaturbereich von 0,65 K bis 3,2 K aufgestellt. Die PTB-2006 ist in Übereinstimmung mit der PLTS-2000 und behebt die thermodynamische Inkonsistenz des definierenden  $^3\text{He}$ -Dampfdruckpolynoms am unteren Ende der ITS-90. (J. Engert, FB 7.4, jost.engert@ptb.de)

### Metrologie für die Wirtschaft

#### Metrologie für die EUV-Lithographie

Reflektometrie mit Synchrotronstrahlung im Bereich des extremen UV (EUV) für die Entwicklung der EUV-Lithographie wurde auch im letzten Jahr bei BESSY II in enger Zusammenarbeit mit der Industrie in großem Umfang durchgeführt. Nach der erfolgreichen Installation von zwei EUV- $\alpha$ -Demo-Tools hat die PTB die Aufgabe, die Entwicklung verbesserter Schichtsysteme für die Optiken der nächsten Gerätegeneration messtechnisch zu unterstützen, Untersuchungen zur Lebensdauer der Optiken durchzuführen und EUV-Testmasken „at wavelength“ zu charakterisieren. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

#### Metrologie für EUV-Masken

Im Rahmen des BMBF-Projektes ABBILD wurde gemeinsam mit dem AMTC Dresden und dem Zuse-Institut Berlin sowie den PTB-Fachbereichen 4.2 und 8.4 die EUV-Scatterometrie als Methode zur Bestimmung von Linienbreiten auf EUV-Masken evaluiert. Erste Ergebnisse der erfolgreichen Rekonstruktion geometrischer Parameter aus scatterometrischen Messungen wurden gemeinsam auf Konferenzen präsentiert. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

### Weiterentwicklung der referenzprobenfreien Röntgenfluoreszenzanalyse

Die referenzprobenfreie quantitative Röntgenfluoreszenzanalyse wurde dadurch erweitert, dass iterativ Ergebnisse der Quantifizierung in die Auswertung des gemessenen Spektrums einfließen. Die Nutzung absorptionskorrigierter Fluoreszenzlinienserien zur Spektrenevaluation führt zu deutlich verbesserter Nachweisempfindlichkeit und Quantifizierung für Elemente, deren Linien teilweise überlappen. (B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

### Polarisationsempfindliche Charakterisierung optischer Vakuum-UV-Komponenten

In einer Forschungsk Kooperation mit dem *Institute d'Optique* in Orsay wurden im PTB-Labor bei BESSY neue Messverfahren zur polarisationsempfindlichen Charakterisierung optischer Komponenten entwickelt. Erste erfolgreiche Untersuchungen wurden an einer Reihe speziell beschichteter Spiegel bei der Lyman-alpha-Wellenlänge 121,6 nm durchgeführt. (R. Thornagel, A. Gottwald, M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

### Bestimmung des spektralen Emissionsgrads

Der spektrale Emissionsgrad von Oberflächen ist eine wichtige thermophysikalische Materialeigenschaft, deren genaue Kenntnis wesentliche Voraussetzung für die berührungslose Temperaturmessung mit Strahlungsthermometern und Thermografiekameras bis hin zur Simulation des Temperaturverhaltens von Weltraumexperimenten ist. Seit Sommer diesen Jahres kann der gerichtete spektrale Emissionsgrad im Spektralbereich von 4 µm bis 40 µm für Oberflächentemperaturen von 80 °C bis 250 °C durch Vergleich mit einem Hohlraumstrahler sehr hohen Emissionsgrads bestimmt werden. Erste Kundenkalibrierungen erfolgten an einem Tiegelmaterial aus einer Verbrennungskammer und an Autolacken zur Optimierung des Lacktrocknungsprozesses. (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de, J. Hollandt, FB 7.3, joerg.hollandt@ptb.de)

### Strahlungsthermometrie unter Vakuum

Die berührungslose Infrarot-(IR-)Temperaturmessung unter Vakuum erlangt zunehmende Bedeutung für weltraumgestützte Klimabeobachtungen und industrielle Prozesssteuerung und -überwachung. Ein neuer Vakuum-IR-

Kalibriermessplatz erlaubt die Charakterisierung von IR-Strahlern und -Empfängersystemen mit Schwarzkörperstrahlung über einen Temperaturbereich von -173 °C bis 170 °C bei reduziertem Wärmestrahlungshintergrund (LN<sub>2</sub>-Schirmung). Damit besteht nun die Möglichkeit, unter Vakuum industrielle Strahlungsthermometer und weltraumgestützte IR-Instrumentierungen auf die Internationale Temperaturskala (ITS-90) rückzuführen. (B. Gutschwager, FB 7.3, berndt.gutschwager@ptb.de, J. Hollandt, FB 7.3, joerg.hollandt@ptb.de)

### Rahmenvereinbarung mit der OSRAM GmbH zur Hochtemperaturmessung

Entscheidend für Lebensdauer und Lichtausbeute von Entladungslampen ist die wahre Temperatur der Wolframkathoden, die stark von der Oberflächenstruktur abhängt und weit über 2000 °C liegen kann. Zu ihrer berührungslosen Messung mit Strahlungsthermometrie ist die Kenntnis des Emissionsgrads notwendig, dessen Bestimmung bei so hohen Temperaturen großen messtechnischen Aufwand erfordert. Zur Lösung dieser Aufgabe haben die OSRAM GmbH und die PTB eine Rahmenvereinbarung abgeschlossen. In einem ersten Teilprojekt wird die PTB den spektralen Emissionsgrad von Wolfram bei Temperaturen von 1000 °C bis 2800 °C an Prüfkörpern bestimmen, die von der OSRAM GmbH speziell gefertigt werden. (K. Anhalt, FB 7.3, klaus.anhalt@ptb.de, J. Hartmann, FB 7.3, dr.j.hartmann@ptb.de)

### Entwicklung von Hochtemperatur-Fixpunkten für Berührungsthermometer

Ziel einer Zusammenarbeit der metrologischen Staatsinstitute LNE (Frankreich), NPL (Großbritannien) und der PTB im Rahmen eines EUROMET-Projektes ist die Entwicklung robuster Hochtemperatur-Fixpunkte auf der Basis von eutektischen Metall-Kohlenstoff-Verbindungen zur Kalibrierung von Berührungsthermometern im Temperaturbereich oberhalb von 1100 °C. Um die spezifischen Erfahrungen der einzelnen Partner optimal zu nutzen, wurde ein auf 12 Monate angelegtes iMERA-Quick-Start-Projekt durchgeführt. Die PTB war aufgrund ihrer herausragenden Erfahrung auf dem Gebiet der Thermoelementthermometrie federführend zuständig für die Konstruktion und Untersuchung von Pt/Pd-Thermoelementen. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

### Untersuchung von Wärmeleitungs-vakuummern für den DKD

Für die Arbeitsgruppe Vakuummessgeräte des DKD-Fachausschusses *Druck und Vakuum* wurde eine umfangreiche Untersuchung der wesentlichen metrologischen Eigenschaften verschiedener Typen von Wärmeleitungs-vakuummern durchgeführt (Wiederholbarkeit, Langzeitstabilität, Gasartabhängigkeit, Temperaturverhalten, Verhalten bei schnellen Druckänderungen). Grund waren die bei Überwachungsbesuchen oft festgestellten unzureichenden Messunsicherheitsbudgets (MUB) dieser Messgeräte. Mit der Untersuchung ist es nun möglich, ein belastbares MUB aufzustellen. (K. Jousten, FB 7.3, karl.jousten@ptb.de)

### Extrem hohe Bandbreite mit gekühlter SQUID-Elektronik

Die Bandbreite von SQUID-Sensorsystemen, die mit einer bei Raumtemperatur betriebenen Elektronik arbeiten, ist in geschlossener Flussregelschleife durch die Signallaufzeiten auf den Verbindungsleitungen zwischen dem gekühlten Sensorchip und der Elektronik-einheit begrenzt. Mit der derzeit schnellsten kommerziellen SQUID-Elektronik XXF-1, die von der PTB gemeinsam mit der Firma *Magnicon* entwickelt wurde, wird eine Bandbreite von 20 MHz erreicht. In diesem Jahr wurde eine SQUID-Elektronik aufgebaut, die in unmittelbarer Nähe des SQUIDs in flüssigem Helium betrieben werden kann. Mit dieser konnte in Verbindung mit einem PTB-Stromsensor eine Bandbreite von 350 MHz erfolgreich demonstriert werden. (Th. Schurig, FB 7.5, thomas.schurig@ptb.de)

### Neuartige magnetische Fluktuations-Rauschthermometer

In Kooperation mit der *Universität Heidelberg* entwickeln die Fachbereiche 7.4 und 7.5 neuartige Rauschthermometer für den Tieftemperaturbereich. Bei diesen SQUID-basierten Rauschthermometern werden die Fluktuationen des magnetischen Feldes gemessen, die von thermisch bedingten Rauschströmen in einem metallischen Leiter verursacht werden. Das verwendete SQUID-Design kombiniert hohe Empfindlichkeit mit Robustheit gegenüber externen Störungen. Die physikalischen Grundlagen der Thermometer werden einge-

hend mit dem Ziel untersucht, die Geräte für den praktischen Einsatz bei externen Anwendern tauglich zu machen. (Th. Schurig, FB 7.5, thomas.schurig@ptb.de)

### Neufassung der Norm DIN EN IEC 60751 für industrielle Platinwiderstandsthermometer

Die Arbeitsgruppe „Temperature Sensors“ der *International Electrotechnical Commission IEC* hat unter Vorsitz der PTB eine Neufassung der grundlegenden Norm IEC 60751 zu industriellen Widerstandsthermometern erarbeitet. Hierbei wurden neue Genauigkeitsklassen und teilweise neue Prüfverfahren eingeführt, bei denen erstmals auch die Unsicherheit der Prüfung berücksichtigt wird. Durch die Neufassung wird die Wettbewerbsfähigkeit der Hersteller hochwertiger Thermometer und Sensoren gestärkt. (E. Tegeler, FB 7.4, erich.tegeler@ptb.de)

### Fachtagung TEMPERATUR 2006

Am 16. und 17. Mai 2006 wurde die Tagung TEMPERATUR 2006 im Hermann-von-Helmholtz-Bau der PTB Berlin durch die Fachbereiche 7.3 und 7.4 ausgerichtet. Die TEMPERATUR hat sich im deutschsprachigen Raum als die nationale Tagung zu Verfahren und Geräten der Temperatur- und Gasfeuchtemessung etabliert; sie wurde nach 1998 und 2003 zum dritten Mal in Folge durch die PTB in Berlin organisiert. Die große Zahl von 160 Teilnehmern aus fünf Ländern zeigt die Aktualität der Fragestellungen und das anhaltend große Interesse aus Industrie und Forschung. Unterstrichen wurde dies durch den hohen Anteil von Teilnehmern aus der Industrie (über 50 %), insbesondere von kleinen und mittelständischen Unternehmen, aber auch aus DKD-Kalibrierlaboratorien, bei denen die Tagung große Bedeutung für die fachliche Fortbildung hat. (J. Hollandt, FB 7.3, joerg.hollandt@ptb.de, S. Rudtsch, 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

### Internationale Angelegenheiten

#### Workshop zu Fortschritten bei der Bestimmung der Boltzmann-Konstante

Zur Neudefinition der SI-Basiseinheit Kelvin wird derzeit die Boltzmann-Konstante in einem internationalen Forschungsverbund neu bestimmt. Die Partner aus dem US-amerikanischen Staatsinstitut NIST, dem französischen LNE-INM/CNAM, dem italienischen INRiM, der PTB und den Universitäten Paris Nord, Neapel und Mailand sowie mehr als 20 weitere Experten trafen sich im Oktober 2006 zu einem Erfahrungsaustausch im Rahmen eines PTB-Seminars. Der bisher erzielte Fortschritt lässt erwarten, dass bis zur Neufestlegung des Zahlenwerts durch die CODATA-Kommission zum Jahresende 2010 genügend neue Ergebnisse vorliegen werden, um die Neudefinition des Kelvin in Angriff nehmen zu können. (B. Fellmuth, FB 7.4, bernd.fellmuth@ptb.de)

#### Task Group des CCT empfiehlt Neudefinition des Kelvin

Die internationale Arbeitsgruppe der Meterkonvention zur Neudefinition des Kelvin traf sich in der PTB Berlin, um die Alternativen und Auswirkungen der geplanten Änderung zu diskutieren. Bei sehr tiefen und sehr hohen Temperaturen werden längerfristig einfachere Temperaturmessungen erwartet, während im industriell wichtigen mittleren Temperaturbereich keine kosten- bzw. zeitintensiven Änderungen der gegenwärtigen Kalibrierpraxis auftreten werden. Die Empfehlung T-3 (2005) „Creation of a *mise en pratique* for the definition of the kelvin“ des Beratenden Komitees für Thermometrie (CCT) eröffnet die Möglichkeit, zukünftig andere Darstellungen der Temperaturskala neben der ITS-90 zu benutzen, beispielsweise die direkte radiometrische Messung hoher thermodynamischer Temperaturen. Der lang gehegte Traum der Thermometriker, das Zusammenwachsen von thermodynamischen und internationalen Temperaturen, würde dadurch in Erfüllung gehen. Die Task Group wird ihre positive Empfehlung zur Neudefinition des Kelvin im März 2007 dem CCT zur Annahme vorlegen. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

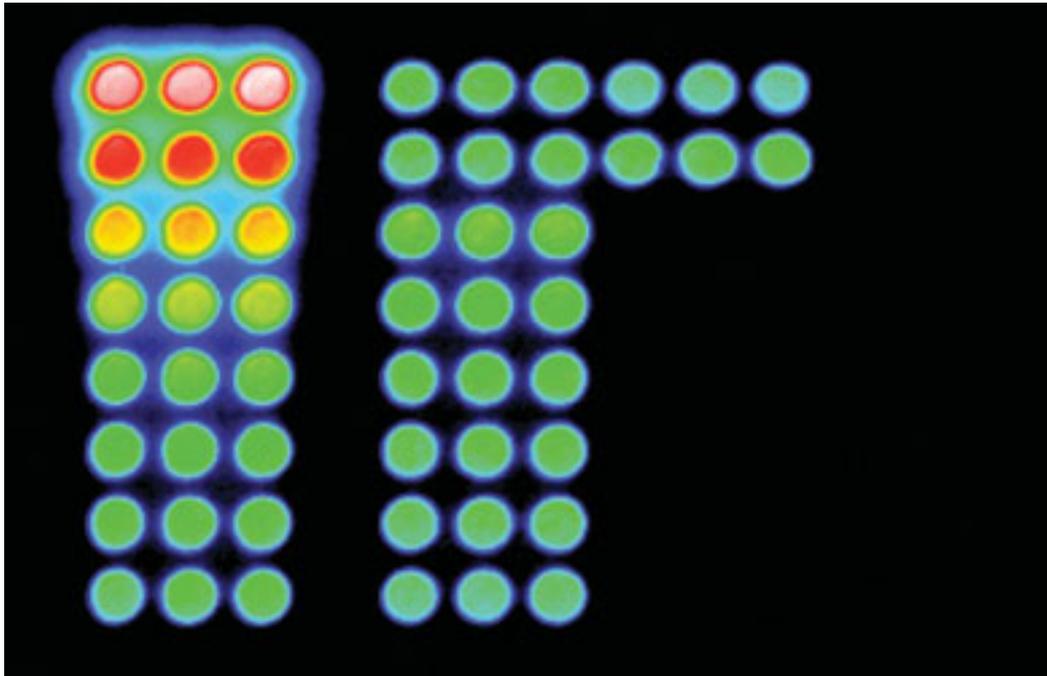
#### Pilotvergleich für spektrale Empfindlichkeit im EUV

Gemeinsam mit dem NIST (USA) und dem NMIJ (Japan) wurde im Rahmen des CCPR ein Pilotvergleich der spektralen Empfindlichkeit von Halbleiterphotodioden im Spektralbereich von 11,5 nm bis 20 nm (im extremen UV, EUV) begonnen. Die PTB fungiert als Pilotlabor. Der Vergleich soll im Laufe des Jahres 2007 abgeschlossen werden. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

#### VAMAS-Projekt zur Schichtdickenbestimmung

Gemeinsam mit den japanischen Staatsinstituten NMIJ und NIMS und weiteren 17 Institutionen und Geräteherstellern nimmt die PTB an einem VAMAS-Projekt im Bereich der Röntgenreflektometrie teil. Die Organisation VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials & Standards) koordiniert auf vielen Gebieten die Forschung mit dem Ziel der Normung. Hier geht es um die Schichtdickenbestimmung an Schichtsystemen im Dickenbereich unter 10 nm. Die PTB setzt hierzu in ihrem Laboratorium bei BESSY II monochromatisierte Synchrotronstrahlung ein. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

# Medizinphysik und metrologische Informationstechnik



Berichte der Abteilungen

# Medizinphysik metrologisch Information

## Einleitung

Im Allgemeinen herrscht das Bild vor, die Metrologie stünde für die Darstellung der physikalischen Einheiten mit höchster Präzision. Die umfassendere Aufgabe der Metrologie ist es jedoch, die Vergleichbarkeit von Messungen sicherzustellen.

Die Andersartigkeit dieser Sichtweise wird besonders bei den neueren Disziplinen der „Metrologie für die Medizin“ und bei informationstechnischen Aspekten metrologischer Systeme deutlich und soll im Folgenden an einigen Beispielen aus den Arbeiten der Abteilung erläutert werden.

## Bestimmung der QT-Zeit im EKG

Ein sofort einleuchtendes Beispiel ist die Messung des Elektrokardiogramms (EKG). Die Präzision der physikalischen Größen an Ordinate und Abszisse des EKG-Signals spielt nur eine untergeordnete Rolle bei der Auswertung des EKG für diagnostische Zwecke. Hier nützt es wenig, die Zeit an sich oder die elektrische Spannung hochgenau bestimmen zu können. Die eigentliche Herausforderung besteht darin, die Zeitdauer von Beginn des QRS-Komplexes bis zum Ende der T-Welle, d. h. die „QT-Zeit“ in international vergleichbarer Weise zu ermitteln.

Ein aktuelles Beispiel, wie prekär die Situation ist, stellt die Forderung der europäischen und US-Zulassungsbehörden dar, nach der für alle neu entwickelten Medikamente in gründlichen QT-Studien das Risiko der Herzunverträglichkeit ermittelt werden muss. Nach Einnahme der Substanzen darf sich die QT-Zeit nicht um mehr als 8 ms verlängern. Von diesem Messwert hängt also das Schicksal der Zulassung oder Nichtzulassung der Medikamente ab, mit gravierenden ökonomischen Folgen für die Entwickler.

In einer Studie, die die PTB in Zusammenarbeit mit dem *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) auf der Basis des EKG-Referenzdatensatzes der PTB (Abb. 1a) durchgeführt hat, ergeben sich für QT-Auswertungen typische Standardabweichungen vom „Goldstandard“ von 10 ms – 20 ms für manuelle Auswertungen und 20 ms – 30 ms für Auswertungen mit automatischen Verfahren. Abb. 1b und 1c zeigen Beispiele der Ergebnisse (nähere Beschreibung unter: <http://physionet.org/challenge/2006>).

## Augeninnendruckmessung

In der Ophthalmologie werden zur Bestimmung des Augeninnendrucks Messmethoden eingesetzt, die auf sehr unterschiedlichen Prinzipien beruhen: Applanationstonometer, bei denen eine Kraftmessung an einem Druckkörper erfolgt, der die Hornhaut definiert applaniert, oder Luftimpulstonometer, bei denen ein auf die Hornhaut gerichteter Luftimpuls eine Abplattung hervorruft, die optisch registriert wird. Obgleich beide Me-

## Titelbild

Fluoreszenzintensität in Falschfarbendarstellung einer teilweise befüllten 96-well ELISA-Plate (ELISA = Enzyme-Linked Immunosorbent Assay).

# Physik und Messtechnik

thoden nominell dieselbe physikalische Größe bestimmen, kann es in der Praxis zu erheblichen Abweichungen kommen (Abb. 2a). Dies ist exemplarisch für viele Messungen in der Medizin, die außer von der physiologisch/pathophysiologischen Variabilität des „Messobjektes“ Mensch und der Variabilität der Gerätebedienung und Messwertinterpretation des Gerätebetreibers auch von prinzipbedingten Fehlern der unvollkommenen Messverfahren beeinflusst werden. Eine der Ursachen für systematische Messwertabweichungen bei der Bestimmung des Augeninnendrucks liegt darin, dass ethische Gründe die direkte (invasive) Messung verbieten. Im obigen Beispiel erfolgt die Anzeige in mmHg (im Bereich der Medizin immer noch eine gesetzlich zulässige Einheit) bezogen auf das Goldmann-Tonometer als Goldstandard.

Wie kann unter diesen Umständen die Einheitlichkeit des Messwesens gewährleistet werden? Ein Schritt wäre die wissenschaftliche Analyse der systematischen Abweichungen der Verfahren. Ein anderer, pragmatischer Weg hat sich jedoch seit vielen Jahren bewährt: In messtechnischen Kontrollen gemäß Medizinprodukte-Betreiberverordnung werden Serienprodukte mit klinisch getesteten Einzelgeräten über Prüfhilfsmittel verglichen, die die PTB bereitstellt. So wurde schon 1984 ein mechanisches TransfERNormal für Luftimpulstonometer entwickelt, das seitdem von vielen Eichämtern und privaten Prüfstellen eingesetzt wird. Organisiert von der *Deutschen Akademie für Metrologie* und der PTB haben jetzt 13 Anwender diese Prüfeinrichtungen in 39 Vergleichsmessungen einem

freiwilligen Qualitätstest unterzogen. Als Ergebnis zeigte sich, dass auch nach über 20 Jahren diese TransfERNormale gut für die messtechnische Kontrolle geeignet sind, wenn sie regelmäßig durch die PTB rekali-briert und gewartet werden.

## Ringversuche zum Kleinen Blutbild

Ein klassischer Weg zur Sicherung der Vergleichbarkeit von Messungen sind Ringversuche mit Anschluss an Referenzmethoden. Auch hier ein Beispiel: In Umsetzung der EU-Direktive über In-vitro-Diagnostika werden in der Richtlinie der Bundesärztekammer (RiLiBÄK) zur Qualitätssicherung laboratoriumsmedizinischer Untersuchungen Mindestanforderungen an die Messgenauigkeit quantitativer laboratoriumsmedizinischer Analysen festgelegt. Insbesondere im Rahmen der externen Qualitätssicherung sind dabei das Referenzmethodenkonzept und eine Rückführung auf Normale höherer Ordnung gefordert, wo immer dies technisch möglich ist. Praktisch müssen die Routinelaboratorien hierzu regelmäßig an Ringversuchen teilnehmen und ihre Messergebnisse mit Zielwerten, die mit einer rückgeführten Referenzmethode ermittelt wurden, vergleichen.

In der PTB wurde bereits 1969 mit ersten Untersuchungen zur Entwicklung von Referenzmethoden für die Hämatologie begonnen. Ab 1985 wurden von medizinischen Standesorganisationen auf freiwilliger Basis Ringvergleiche zum Kleinen Blutbild durchgeführt, an denen zunächst etwa 100 klinische Laboratorien teilnahmen. Durch diese Ringversuche konnte innerhalb von etwa 5 Jahren

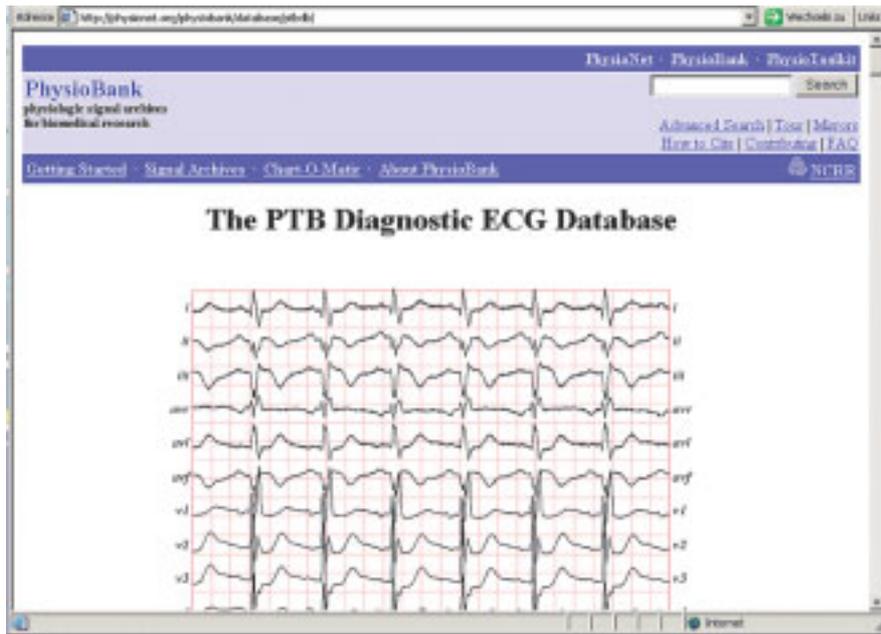


Bild 1a: Der EKG-Referenzdatensatz der PTB steht unter: <http://physionet.org/physiobank/database/ptbdb/> zur Verfügung.

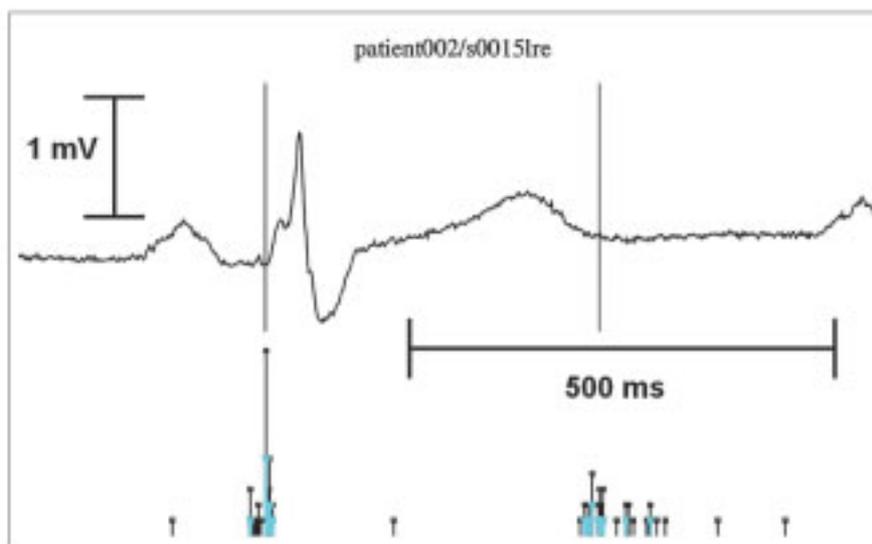


Bild 1b: EKG-Signal mit den manuell (blau) und automatisch (schwarz) bestimmten Zeitpunkten des Q-Zacken-Beginns und T-Wellen-Endes. Die Cursorbalken stellen die Medianwerte der manuellen Bestimmung dar, die im Weiteren als Goldstandard gewertet werden.

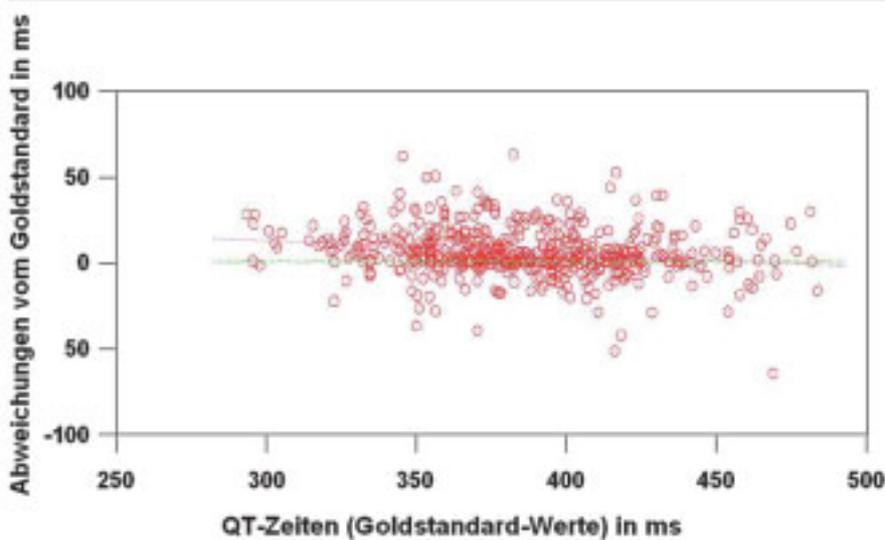
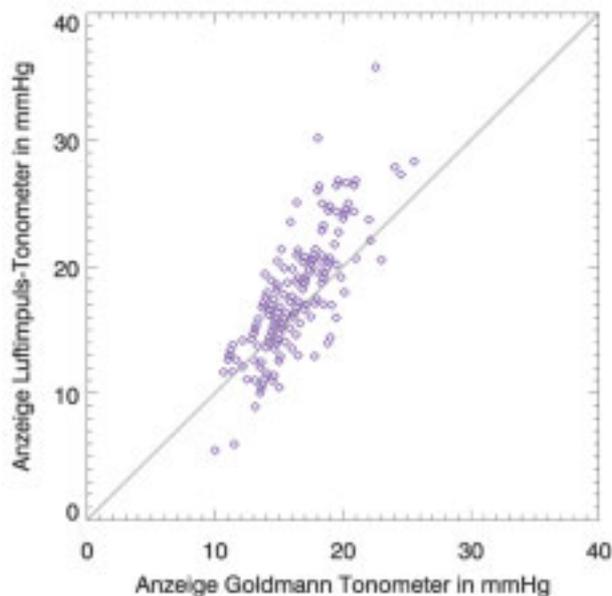


Bild 1c: Abweichungen der QT-Zeiten, die mit einem der besseren Algorithmen automatisch ermittelt wurden, von den Goldstandardwerten aller EKG-Signale des PTB-Referenzdatensatzes.

Bild 2a: Vergleich zweier Messverfahren zur Bestimmung des Augeninnendrucks: Jedes Symbol steht für einen Patienten, für den der Augeninnendruck mit einem Applanationstonometer (Ordinatenwert) und einem Luftimpulstonometer (Abszissenwert) bestimmt wurde. Würden beide Verfahren übereinstimmende Ergebnisse liefern, müssten alle Symbole auf der Geraden angeordnet sein (Daten entnommen aus der Dissertation von Nathalie Pater, Strasbourg, 1992, Hinweis von Marc Priel, LNE, Paris).



– bei zunehmender Anzahl an teilnehmenden Laboratorien – eine Steigerung der Bestehensquote z. B. bei der Konzentration der Erythrozyten von ca. 65 % auf über 95 % erreicht werden.

Seit 2002 ist für hämatologische Laboratorien die Teilnahme an Ringversuchen zur externen Qualitätssicherung Pflicht. Derzeit werden von der PTB pro Jahr für 10 Ringversuche zum Kleinen Blutbild Referenzwerte ermittelt. Um diese Aufgabe auf die Sicherstellung der Rückführbarkeit zu reduzieren, unterstützt die PTB den Aufbau von externen Referenzlaboratorien.

Eine moderne Entwicklung stellt die Durchflusszytometrie mit mikrosystemtechnischen Komponenten dar, an der auch die PTB beteiligt ist (Bild 3). Auch hierfür wird die Vergleichbarkeit der Messungen mit den klassischen Verfahren eine anspruchsvolle Aufgabe sein.

### Quantifizierungsstrategien für die molekulare und zelluläre Bildgebung

Ziel der Metrologie in der medizinischen Bildgebung ist die Einführung quantitativer Verfahren, um zu einer Vergleichbarkeit der Bildinformationen zu kommen. Dies gilt insbesondere für die molekulare und zelluläre Bildgebung mit spezifisch bindenden Kontrastmitteln. Im modernen Bildgebungsverfahren versucht man, über geeignete Sonden einen für ein Zielmolekül bzw. einen bestimmten Zelltyp spezifischen Bildkontrast zu



Bild 2b: TransfERNormal der PTB für Applanationstonometer.

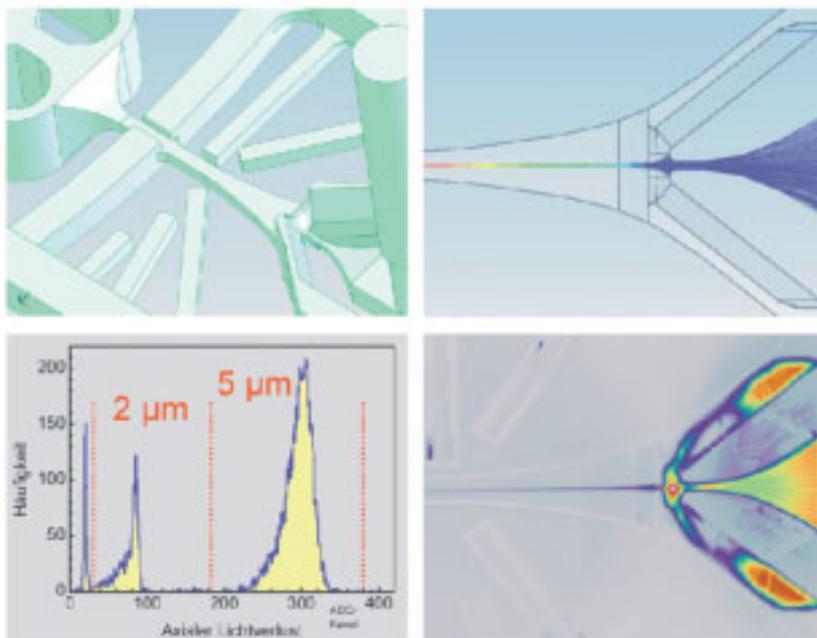


Bild 3: Links oben: Hohlraummodell eines mikrostrukturierten Durchflusszytometers. Rechts: Vergleich von FEM-Simulationsrechnungen (oben) zur hydrodynamischen Fokussierung des Probenstroms im Flusskanal des Mikro-Durchflusszytometers mit der mikroskopischen Aufnahme des fluoreszierenden Rhodamin-6G-Probenstroms (unten). Links unten: Impulshöhenverteilungen monodisperser Polystyrolkugeln mit 2 µm oder 5 µm Durchmesser, gemessen zur Überprüfung der Funktion der Mikrostruktur.

erreichen („molekulare“ bzw. „zelluläre“ Bildgebung). Auf diese Art und Weise kann man, ohne direkten Eingriff in den lebenden Organismus, biologische Prozesse über einen längeren Zeitraum beobachten. Aus dem beobachteten Bildkontrast können jedoch meistens keine quantitativen Aussagen gewonnen werden. Dies trifft insbesondere auf die Kernspintomographie (MRT) zu, bei der der Zusammenhang etwa zwischen der Zielmoleküldichte bzw. der Zellzahl im betrachteten Volumenelement und der messbaren Signaländerung sehr komplex ist. Die PTB entwickelt daher in Kooperation mit dem *Institut für Medizinische Immunologie der Charité* und dem *Deutschen Herzzentrum Berlin* Strategien für eine Quantifizierung des MR-Kontrastes. Neben der physikalischen Modellbildung werden in-vitro- und in-vivo-Modelle (Tiermodell) entwickelt und hinsichtlich ihrer Eignung für die Kalibrierung des Bildkontrastes untersucht. In ersten Versuchen wurden Endothelzellen, die die Innenwände von Blutgefäßen auskleiden, mit magnetischen Nanoteilchen markiert und anschließend auf der Innenwand von Rattenaorten kultiviert. Der Bildkontrast (Schwärzung in Abb. 4 links) kann dann in Beziehung zur Anzahl der markierten Zellen gebracht werden. Darüber hinaus konnte ein MR-Bildgebungsverfahren gefunden werden, das durch eine off-resonante Anregung einen positiven Bildkontrast

ergibt (s. Bild 4 rechts). Nach Transplantation der so präparierten Gefäßmodelle können nunmehr auch Untersuchungen in vivo erfolgen. Zukünftig soll durch eine multimodale Bildgebung ein simultaner Nachweis von optischen Fluoreszenz- und MR-Signalen erfolgen und damit die Quantifizierung der molekularen und zellulären Markerdichte erleichtert werden.

Aber nicht nur für die MR-Bildgebung, sondern auch für fluoreszenzoptische Verfahren und Kontrastmittel auf der Basis magnetischer Nanopartikel ist die Entwicklung von Quantifizierungsmethoden erforderlich. Im Rahmen einer CCQM-Pilotstudie (CCQM-P58 „Fluorescence Measurements for the Life Sciences“) wurden unter Leitung des NPL und NIST Messungen an Standardlösungen und einem ELISA (Enzyme-Linked Immunosorbent Assay) durchgeführt. Die Auswertung der Studie soll zeigen, welchen Einfluss die Probenvorbereitung und das Nachweis-system auf die Messunsicherheit von Fluoreszenzmesstechniken in der Biotechnologie haben.

Im DFG-Schwerpunktprogramm 1104 „Kolloidale magnetische Flüssigkeiten“ hat die PTB die Aufgabe übernommen, für eine Harmonisierung der magnetischen Messtechnik unter den über 25 Arbeitsgruppen des

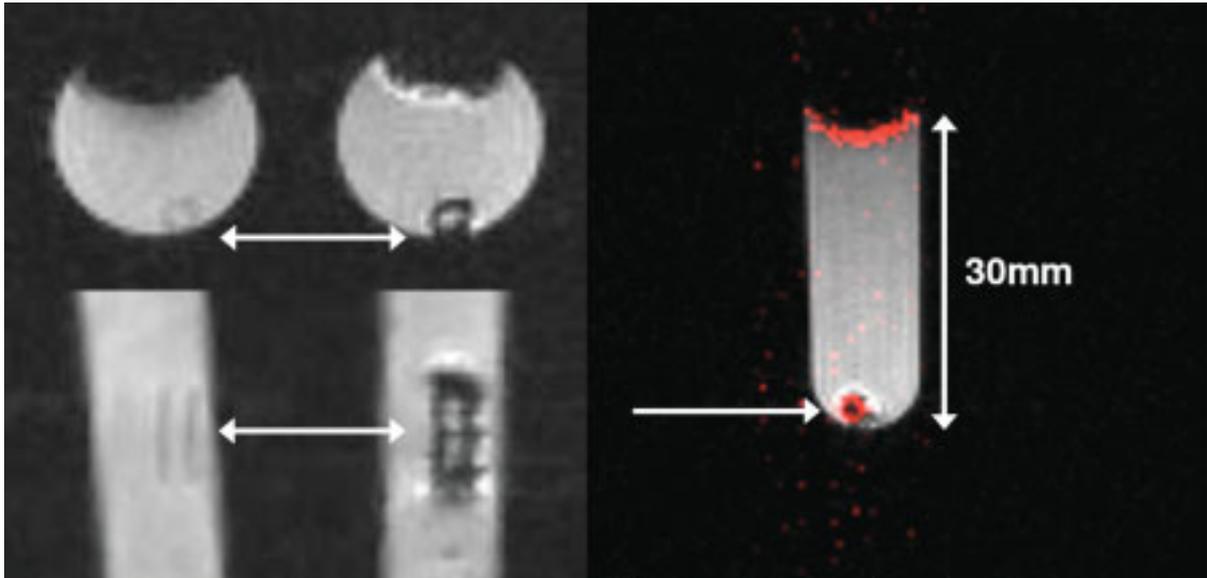


Bild 4: MR-Bilder von Rattenaorten mit unmarkierten Endothelzellen (links, kein spezifischer Kontrast) und magnetisch markierten Endothelzellen im negativen (Mitte) und positiven Kontrast (rechts, rot).

Förderprogramms zu sorgen. Zu Beginn des Förderprogramms vor sechs Jahren wurde allgemein beklagt, dass verschiedene etablierte Messverfahren zur Messung der Anfangsuszeptibilität einer Ferrofluidprobe deutlich abweichende Ergebnisse lieferten. Durch detaillierte Untersuchungen der Messverfahren, Aufstellung von Messunsicherheitsbudgets, Herausgabe von Richtlinien zur korrekten Durchführung und Auswertung der Messungen sowie mit Hilfe von Sternversuchen gelang es, zum Ende des Schwerpunktprogramms auf mittlere Messabweichungen der Teilnehmer von 4 % zu kommen, die im Rahmen der jeweiligen Unsicherheitsschätzungen lagen.

### Vergleich der Vergleiche

Die Ziele des 1999 unterzeichneten „Mutual Recognition Arrangement“ (MRA) sind die Bestimmung des Grades der Äquivalenz („degree of equivalence“) zwischen den einzelnen nationalen Normalen und die gegenseitige Anerkennung von Zertifikaten der metrologischen Staatsinstitute. Eine wesentliche Rolle bei der Umsetzung des MRA spielen internationale Ringvergleiche zwischen den metrologischen Staatsinstituten („CIPM key comparisons“).

Neben den CIPM-Ringvergleichen werden auch internationale Ringvergleiche regionaler Metrologie-Organisationen („RMO key comparisons“) durchgeführt. Ziel dieser regionalen Ringvergleiche ist es, die durch die CIPM-Ringvergleiche ermittelte metrologische Äquivalenz auf eine größere Anzahl nationaler metrologischer Institute auszudehnen. Dazu wird gefordert, dass eine bestimmte Anzahl an Teilnehmern sowohl an dem RMO wie an dem dazu korrespondierenden CIPM-Ringvergleich beteiligt ist. Mittels der Ergebnisse dieser Teilnehmer wird dann im Anschluss an einen durchgeführten RMO-Ringvergleich eine Transformation („linking“) zu dem entsprechenden CIPM-Ringvergleich durchgeführt mit dem Ziel, die Ergebnisse des RMO-Ringvergleichs mit denen des CIPM-Ringvergleichs vergleichbar zu machen.

Dazu werden in der PTB grundlegende methodische Verfahren erarbeitet. Im Rahmen dieser Arbeiten ist in diesem Jahr mit EUROMET.AUV.V-K1 der erste Ringvergleich mit 14 europäischen Laboratorien innerhalb der regionalen metrologischen Organisation EUROMET auf dem Gebiet „Vibration“ ausgewertet und die Transformation der Ergebnisse zum überregionalen Ringvergleich CCAUV.V-K1 vollzogen worden (siehe Bild 5). Die Ergebnisse dieser Analyse sind mittlerweile in der Datenbank des BIPM veröffentlicht.

Darüber hinaus ist im Rahmen einer Kooperation mit dem VNIIM eine neue Methode für die Transformation von Ergebnissen von RMO-Ringvergleichen an korrespondierende CIPM key comparisons entwickelt worden.

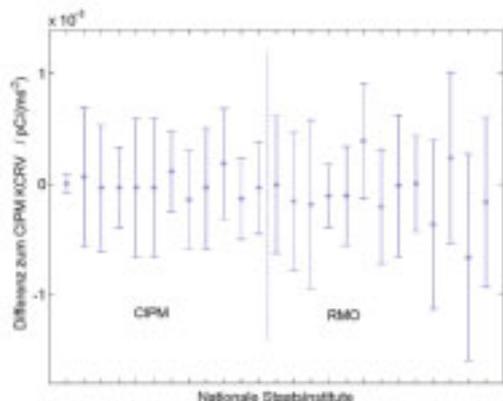


Bild 5: Ergebnisse des RMO-Ringvergleichs EUROMET.AUV.V-K1 („Vibration“) nach Transformation auf das Niveau des CIPM-Ringvergleichs CCAUV.V-K1. Dargestellt sind die Differenzen der Werte der jeweils teilnehmenden Staatsinstitute für die Sensitivitäten der Beschleunigungsaufnehmer zum CIPM-Referenzwert (KCRV) für die Frequenz 160 Hz.

### Vergleichbarkeit und Rückführbarkeit in der metrologischen Informationstechnik

Konzepte wie Vergleichbarkeit oder Rückführbarkeit sind der Informationstechnik nicht in dem Maße und in der Form inhärent wie der Metrologie. Dennoch sind sie vorhanden und finden in zunehmendem Maße Anwendung.

Bei der Rückführung auf internationale Normen geht es in erster Linie um die Vergleichbarkeit der an IT-Produkte und IT-Prozesse gestellten Anforderungen. Normen definieren Anforderungen an bestimmte Klassen von Produkten und Prozessen. Bei der Definition von Anforderungen spezifischer, z. B. spezieller metrologischer Produktklassen wird durch deren Rückführung auf Normen nicht nur die Vergleichbarkeit von Anforderungen, sondern auch die Validierung der entsprechenden Produkte unterstützt.

Ein solche Vorgehensweise ist bei der Entwicklung der inzwischen verabschiedeten WELMEC-Richtlinie 7.2 zur Software in Messgeräten nach MID angewendet worden.

Dabei wurden die Normen ISO/IEC 9126 und 12119 verwendet, die eine adäquate Basis für den Vergleich von Softwareeigenschaften bieten.

Von zunehmender Bedeutung ist das Gebiet der Sicherheit von Software und Messdaten. Auf dem Gebiet der IT-Sicherheit hat sich die internationale Norm ISO/IEC 15408 – Common Criteria (CC) als der zentrale Bezugspunkt herausgebildet. In ersten Ansätzen findet er bereits in der Metrologie Anwendung, wie z. B. bei der Anerkennung von CC-basierten Sicherheitszertifikaten für in Messgeräten verwendete universelle Betriebssystemkomponenten. Die Ausschöpfung der Potenzen dieser Norm für die Metrologie steht aber erst am Anfang.

Eine Besonderheit in der metrologischen Informationstechnik besteht darin, dass Software und andere IT-Komponenten integraler Bestandteil von Messsystemen sind und integriert in das Gesamtsystem mit den in der Metrologie etablierten Verfahren bewertet oder verglichen werden sollen. Dazu ist im Jahre 2006 in der WELMEC-Arbeitsgruppe „Software“ ein der Idee der Ringvergleiche entlehnter Ansatz zur vergleichenden Softwareprüfung verfolgt worden. Die ersten Resultate sind in dem Sinne vielversprechend, dass solche Vergleiche in Verbindung mit der Rückführung der zugrunde liegenden Anforderungen auf Standards ein probates Mittel zur Absicherung der Vergleichbarkeit von Softwarevalidierungen in der Metrologie werden können.

### Resümee

Anhand obiger Beispiele wird deutlich, dass Vergleichbarkeit in der Messtechnik auf sehr vielfältige Weise sichergestellt und das Vorgehen jeweils auf das gestellte Problem angepasst werden muss. Hier sind speziell für die jüngeren Disziplinen der Metrologie neue Wege zu finden und zu beschreiten.

## 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

#### PTB nimmt an internationaler Pilotstudie „Fluorescence Measurements for the Life Sciences“ teil

Im Rahmen einer CCQM-Pilotstudie (CCQM-P58 „Fluorescence Measurements for the Life Sciences“) wurden unter Leitung von NPL und NIST Messungen an Standardlösungen und einem ELISA (Enzyme-Linked Immunosorbent Assay) durchgeführt. Die Auswertung der Studie soll zeigen, welchen Einfluss die Probenvorbereitung und das Nachweis-system auf die Messunsicherheit von Fluoreszenzmesstechniken in der Biotechnologie haben. (B. Ebert, FB 8.3, [bernd.ebert@ptb.de](mailto:bernd.ebert@ptb.de))

#### DFG-Schwerpunktprogramm 1104 „Kolloidale magnetische Flüssigkeiten“ abgeschlossen

Nach sechs Jahren Laufzeit wurde das Schwerpunktprogramm 1104 der Deutschen Forschungsgemeinschaft im September 2006 mit einem Kolloquium in Benediktbeuern abgeschlossen. Die PTB hatte sich in diesem Rahmen für eine Harmonisierung der magnetischen Messtechnik, u.a. durch Koordination von Ring- und Sternversuchen unter den Teilnehmern des Förderprogramms, engagiert. Zusätzlich entwickelte die PTB ein Messverfahren zur Früherkennung von Aggregationen in magnetischen Flüssigkeiten – eine unverzichtbare Qualitätskontrolle vor einer medizinischen Anwendung am Menschen. (D. Eberbeck, FB 8.2, [dietmar.eberbeck@ptb.de](mailto:dietmar.eberbeck@ptb.de))

#### Sonderheft der PTB-Mitteilungen: Mathematik für die Metrologie

Die Herbstausgabe der PTB-Mitteilungen gibt einen Überblick über mathematische Forschungsarbeiten des Fachbereiches 8.4 „Mathematische Modellierung und Datenanalyse“ und anderer mathematisch orientierter Arbeitsgruppen in der PTB. Der Inhalt umfasst eine Diskussion der Perspektiven der Mathematik in der Metrologie sowie Beiträge zur Lösung inverser Probleme, Analyse von Ringvergleichen, Bayessche Datenanalyse, Welligkeitsanalyse bis hin zu Simulationen im Explosionsschutz. (M. Bär, FB 8.4, [markus.baer@ptb.de](mailto:markus.baer@ptb.de))

#### Auswertung des Ringvergleichs EUROMET.AUV.V-K1

Der erste Ringvergleich mit 14 europäischen Laboratorien innerhalb der regionalen metrologischen Organisation EUROMET auf dem Gebiet „Vibration“ wurde ausgewertet und die Transformation der Ergebnisse zum überregionalen Ringvergleich CCAUV.V-K1 vollzogen. Die beteiligten Laboratorien lieferten Kalibrierergebnisse aus dem Frequenzbereich von 40 Hz bis 5 kHz von 2 Transfernormalen (Beschleunigungsaufnehmern). Eine besondere Herausforderung bei der Analyse war die Berücksichtigung der aufgetretenen Instabilität eines der beiden Transfernormale. Die Ergebnisse der Analyse sind in der Datenbank des BIPM veröffentlicht. (A. Link, FB 8.4, [alfred.link@ptb.de](mailto:alfred.link@ptb.de))

#### Quantitative Fluoreszenz-Korrelations-spektroskopie: Bestimmung des konfokalen Volumens

Im Fachbereich 8.3 der PTB wird die Fluoreszenz-Korrelationsspektroskopie hinsichtlich ihrer Eignung als hochempfindliches, präzises Messverfahren zur Bestimmung der Diffusion einzelner Moleküle sowie zur Bestimmung lokaler Konzentrationen im Bereich von pico- bis nanomolar untersucht. Die Genauigkeit des Messverfahrens hängt entscheidend von der Kenntnis des konfokalen Volumens ab. Es wurden drei Methoden zur Bestimmung des konfokalen Volumens verglichen und dabei jeweils ähnliche Messunsicherheiten von 10 % bei einem Volumen von  $10^{-15}$  L ermittelt. (S. Rüttinger, R. Macdonald, FB 8.3, [rainer.macdonald@ptb.de](mailto:rainer.macdonald@ptb.de))

#### Neue Methode zur Lösung des inversen scatterometrischen Problems

In Zusammenarbeit mit dem *Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik* (WIAS) in Berlin wurde eine neue mathematische Methode zur problemabhängigen Bestimmung optimaler und ausreichender Messdaten für eine sichere Profilrekonstruktion in der Scatterometrie entwickelt und in die DIPOG-Software des WIAS integriert, die innerhalb der PTB zur Auswertung von scatterometrischen Messungen der Arbeitsgruppen 4.23 und 7.31 genutzt wird. (H. Groß, FB 8.4, [hermann.gross@ptb.de](mailto:hermann.gross@ptb.de))

## Metrologie für die Wirtschaft

### Entwicklung eines Fluoreszenzmammographen

Im Rahmen eines Verbundprojektes mit der *Philips Forschungslaboratorien GmbH*, der *Schering AG*, der *PicoQuant GmbH* und der *Robert-Rössle-Klinik* hat die PTB optische und elektronische Komponenten für einen modular aufgebauten optischen Mammographen entwickelt, mit dem die Anreicherung eines schwach fluoreszierenden Kontrastmittels in Karzinomen erfasst werden soll.

(D. Grosenick, FB 8.3, dirk.grosenick@ptb.de)

### Patientensicherheit bei MRT-Untersuchungen mit Transmit-SENSE-Technik

Transmit-SENSE ist eine neuartige Technik der Magnetresonanztomographie (MRT), die es erlaubt, mit Hilfe eines mehrkanaligen, kohärenten Sendesystems Magnetisierungsmuster mit frei wählbarer räumlicher Verteilung anzuregen. In einer Kooperation der PTB mit der *Bruker BioSpin GmbH* und der *Uni Freiburg* wurden Phantomexperimente zur Bestimmung von Verteilungen der spezifischen Absorptionsrate (SAR) durchgeführt und mit theoretischen Modellen verglichen. Diese Vergleiche bilden die Grundlage für eine zukünftige Charakterisierung des Verfahrens hinsichtlich der Auswirkungen auf die Patientensicherheit. (F. Seifert, FB 8.1, frank.seifert@ptb.de)

### Frühzeitiger Nachweis entzündlich rheumatischer Gelenkveränderungen mittels Laser-induzierter Fluoreszenz

Im Rahmen der Kooperation mit der *Schering AG*, dem *Institut für Radiologie der Charité Berlin* und der Firma *LTB Lasertechnik Berlin GmbH* wurden zwei Geräte zum Fluoreszenznachweis (Rheuma-imager) aufgebaut, wobei ein Gerät auf einer großflächigen Anregung und einem empfindlichen Kamerasystem beruht und das andere einen Laserstrahl rastert und mittels einer Avalanche-Photodiode die spezifische Fluoreszenzemission nachweist. Die flächenhafte Anregung gestattet einen empfindlicheren Nachweis der Fluoreszenz aus tieferen Arealen, während das ab rasternde Verfahren eine höhere Ortsauflösung erlaubt. (J. Berger, FB 8.3, joern.berger@ptb.de; B. Ebert, FB 8.3, bernd.ebert@ptb.de)

### Virtuelles Experiment für die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur hochgenauen Asphärenmessung

Im Rahmen eines von der BESSY GmbH finanzierten Drittmittelprojektes wird zusammen mit der AG 4.21 ein neues, interferometrisches Messverfahren zur hochgenauen Messung von Asphären mit Krümmungsradien im Bereich von 2,5 cm bis 10 m entwickelt. Als Ergebnis eines virtuellen Experiments konnte eine Messanordnung ermittelt werden, die es erlaubt, die angestrebten Genauigkeiten von  $5 \cdot 10^{-7}$  rad für die Winkeltangenten zu realisieren und damit die Basis für das neue Messverfahren zu bilden. (J. Gerhardt, FB 8.4, joachim.gerhardt@ptb.de; M. Stavridis, FB 8.4, manuel.stavridis@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### Sichere Messdatenübertragung mit WLAN-Prototypen anlässlich der Automechanika 2006 vorgestellt

Zur Automechanika 2006 in Frankfurt/Main wurden die in der PTB im Rahmen eines vom BMWi geförderten Projektes entwickelten industrietauglichen WLAN-Prototypen präsentiert. In ihnen kommt eine kryptographische Sicherheitstechnik zum Einsatz, die Messdaten mit einer fortgeschrittenen elektronischen Signatur versieht. Unabhängig vom Kommunikationsweg, Protokoll oder Speichermedium ist jederzeit die Überprüfung der Messdaten unter Nutzung einer Verifikationssoftware möglich. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)

### Charakterisierung von Analog-Digital-Umsetzern

Die messtechnische Infrastruktur zur Charakterisierung der dynamischen Parameter von Analog-Digital-Umsetzern (ADU) wurde modernisiert und erlaubt hochauflösende Messungen gemäß dem „state-of-the-art“. Diese Auswahl der parallel geschalteten ADU für das Projekt „Portabler digitaler Transfer Standard“ der Abteilung 2 wurde beispielhaft mit dieser Messeinrichtung unterstützt. (H.-H. Albrecht, FB 8.2, hans-helge.albrecht@ptb.de)

### Neue Softwaredokumentationsrichtlinie herausgegeben

Die technische PTB-Richtlinie für die Dokumentierung von Software wurde grundlegend erneuert und in einer überarbeiteten Version herausgegeben. Diese Anpassung wurde auf Grund der Rolle, die die angemessene und normkonforme Dokumentierung von Software im Rahmen der Erstellung und Validierung von Software gemäß DIN EN ISO/IEC 17025 spielt, notwendig. Die Dokumentationsrichtlinie liefert eine allgemeine Anleitung, aber auch konkrete Hilfestellung. (N. Greif, FB 8.5, [norbert.greif@ptb.de](mailto:norbert.greif@ptb.de))

### Metrologie für die Gesellschaft

#### Schädigt Rauchen das Gehirn?

Der schädliche Einfluss auf Lunge, Herz und Kreislauf ist lange bekannt, doch jetzt steht das Rauchen erstmals im Verdacht, auch das Gehirn zu beeinträchtigen. In Zusammenarbeit mit Jürgen Gallinat von der *Universitätsmedizin Charité*, Berlin wurden im Gehirn von 22 Rauchern strukturelle Defizite im Vergleich zu Niemals-Rauchern (23) in vivo mittels MR-Tomographie bei 3 Tesla detektiert. Sowohl Volumen als auch Dichte der grauen Gehirnschicht waren bei Rauchern in frontalen, okzipitalen und temporalen Regionen verringert. (F. Schubert, FB 8.1, [florian.schubert@ptb.de](mailto:florian.schubert@ptb.de))

#### Neurochemische Abweichungen im Hippocampus von Schizophrenen

In Zusammenarbeit mit der *Universitätsmedizin Charité*, Berlin, wurden in der Gehirnstruktur Hippocampus bei 29 schizophrenen Patienten erhöhte Konzentrationen des Neurotransmitters Glutamat und verringerte Konzentrationen des Neuronenmarkers N-Acetylaspartat im Vergleich zu gesunden Kontrollpersonen (n = 30) gefunden. Zwei Kontrollregionen im Gehirn Schizophrener zeigten diese hochsignifikanten Anomalien nicht. Die Konzentrationen der Metabolite in vivo wurden mittels eines in der PTB entwickelten magnetresonanzspektroskopischen Verfahrens bei 3 Tesla bestimmt. (F. Schubert, FB 8.1, [florian.schubert@ptb.de](mailto:florian.schubert@ptb.de))

### 12-kanalige Kopfspule mit Oktaeder-Symmetrie für schnelle Bildgebung in der Magnetresonanztomographie (MRT)

Thomas Riemer von der *Universität Leipzig* wurde für seine Idee einer MRT-Kopfspule in Oktaeder-Symmetrie mit einem Innovationspreis Medizintechnik 2004 ausgezeichnet. Mit dem neuen Konzept können Beschleunigungsverfahren durch paralleles Senden („Transmit-SENSE“) oder Empfangen („SENSE“, „GRAPPA“) nicht nur senkrecht, sondern auch parallel zur Körperachse eingesetzt werden, wodurch höhere Gesamtbeschleunigungen und günstigere Bildorientierungen möglich werden. Die Experimente werden in Zusammenarbeit mit Thomas Riemer in der PTB durchgeführt. (E. Kirilina, FB 8.1, [evgeniya.kirilina@ptb.de](mailto:evgeniya.kirilina@ptb.de))

### In-vivo Quantifizierung von magnetischen Nanopartikeln im Tiermodell

Gegenwärtig werden in der *Universitätsklinik Erlangen* neuartige Krebstherapien entwickelt, bei denen mittels magnetischer Nanopartikel die toxische Wirkung von Arzneistoffen auf den Tumor konzentriert wird. Die PTB entwickelt ein mehrkanaliges SQUID-Magnetrelaxometer, mit dem über eine Ganzkörperaufnahme Ort und Menge der magnetischen Nanopartikel in-vivo bestimmt werden sollen. Messungen am Kaninchen belegen die hohe Empfindlichkeit der Magnetrelaxometrie bei der Lokalisation und der Quantifizierung magnetischer Nanopartikel in biologischen Systemen. (F. Wiekhorst, FB 8.2, [frank.wiekhorst@ptb.de](mailto:frank.wiekhorst@ptb.de))

### Untersuchung der Eigenschaften spontaner Gehirnsignale mit dem 304-Kanal-Vektormagnetometer im BMSR II

Vor einigen Jahren wurde auf Grund magnetenzephalografischer Messungen die Hypothese aufgestellt, dass einer der Hauptrhythmen der Hirnaktivität, die sog. okzipitalen Alpha-Wellen mit einer typischen Frequenz von 10 Hz, von einer pulsierenden, gleichgerichteten Quelle verursacht werden. Messungen mit dem 304-Kanal-Vektormagnetometer im BMSR-2 zeigten jetzt ein differenzierteres Bild: Das beobachtete MEG-Signal setzt sich aus okzipitalen biphasischen Alpha-Schwingungen und einer DC-Verschiebung aufgrund von Augenbewegungen zusammen. (T. Sander-Thoemmes, FB 8.2, [tilmann.sanderthoemmes@ptb.de](mailto:tilmann.sanderthoemmes@ptb.de))

### Ortsaufgelöste Remanenzmessungen an technischen und biologischen Objekten im nT-Bereich

Ortsaufgelöste Flussdichtemessungen im nT-Bereich, wie sie zum Auffinden magnetischer Verunreinigungen, bei der Entmagnetisierung von Werkstoffen oder zur Charakterisierung biologischer Quellen erforderlich sind, können schnell und präzise mit einem Messaufbau mit 3-Achsen-Fluxgate im magnetisch geschirmten Raum (BMSR 2) in einem Hintergrundfeld von  $|B| < 0,6$  nT durchgeführt werden. Die Gesamtmessunsicherheit beträgt weniger als 1 nT bei einer Ortsauflösung von 15 mm. (S. Knappe-Grueneberg, FB 8.2, [silvia.knappe-grueneberg@ptb.de](mailto:silvia.knappe-grueneberg@ptb.de))

### Kombinierte MEG- und NIRS-Messungen an Schlaganfallpatienten

In Zusammenarbeit mit Neurologen der *Charité* werden im Rahmen des „Berlin NeuroImaging Center“ an Schlaganfallpatienten kombinierte Messungen der DC-Magnetoenzephalographie (MEG) und der zeitaufgelösten Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) durchgeführt, um die Kopplung zwischen elektrophysiologischen und vaskulären Reizantworten auf motorische Stimulation zu untersuchen. Das in der PTB entwickelte NIRS-Verfahren mit ps-Zeitauflösung erlaubt die Beobachtung der interessierenden Reizantwort im Kortex ohne den störenden Einfluss systemischer Effekte. (H. Wabnitz, FB 8.3, [heidrun.wabnitz@ptb.de](mailto:heidrun.wabnitz@ptb.de); T. Sander, FB 8.2, [tilmann.sander-thoemmes@ptb.de](mailto:tilmann.sander-thoemmes@ptb.de))

### Durchflusszytometrischer Nachweis von Zink-Protoporphyrin in Erythrozyten bei Patienten mit Eisenmangel

Eisenmangel führt zu einer erhöhten Konzentration von Zink-Protoporphyrin (ZnPP) in roten Blutzellen. In Zusammenarbeit mit dem *Institut für Klinische Chemie, Klinikum Mannheim*, wurden einzelne Erythrozyten mit erhöhtem ZnPP-Gehalt durchflusszytometrisch nachgewiesen. Die Ergebnisse der durchflusszytometrischen Detektion von Erythrozyten mit erhöhtem ZnPP-Gehalt lassen erwarten, dass diese Methode empfindlicher auf akute Änderungen des Eisenstoffwechsels reagiert als das konventionelle Verfahren, bei dem nur Mittelwerte über eine große Anzahl (gewaschener) Erythrozyten bestimmt werden. (S. Schädel, J. Neukammer, FB 8.3, [sandra.schaedel@ptb.de](mailto:sandra.schaedel@ptb.de), [joerg.neukammer@ptb.de](mailto:joerg.neukammer@ptb.de))

### Simulation und Bifurkationsanalyse von T-Wellen-Alternans in einem numerischen Herzmodell

T-Wellen-Alternans ist eine Veränderung des Elektrokardiogramms, die als wichtiger Indikator für eine Herzerkrankung gilt. Mit Hilfe eines dreidimensionalen Modells des Kaninchenherzens wurde gezeigt, dass Alternans oberhalb einer kritischen Schlagfrequenz des Herzens auftritt. Unter anderem wurde gefunden, dass die Blockade von Natrium- und Kaliumionenkanälen der Herzmuskelzellen das Auftreten von Alternans befördert, während eine Blockade der Kalziumkanäle selbst bei hohen Schlagfrequenzen die Alternans-Instabilität des Herzens komplett unterdrücken kann. (S. Bauer, FB 8.4, [steffen.bauer@ptb.de](mailto:steffen.bauer@ptb.de))

### Akzeptanz von CC-Zertifikaten im gesetzlichen Messwesen

Im Fachbereich 8.5 wurde eine Vorgehensweise entwickelt, die es ermöglicht, von anerkannten Stellen ausgegebene Sicherheitszertifikate auf der Basis der einschlägigen internationalen Norm „Common Criteria“ (CC) in das Sicherungskonzept von Messgerätesoftware einzubeziehen. Es entsteht zunehmender Bedarf für solche Verfahren, um mit der sich ausbreitenden Verwendung von Standardbausteinen in Messsystemen, wie z. B. Betriebssystemkomponenten, auch auf deren in der Regel unter anderen Umständen bescheinigte Sicherheit aufzubauen. (U. Grottker, FB 8.5, [ulrich.grottker@ptb.de](mailto:ulrich.grottker@ptb.de))

### Einstufung aller gesetzlich geregelten Messgerätearten in Software-Risikoklassen

Erstmals ist eine Einstufung aller gesetzlich geregelten Messgerätearten in Software-Risikoklassen vorgenommen worden. Mit dieser Einstufung wird die jeweils erforderliche Tiefe der Softwareanforderungen und -prüfungen systematisch festgelegt. Sie ist ein wesentliches Element zur Harmonisierung der Verfahren im gesetzlichen Messwesen. Die Einstufung beruht auf dem im Jahre 2005 eingeführten WELMEC-Leitfaden 7.2, in dem die Risikoklassen definiert und die Einstufung der 10 in der MID einbezogenen Messgerätearten vorgenommen worden ist. (U. Grottker, FB 8.5, [ulrich.grottker@ptb.de](mailto:ulrich.grottker@ptb.de))

### **Spielgerätezulassung nach neuer Spielverordnung angelaufen**

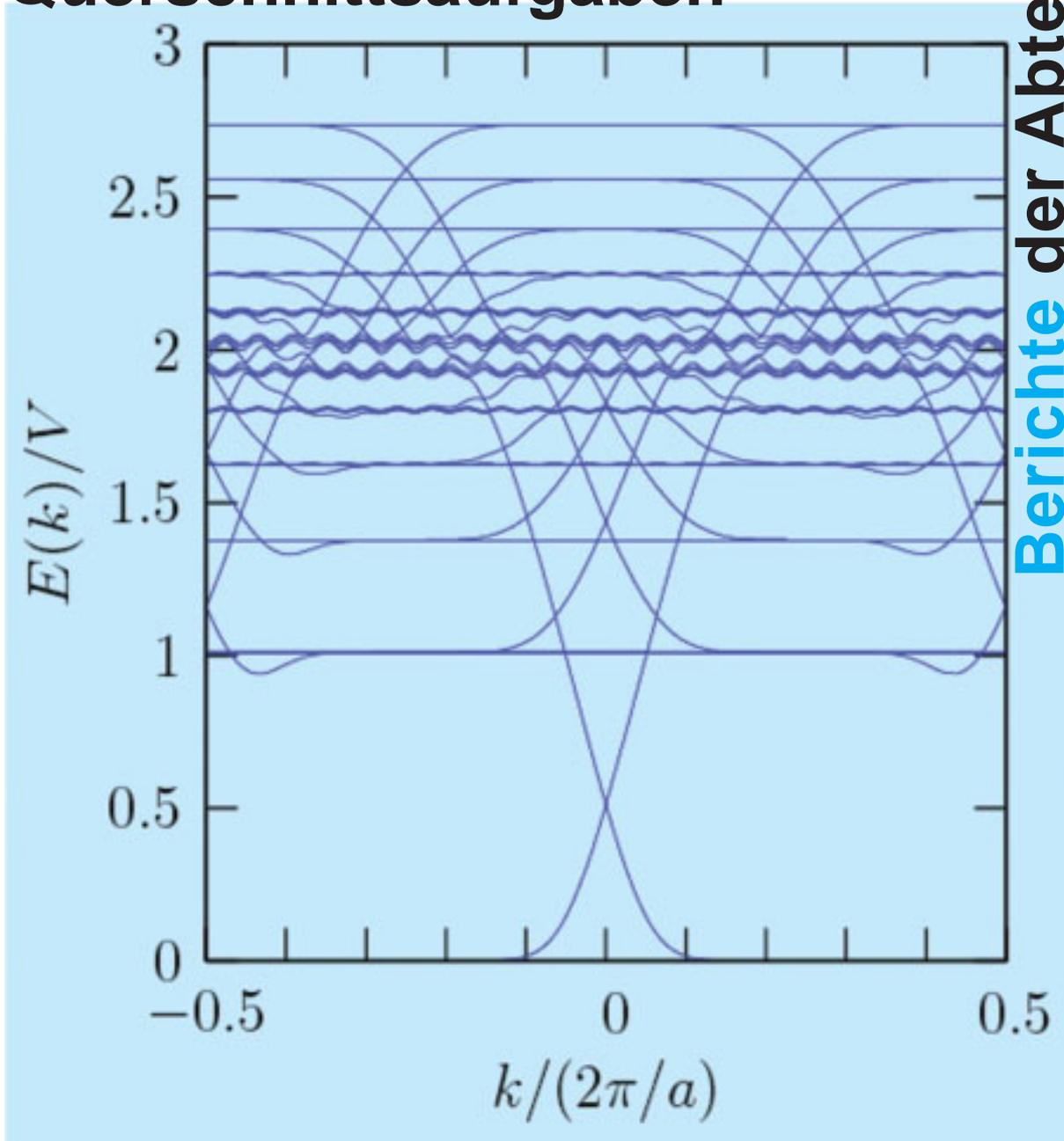
Nach Abschluss der anhängigen so genannten Altanträge in der vom Verordnungsgeber zugewilligten Überlappungszeit bis März 2006 wurden im April 2006 die erste und im weiteren Verlauf bis September 2006 weitere 30 Zulassungen auf der Basis der neuen Spielverordnung erteilt. Die zuvor entwickelten und mit der Industrie diskutierten technischen Richtlinien waren in der Anfangsphase an die zuvor schwer überschaubaren realen Geräteentwürfe anzupassen; sie haben sich aber grundsätzlich bewährt. Die nun verbesserte Transparenz der Zulassungsbedingungen hat zu einer deutlichen Erhöhung der Zahl der Antragsteller und der Anträge geführt. (R. Kuschfeldt, FB 8.5, [reiner.kuschfeldt@ptb.de](mailto:reiner.kuschfeldt@ptb.de))

### **Feldstudie über die Zuverlässigkeit von Geldspielgeräten abgeschlossen**

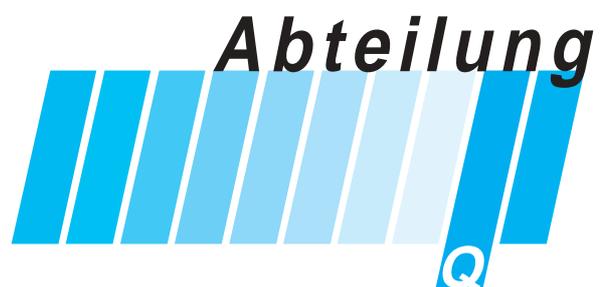
Nach dreijähriger Arbeit, davon mehr als zwei Jahre Beobachtung von Spielgeräten im realen Einsatz, ist die im Auftrag des Bundesministeriums durchgeführte Feldstudie mit der Herausgabe des Abschlussberichtes beendet worden. Im Bericht wird belegt, dass Ausfälle oder andere Veränderungen der Geräte nicht unbemerkt bleiben und durch Ersatz von defekten Komponenten mit baugleichen Teilen behoben werden können. Die Ergebnisse der Studie führten dazu, dass im Rahmen der neuen Spielverordnung von einer befristeten Aufstellgenehmigung Abstand genommen wurde. (H. Moeck, FB 8.5, [hartmut.moeck@ptb.de](mailto:hartmut.moeck@ptb.de))



# Wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben



Berichte der Abteilungen



# Wissenschaftliche technische Querschnitt

Die Abteilung Q hat einen aus zwei Teilen bestehenden Auftrag: Sie unterstützt die Fachabteilungen durch wissenschaftliche, technische und infrastrukturelle Dienstleistungen und sie arbeitet mit nationalen und internationalen Partnern auf wissenschaftlicher und auf technischer Ebene zusammen.

Ohne die unterstützenden Prozesse, an denen mehr als 70 % des Abteilungspersonals mitarbeiten, wäre die PTB nicht arbeitsfähig. Für eine Berichterstattung im Rahmen eines Jahresberichts sind sie aber weniger geeignet. Daher setzen wir den Schwerpunkt auch in diesem Jahr auf die Darstellung unserer Aktivitäten in den Geschäftsbereichen Grundlagen der Metrologie, Metrologie für die Gesellschaft und Internationale Angelegenheiten.

#### Titelbild

Die elektronische Bandstruktur eines Gittermodells mit einer Flussdichte von  $11/23$  eines Flussquantums  $h/e$  pro Einheitszelle für Energien  $E(k)/V > 0$ . Die waagrechten Linien entsprechen den *bulk*-Landaubändern. Dazwischen liegen die Energien der Randzustände, die bei den Impulsen  $k/(2\pi/a) = 0$  und  $\pm 0,5$  eine fast lineare Energie-Impuls-Dispersion aufweisen. Dieses Verhalten führt zu der im Experiment beobachteten ungewöhnlichen Quanten-Hall-Leitfähigkeit  $\sigma_{xy} = -e^2/h$  ( $2n + 1$ ),  $n=0,1,\dots$

#### Grundlagen der Metrologie

Im Fachbereich Q.2 *Theoretische Grundlagen* standen erneut quantentheoretische Untersuchungen im Vordergrund. Diese Fragestellungen werden umso wichtiger, je stärker Nanotechnologie und makroskopische Quanteneffekte in die Metrologie Einzug halten. In diesem Zusammenhang steht auch ein seit vielen Jahren ungelöstes Messproblem, das sich immer dann ergibt, wenn Quantensysteme in Kontakt mit klassischen Systemen gebracht werden. Ein kürzlich publizierter Vorschlag zur Beschreibung dieser Wechselwirkung nutzt einen universell einsetzbaren Formalismus, der alle möglichen Konfigurationen des Systems berücksichtigt. Dieser neue Zugang vermeidet nicht nur einige der Defizite früherer Ansätze, sondern lässt auch eine Rückwirkung auf das klassische System zu. Weitere Schwerpunkte bilden die Arbeiten zu Phasenübergängen beim Heisenberg-Antiferromagneten mit anisotropem Austausch auf dem Dreiecksgitter sowie die Untersuchungen zu Vielteilcheneffekten in Quantenpunkten. Bei letzterer Fragestellung wird in zunehmendem Maße die funktionale Renormierungsgruppen-Methode eingesetzt, welche die approximative Behandlung von Vielteilchensystemen gestattet und bereits beim Tunneln, bei Quantendrähten und einfachen Quantenpunkten erfolgreich eingesetzt wurde. Aber auch der seit vielen Jahren untersuchte Quanten-Hall-Effekt erbrachte im Berichtszeitraum überraschend neue Aspekte.

# aftlich- tsaufgaben

Die vor etwa einem Jahr erfolgte Entdeckung eines ungewöhnlichen Quanten-Hall-Effekts in einzelnen Schichten von Graphit hat weltweit neue Aktivitäten auf diesem Gebiet hervorgerufen. Die in Sprüngen von  $2e^2/h$  auftretende Hall-Leitfähigkeit wird derzeit theoretisch durch die Bewegung von relativistischen „masselosen Dirac-Fermionen“ erklärt, die auf einem zweidimensionalen hexagonalen Kohlenstoff-Gitter bei niedrigen Energien auftreten. Der große energetische Abstand benachbarter Landaubänder macht dieses neuartige Probenmaterial höchst interessant für metrologische Anwendungen. Mit den heute erreichbaren magnetischen Flussdichten sollte die Bestimmung der von-Klitzing-Konstanten sogar bei Zimmertemperatur möglich sein. Zunächst müsste erst noch mit sehr geringer Unsicherheit überprüft werden, ob der Wert des quantisierten Hall-Widerstandes tatsächlich mit dem von üblichen Proben aus Halbleiter-Heterostrukturen übereinstimmt. Anhand von im Fachbereich Q.2 durchgeführten theoretischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass ein ähnliches Verhalten der Hall-Leitfähigkeit auch für Elektronen auf einem Quadratgitter zu erwarten ist, wenn die Stärke der magnetischen Flussdichte in der Nähe von einem halben Flussquantum  $h/e$  pro Einheitsquadrat liegt (siehe Titelbild S. 163). Die Rechnungen zeigen außerdem, dass bei Anwesenheit von

mikroskopischer Unordnung die Eigenschaften der Quanten-Phasen-Übergänge von den bisher in gewöhnlichen Quanten-Hallproben bekannt gewordenen verschieden sind.

Viele der im Fachbereich Q.2 anfallenden Aufgaben, wie die Beschreibung von Systemen mit mehreren wechselwirkenden Teilchen oder auch die Untersuchung der Einteilchendynamik mit Streuung an zufälligen elektrostatischen Unordnungspotentialen, lassen sich nur selten vollständig mit analytischen Methoden bewerkstelligen. Meistens sind diese bekanntermaßen schwierigen Probleme nicht einmal in Grenzfällen mit Näherungsmethoden zu lösen. Immer häufiger müssen daher exakte numerische Modellrechnungen durchgeführt werden, um physikalisch besonders interessante Situationen zu erfassen. Ein vor kurzem in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Q.4 *Informationstechnologie* aufgebaute Linux-Cluster soll nun dabei helfen, die während der vergangenen Jahre entstandenen Engpässe bei der verfügbaren Rechenleistung zu beseitigen. Eine openMoxix-Erweiterung des Betriebssystems ermöglichte den Aufbau einer virtuellen Mehrprozessor-Maschine, die aus miteinander vernetzten Standardkomponenten besteht. Ein Vorteil dieser Architektur liegt in der sehr guten Skalierbarkeit, was auch beinhaltet, dass sich der Cluster leicht an zukünftige Aufgabenstellungen anpassen lässt.

### Metrologie für die Gesellschaft

Die Umsetzung der Europäischen Messgeräterichtlinie (MID) sollte mit einer umfassenden Neuregelung des gesetzlichen Messwesens verbunden werden. Umfangreiche Diskussionen haben das Vorhaben verzögert, so dass das *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie* (BMWi) entschieden hat, zunächst nur die Regelungen der MID durch die Ergänzungen der bestehenden Eichordnung umgehend umzusetzen und die weitere Modernisierung des gesetzlichen Messwesens zu einem späteren Zeitpunkt vorzunehmen.

Auch ohne nationale Rechtsgrundlage hat das BMWi die PTB für Konformitätsbewertungen nach den Modulen B, D und H1 gemäß MID benannt, so dass die entsprechenden Verfahren für die Messgerätehersteller rechtzeitig vor Inkrafttreten der MID durchgeführt werden konnten. Hierbei handelt es sich um Baumuster- und Entwurfsprüfungen durch die Fachabteilungen sowie um Anerkennungen von Qualitätsmanagementsystemen bei Herstellern durch die Zertifizierungsstelle für Messgeräte (ZS-M), die hierfür Auditoren aus der PTB und den Eichbehörden einsetzt.

Hinsichtlich der Auswirkungen der MID auf Hersteller und Anwender von Messgeräten sowie die Eichbehörden und staatlich anerkannten Prüfstellen sind noch viele Fragen offen. In verschiedenen internen und externen Veranstaltungen haben Referenten der PTB über die neuen Maßnahmen im gesetzlichen Messwesen und deren Konsequenzen für die unterschiedlichen Zielgruppen berichtet. Im Zusammenhang mit der Liberalisierung des Messwesens waren die Energieversorgungsunternehmen und die staatlich anerkannten Prüfstellen besonders an den Aufgaben von Benannten Stellen interessiert, um Investitionen für diesen Bereich besser abschätzen zu können.

Bei der Harmonisierung der Anwendung und Interpretation der MID hat die Europäische Kommission der Zusammenarbeit in WELMEC (*European Cooperation in Legal Metrology*) eine wichtige Rolle zugewiesen. Die von WELMEC entwickelten Leitfäden zur Anwendung der Richtlinie über nichtselbsttätige Waagen und der MID haben die Zustimmung der Kommission gefunden und werden auf deren Internetseite zur Anwen-

dung empfohlen. Die auch von der PTB beeinflussten Leitfäden betreffen Interpretationen und Klarstellungen von Anforderungen an Geräte und Stellen zur Durchführung der Konformitätsbewertungen. Die von WELMEC erarbeitete Liste über diejenigen Elemente von internationalen Empfehlungen der OIML (*International Organization of Legal Metrology*), welche zur Erfüllung der Konformitätsvermutung gemäß den grundlegenden Anforderungen der MID geeignet sind, wurde ebenfalls von der Kommission nach Konsultation der europäischen Messgerätearbeitsgruppe akzeptiert.

Nach dem Aufbau der Infrastruktur durch die zentrale Technologietransferstelle konnten von dort die Dienstleistungsangebote an die Kunden direkt herangetragen werden. Für die interne Zielgruppe fanden an beiden Standorten Informationsveranstaltungen zu Patentverwertungen und Existenzgründungen statt. In der externen Ausrichtung wurden Technologieangebote für verschiedene Wirtschaftsbranchen dargestellt. Hierzu zählten die Präsenz auf den Messen *Control* und *Optatec* sowie die Internetplattform [www.technologietransfer.ptb.de](http://www.technologietransfer.ptb.de) mit verschiedenen Möglichkeiten zum Download. Auch eine Informationsbroschüre sowie Auszüge aus dem Patentkatalog sind in gedruckter Form erhältlich.

Aufgrund verstärkter Akquisitionstätigkeit konnten auch für solche Patente weitere Lizenzverträge abgeschlossen werden, bei denen die Suche nach Interessenten in der Vergangenheit besonders schwierig war. Aufgrund des Kompetenznachweises der PTB durch Patentierung im Hause entwickelter Technologien wurden parallel zu den Lizenzvereinbarungen auch Drittmittelprojekte gestartet, so dass die Einnahmen der PTB in diesem Bereich verbessert werden können.

Ein erfolgreiches Technologietransferprojekt fand auf dem Gebiet der Existenzgründung statt. Das in der PTB entwickelte Verfahren zum „Magnetic Marker Monitoring“ zur visuellen Verfolgung des Weges einer Tablette im menschlichen Körper wird von der Firma *SocraTec R&D GmbH* weiter entwickelt, wobei Geräte der PTB zur Nutzung überlassen werden und ein bisher befristet tätiger PTB-Mitarbeiter einen neuen Geschäftsbereich in der Firma aufbauen kann.

## Internationale Angelegenheiten

Eine für die PTB, die Abteilung Q und insbesondere den Fachbereich Q.5 *Technische Zusammenarbeit* erfreuliche Nachricht erreichte uns im September 2006: Das *Bundesministerium für wirtschaftliche Entwicklung und Zusammenarbeit* (BMZ) stellt zur Finanzierung des deutschen Projektbeitrages „Förderung von Qualitätsinfrastrukturen – sektoral, national, regional (PTB)“ einen Betrag in Höhe von 3,8 Mio EUR jährlich bereit. Damit werden die Planungssicherheit erhöht und der Verwaltungsaufwand gesenkt. Die Förderung leistet einen großen Beitrag, Maßeinheiten und Produktqualitäten in den Entwicklungs- und Schwellenländern möglichst schnell internationalen Standards anzupassen. Nicht zuletzt ist dieser Auftrag aber auch eine Anerkennung der seit über vierzig Jahren bestehenden erfolgreichen Zusammenarbeit zwischen dem BMZ und der PTB.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Einfache Ableitung der Markov-Formel

Die grundlegende Formel zur Berechnung der dem Wert einer Ausgangsgröße beigeordneten Messunsicherheit ist die so genannte Markov-Formel. Sie ist auf alle Modelle anwendbar, die Eingangsgrößen mit Ausgangsgrößen verbinden. Für ein lineares Modell führt sie auf die Gaußsche Unsicherheitsfortpflanzung, die im international akzeptierten „Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ (GUM) empfohlen wird. Es ist gelungen, eine einfache Ableitung der Markov-Formel zu finden, die gleichzeitig Vorgehensweisen zur numerischen Berechnung der Unsicherheit liefert. (B. R. L. Siebert, FB Q.2, [bernd.siebert@ptb.de](mailto:bernd.siebert@ptb.de))

#### Der Heisenberg-Antiferromagnet mit anisotropem Austausch auf dem Kagome-Gitter

Es wurde das Phasendiagramm des Heisenberg-Antiferromagneten auf dem anisotropen Kagome-Gitter bestimmt. (W. Apel, FB Q.2, [walter.apel@ptb.de](mailto:walter.apel@ptb.de))

#### Ungewöhnlicher Quanten-Hall-Effekt bei einer Flussdichte von fast einem halben Flussquantum pro Einheitszelle

Das kürzlich für zweidimensionale hexagonale Gitter (Graphene) bekannt gewordene ungewöhnliche Verhalten der Hall-Leitfähigkeit konnte in einer theoretischen Untersuchung auch für ein Quadratgitter bei einer magnetischen Flussdichte von fast  $1/2$  Flussquantum pro Einheitszelle beobachtet werden. (L. Schweitzer, FB Q.2, [ludwig.schweitzer@ptb.de](mailto:ludwig.schweitzer@ptb.de))

#### Hochleistungsrechnen mit Linux-Mosix-Cluster

Zur Abdeckung des numerischen Rechenbedarfs im Fachbereich Q.2 wurde ein leicht skalierbarer Linux-Mosix-Cluster aus Standard-PC aufgebaut. (F. Kaufmann, FB Q.4, [frank.kaufmann@ptb.de](mailto:frank.kaufmann@ptb.de); L. Schweitzer, FB Q.2, [ludwig.schweitzer@ptb.de](mailto:ludwig.schweitzer@ptb.de))

#### Funktionale Renormalisierungsgruppe: Quantenpunkte, Quantendrähte und Quantentunneln

Die Methode der funktionalen Renormierungsgruppe wird angewandt und entwickelt zur Beschreibung der Eigenschaften von Quantenpunkten, Quantendrähten und der Physik des Tunnelns in Doppelmulden-Potenzialen. (M. Weyrauch, FB Q.2, [michael.weyrauch@ptb.de](mailto:michael.weyrauch@ptb.de); M. Reginatto, FB Q.2, [marcel.reginatto@ptb.de](mailto:marcel.reginatto@ptb.de))

#### Wechselwirkung zwischen klassischen und quantisierten Systemen

Ein schlüssiger und allgemeiner Ansatz zur Beschreibung der Wechselwirkung zwischen klassischen und quantisierten Systemen ist von großem Interesse für die Quantentheorie des Messprozesses. Darüber hinaus liefert ein solcher Ansatz ein hilfreiches Werkzeug für Berechnungen. Dieser Formalismus überwindet unterschiedliche Probleme, welche sich in vielen vorhergehenden Versuchen in der Literatur ergaben. (M. Reginatto, FB Q.2, [marcel.reginatto@ptb.de](mailto:marcel.reginatto@ptb.de))

#### Begleitung von Ringvergleichen

Im Bereich Gleichstrom und Niederfrequenz werden laufend Wechselspannungs-Ringvergleiche mit dem Fachbereich 2.1 als Pilotlabor und dem DKD durchgeführt. (K. Guckelsberger, FB Q.4, [kurt.guckelsberger@ptb.de](mailto:kurt.guckelsberger@ptb.de))

### Metrologie für die Gesellschaft

#### Statistische Daten zu den staatlich anerkannten Prüfstellen

Die Anzahl der für die verschiedenen Medientätigen Prüfstellen sowie die von diesen Stellen durchgeführten Prüfungen sind zusammengefasst. (C. Mengersen, FB Q.3, [christian.mengersen@ptb.de](mailto:christian.mengersen@ptb.de))

**Vollversammlung für das Eichwesen**

Der Vortragsteil der Vollversammlung im November 2005 war durch Informationen über das neue Eichwesen infolge der Umsetzung der MID geprägt. In der Arbeitssitzung wurde über innerstaatliche Vorschriften in der Form von PTB-Anforderungen, technischen Richtlinien und Prüfanweisungen diskutiert und abgestimmt. (C. Mengersen, FB Q.3, christian.mengersen@ptb.de)

**Umsetzung der MID in nationales Recht**

Zur Umsetzung der MID in Deutschland wurde der allgemeine Teil der Eichordnung (EO) um die Anforderungen der MID ergänzt und die betroffenen Anlagen zur EO entsprechend geändert. Außerdem musste das Eichgesetz um Ermächtigungen erweitert werden. (C. Mengersen, FB Q.3, christian.mengersen@ptb.de)

**PTB-Seminar zur Zukunft der staatlich anerkannten Prüfstellen**

Etwa 230 Teilnehmer von staatlich anerkannten Prüfstellen und Behörden zeigten großes Interesse an diesem Thema. Dabei standen Fragen zur Benennung der Prüfstellen im Rahmen der MID im Vordergrund. (C. Mengersen, FB Q.3, christian.mengersen@ptb.de)

**Elektronische Formulare für Stichprobenprüfungen der staatlich anerkannten Prüfstellen**

Die Prüfstellen für Messgeräte für Elektrizität, Gas und Wasser haben vermehrt Stichprobenprüfungen zur Verlängerung der Eichgültigkeitsdauer durchgeführt. Für die Jahresmeldungen wurden die bisherigen unterschiedlichen Papierformulare durch einheitliche elektronische Formulare ersetzt. (C. Mengersen, FB Q.3, christian.mengersen@ptb.de)

**Datenbank für Bauartzulassungen der PTB**

Der Anwenderkreis im geschützten Bereich der Internetanwendung MICert (Measuring Instruments Certificates), über die zuständige Stellen vollständige Bauartzulassungen und die Öffentlichkeit allgemeine Informationen über erteilte Zulassungen abrufen können, hat um 17 % zugenommen. (C. Mengersen, FB Q.3, christian.mengersen@ptb.de)

**Erste Verfahren zur Anerkennung von QM-Systemen nach den Anhängen D bzw. H1 der MID durchgeführt**

Als Benannte Stelle für die Module D und H1 hat die PTB etwa 20 Verfahren zur Anerkennung von QM-Systemen bei Herstellern von Messgeräten durchgeführt und hierbei Auditoren aus der PTB und den Eichbehörden eingesetzt. (H. Stolz, FB Q.3, harry.stolz@ptb.de)

**Metrologie für die Wirtschaft****Messeauftritte und neue Lizenzvereinbarungen**

Seit Mitte 2005 werden Technologietransferangebote der PTB systematisch auf Leitmessungen präsentiert. Lizenzvereinbarungen wurden in den Bereichen Optik, Wärmeleitfähigkeitsmessung und Medizintechnik abgeschlossen. (B. Smandek, FB Q.3, bernhard.smandek@ptb.de)

**Patentdatenbank wird intensiv genutzt**

Mit über 300 Besuchern monatlich und einem Google-Ranking unter den ersten zehn für ausgewählte Patentsegmente erfreut sich die PTB-Patentdatenbank hohen öffentlichen Zuspruchs. Interaktive Funktionalitäten ermöglichen den Download von Infoseiten zu den Patenten und erleichtern das Verständnis der Patentkodierung IPC. (B. Smandek, FB Q.3, bernhard.smandek@ptb.de)

**Internet-Zeitdienst**

Die in der Nacht zum 1. Januar 2006 eingefügte Schaltsekunde wurde von den Zeitservern der PTB korrekt angekündigt und verarbeitet. Der Zeitdienst basiert jetzt auf dem Network-Time-Protocol der Version 4. (D. Sibold, FB Q.4, dieter.sibold@ptb.de)

**MELODI-MID**

MID-Zertifikate und Bewertungsberichte sowie die erweiterten Stamm- und Metadaten entsprechend der neuen EG-Richtlinie wurden bereits vor Inkrafttreten, rechtzeitig für eine Übergangsphase, in SAP-MELODI realisiert. (R. Ohl, FB Q.4, rainer.ohl@ptb.de)

### Informationsaustausch über das Internet

Für die weltweite Zusammenarbeit von Partnern aus der PTB mit Arbeitsgruppen von anderen Nationalen Metrologischen Instituten (NMI) sowie der Industrie ist eine Arbeitsoberfläche zur Zusammenarbeit über das Internet bereitgestellt worden.

(K. Guckelsberger, FB Q.4, kurt.guckelsberger@ptb.de)

### ArchiSafe gewinnt 6. eGovernment-Wettbewerb

Im Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie wurde im Rahmen der 4. Nutzerbeiratssitzung des BundOnline-Projekts ArchiSafe (Langzeitarchivierung) am 14. Dezember 2005 ein funktionsfähiger Pilot vorgestellt. Das Projekt ArchiSafe wurde beim 6. eGovernment-Wettbewerbs für Bundes-, Landes- und Kommunalverwaltungen in der Kategorie „Innovativster Technikeinsatz“ ausgezeichnet. (S. Hackel, FB Q.4, siegfried.hackel@ptb.de)

## Internationale Angelegenheiten

### Qualitätsinfrastruktur als Schlüssel zur Teilnahme am Welthandel

Im September 2006 veranstaltete der Fachbereich *Technische Zusammenarbeit* der PTB die Braunschweiger QI-Tage, einen Fachdialog zu Themen der Qualitätsinfrastruktur (QI). Dort wurden qualitätsrelevante Themen und Arbeitsgebiete, die von der PTB national und international vertreten werden, behandelt. Es kamen neben eigenen Experten aus dem Bereich des Messwesens auch Fachleute aus anderen QI-Bereichen – und den jeweiligen Fachinstitutionen – wie dem Prüfwesen, Normenwesen und der Konformitätsbewertung, zu Wort. (S. Thomas, FB Q.5, sabine.thomas@ptb.de)

### PTB war Gastgeber für die 16. Komiteesitzung von COOMET

COOMET ist die regionale Metrologieorganisation, die zwölf Länder der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten und Osteuropas sowie Kuba und Nordkorea umfasst. Vom 3.-6. September 2006 kamen die Komiteemitglieder von COOMET zu ihrem jährlichen Treffen in der PTB zusammen und konnten wichtige Weichen für die Zukunft stellen. Es wurde ein Nachfolger für den 2007 aus dem Amt scheidenden COOMET-Präsidenten gewählt und Georgien wurde als jüngstes Mitgliedsland aufgenommen. (H.-D. Velfe, FB Q.5, hans-dieter.velfe@ptb.de)

### Förderung der Qualitätsinfrastruktur in Syrien

Die PTB unterstützt seit Beginn des Jahres den Ausbau der Qualitätsinfrastruktur Syriens, um sie internationalen Standards anzupassen. Hintergrund ist das Assoziierungsabkommen Syriens mit der EU sowie das Bestreben Syriens, in die *World Trade Organisation* (WTO) aufgenommen zu werden. (B. Schildberg, FB Q.5, bjoern.schildberg@ptb.de)

### Unterstützung der Maghrebländer beim Zugang zum europäischen Markt

Seit Anfang 2006 unterstützt die PTB die drei Maghrebländer Marokko, Algerien und Tunesien durch ein regionales Qualitätsinfrastrukturprojekt bei ihren Bestrebungen auf dem internationalen Markt konkurrenzfähige Unternehmen aufzubauen. Die Anpassung an internationale Standards ist besonders hinsichtlich des geplanten Freihandelsabkommens mit der EU unerlässlich. (C. Heider, FB Q.5, carola.heider@ptb.de)

### Eignungsprüfungen im MERCOSUR (Mercado Común del Sur)

Mit dem regionalen Vorhaben „Stärkung der prüftechnischen Infrastruktur in den Bereichen Umwelt und Lebensmittel im MERCOSUR“ (teilnehmende Länder sind Argentinien, Brasilien, Chile, Paraguay, Uruguay) soll eine qualitative Verbesserung der Einhaltung von Qualitätskriterien bei Laboranalysen und deren Auswertung erreicht werden. Eignungsprüfungen in Form von Vergleichsmessungen sind ein wichtiges Instrument zur objektiven Überprüfung der Kompetenz von Prüflaboratorien. (U. Flach, FB Q.5, ursula.flach@ptb.de)

### **Fallstudie zu den erzielten Wirkungen durch das PTB-Projekt „Aufbau einer Kalibrierstelle im CERTI“ in Brasilien**

Im Rahmen einer Ex-Post-Analyse wurden die erzielten Wirkungen des Projektes „Aufbau einer Kalibrierstelle im CERTI“ (Florianópolis, Brasilien) untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass durch den Ausbau der messtechnischen Dienstleistungen von CERTI eine Verbesserung der Qualität der Produkte der lokalen Klein- und Mittelunternehmen erreicht wurde. Dadurch wird ein Beitrag geleistet zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der brasilianischen Industrie.

(L. Seehausen, FB Q.5,  
lieselotte.seehausen@ptb.de)

## **Unterstützung der Fachabteilungen**

### **Vollelektronisches Bibliothekssystem in der PTB**

Die Bibliothek der PTB hat an beiden PTB-Standorten den Endausbau mit dem neuen elektronischen Bibliothekssystem PICA des Gemeinsamen Bibliotheksverbundes (GBV, mit Sitz in Göttingen) erreicht. Als letzte Komponente wurde am Standort Berlin die elektronische Ausleihverbuchung in Betrieb genommen. Durch die Einbindung in den GBV, dem wissenschaftliche Bibliotheken aus sieben Bundesländern angehören, konnte die PTB-Bibliothek ihre Dienstleistungsqualität deutlich verbessern. (J. Meier, Ref. Q.11, joachim.meier@ptb.de)

### **Angebot elektronischer Zeitschriften ausgeweitet**

Eine quantitative Steigerung des Angebotes an elektronischen Zeitschriften war das Ziel der Teilnahme der PTB-Bibliothek am DFG-Projekt „Nationallizenzen für elektronische Medien“. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der PTB erhalten online Zugriff auf Volltexte von Zeitschriftenartikeln, die sich die PTB-Bibliothek ohne dieses DFG-Projekt nicht leisten könnte. (J. Meier, Ref. Q.11, joachim.meier@ptb.de)

### **Datennetz**

Verkabelung mit Gigabit-Ethernet-Komponenten am Standort Braunschweig. (J. Herrmann, FB Q.4, juergen.herrmann@ptb.de)

### **Kopplung der Storage-Area-Network-Infrastrukturen in Braunschweig und Berlin**

Mit Hilfe von Multiprotokoll-Routern wurden die Storage-Area-Network-Infrastrukturen in Braunschweig und Berlin gekoppelt. Ausgewählte Datenbereiche aus Braunschweig werden nun über diesen Weg automatisch mehrmals täglich in Berlin gesichert.

(D. Sibold, FB Q.4, dieter.sibold@ptb.de)

### **SAP-Workshop zu Verwaltungsprozessen**

Q.43 unterstützt bei den vielschichtigen Aspekten der Umsetzung von Verwaltungsprozessen in den SAP-Standard und berät bei der Abbildung und Vereinfachung von Abläufen durch Datenbankunterstützung. (R. Ohl, FB Q.4, rainer.ohl@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 annähernd 400 DKD-akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden durch die DKD-Akkreditierungsstelle kompetent überwacht und in nationalen und internationalen Gremien vertreten.

Im Jahr 2005 (letzter Erfassungszeitraum) stellten die akkreditierten Kalibrierlaboratorien etwa 300 000 DKD-Kalibrierscheine aus. Diese Kalibrierscheine gewährleisten den Nachweis für die messtechnische Rückführung auf nationale oder internationale Normale. Die Zahl der durch diese DKD-Laboratorien herausgegebenen Werkskalibrierscheine lag im selben Jahr bei etwa 2,3 Millionen.

Vor dem Hintergrund der Globalisierung und der stark exportorientierten deutschen Wirtschaft muss die weltweite Anerkennung der DKD-Kalibrierscheine auch zukünftig gewährleistet sein. Hierzu ist die Mitgliedschaft und Anerkennung in der EA (*European cooperation for Accreditation*) und der ILAC (*International Laboratory Accreditation Cooperation*) notwendig.

Das DKD-System ist mit derzeit etwa 350 akkreditierten Kalibrierlaboratorien in Deutschland ein wesentlicher Bestandteil des Technologietransfers auf dem Gebiet der Metrologie. Eine Abfrage bei den DKD-Laboratorien (Anfang 2006) zeigte bei einer hohen Rücklaufquote von über 70 % eine insgesamt große Zufriedenheit mit der Arbeit

der Akkreditierungsstelle. Als ausgezeichnet wurde insbesondere die Begutachterkompetenz bewertet.

Im Ausland sind derzeit über 40 Laboratorien (z. T. Staatsinstitute) durch den DKD akkreditiert. Durch die zunehmende Zahl von Auslandsanfragen und die verstärkte Notwendigkeit der Ressourcenschonung erschien es sinnvoll, die Auslandsstrategie des DKD zu verändern. Zukünftig werden lediglich Anträge aus Staatsinstituten angenommen, sofern keine anerkannte nationale Akkreditierungsstelle im jeweiligen Land vorhanden ist. Als weitere Ausnahme gelten Tochterunternehmen von DKD-akkreditierten deutschen Firmen.

Im Herbst 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.

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, sodass ein nationaler Wettbewerb unter Akkreditierungsstellen zukünftig ausgeschlossen wird.

# Qualitätsma

## Weiterentwicklung des QM-Systems

Auch in diesem Jahr wurde das QM-System der PTB kontinuierlich weiterentwickelt. Dieses System umfasst alle Maßnahmen und Verfahren, die notwendig sind, um die gesetzlichen Anforderungen des Mess- und Prüfwesens, der ISO/IEC 17 025:2000, der Normen der Reihe EN 45 000 bzw. der ISO/IEC 17 000 und die Empfehlungen der DFG zur guten wissenschaftlichen Praxis zu erfüllen. In das QM-System sind alle Geschäfts- und Tätigkeitsbereiche der PTB integriert. Es schließt auch die wissenschaftlich-technischen Querschnittsaufgaben und die relevanten Tätigkeiten der allgemeinen Verwaltung ein.

2006 wurde das QM-System an die neuen Anforderungen der ISO/IEC 17 025:2005 angepasst. Dabei fanden die Aspekte der ständigen Verbesserung, des integrierten Managements, der Kundenorientierung und die Beurteilung der Wirksamkeit von Schulungsmaßnahmen eine besondere Berücksichtigung. Zusätzlich erfolgte für die Herstellung chemischer Referenzmaterialien eine Ergänzung zur Umsetzung der Anforderungen des ISO Guide 34. Begleitet waren beide Entwicklungsprozesse zum einen durch einen umfangreichen Abstimmungs- und Meinungsbildungsprozess in den Abteilungen/Stellen und zum anderen durch eine übergreifende Diskussion und Entscheidungsfindung im neu gegründeten PTB-Ausschuss „Qualitätsmanagement“ (A-QM). In diesem Ausschuss vertreten die QM-Verantwortlichen die Lei-

tung ihrer Abteilung/Stelle in QM-Fragen. Der A-QM umfasst die bisherigen Aufgaben des Arbeitsgremiums der QM-Verantwortlichen und des QM-Lenkungsgremiums. Die Leitung dieses Ausschusses hat der Qualitätsmanager der PTB übernommen. Er wird in dieser Aufgabe unterstützt durch seine AG „Zentrales QM“. Zur verstärkten Unterstützung des Präsidiums wurde außerdem ein Fachbereich „Präsidialer Stab“ (PSt) eingerichtet und ihm die AG „Zentrales QM“ zugeordnet. In ihm werden die eng miteinander verzahnten Aufgabenfelder des strategischen Controlling, der europäischen Zusammenarbeit und des zentralen QM bearbeitet.

## QM-Selbstbewertungsprozess

Grundlage der nationalen und internationalen Anerkennung bildet der jährlich in der PTB durchgeführte zweistufige QM-Bewertungsprozess durch die Leitungen der Abteilungen/Stellen sowie durch den Präsidenten der PTB. Dabei steht dieser Prozess im engen Zusammenhang mit der jährlichen Arbeitsplanung und der weiteren strategischen Entwicklung der PTB. Wesentliche Eingangsgrößen dieses Prozesses bilden die Ergebnisse der internen Audits in den Bereichen Messen/Kalibrieren, Prüfen/Produktzertifizierung, Forschung/Entwicklung sowie interne Dienstleistungen, Resultate der Vergleichsmessungen, der Informationsrückfluss seitens der Kunden und Hinweise aus externen Begutachtungs- und Anerkennungsverfahren im Rahmen nationaler und internationaler

# anagement

Vereinbarungen (z. B. CIPM-MRA, OIML-MAA, IECEx Scheme), der Drittmittelvergabe durch die DFG sowie des Gesetzgebers. Im Ergebnis dieses Bewertungsprozesses ist die Angemessenheit und anforderungsgerechte Ausgestaltung des QM-Systems der PTB sowohl durch die Leitungen der Abteilungen/ Stellen als auch durch den Präsidenten der PTB erneut bestätigt worden.

## **Anerkennung QM-System**

Erstmals wurde 2006 ein Systemaudit insbesondere zur Erfüllung der neuen Anforderungen der ISO/IEC 17 025:2005 durch die verantwortlichen Qualitätsmanager der nationalen Metrologieinstitute der Schweiz (METAS) und Österreichs (BEV) im Präsidium und in der AG „Zentrales QM“ in der PTB durchgeführt. Im Ergebnis wurden der Umstellungsprozess in der PTB als gelungen eingeschätzt und die weitere Auditierung der Umsetzung der neuen Anforderungen für 2007 empfohlen.

Im Rahmen des CIPM-MRA konnten die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB in den Metrologiegebieten Beschleunigung, Länge sowie bei den chemischen Referenzmaterialien unter Berücksichtigung der Anforderungen des ISO Guide 34 nach erfolgreichem internationalen Bewertungsverfahren („peer review“) ausgebaut bzw. bestätigt werden. Die internationale Anerkennung in allen anderen Metrologiegebieten bleibt unverändert aufrechterhalten. Der QM-

Nachweis für 2005 erfolgte durch Berichterstattung des Qualitätsmanagers vor dem neu gegründeten Technischen Komitee für Qualität von EUROMET (<http://www.euromet.org/tc/open/tc-q/index.html>).

Die vom Gesetzgeber bzw. Kunden geforderten Akkreditierungen oder Anerkennungen im Bereich des Explosionsschutzes und der nichtselbsttätigen Waagen blieben unverändert erhalten. Zusätzlich wurde das QM-System der PTB im Zusammenhang mit der Benennung der PTB-Zertifizierungsstelle für Messgeräte auf der Grundlage der Anforderungen der Messgeräte-richtlinie (MID) einer Prüfung durch das BMWi unterzogen. Aufgrund des positiven Ergebnisses wurde die PTB als Benannte Stelle für die Module B, D und H1 für alle Messgerätearten durch das BMWi anerkannt.

Darüber hinaus nahmen in vielen Fällen Fachexperten der PTB an Bewertungsverfahren (peer review) zum CIPM-MRA sowie zum OIML-MAA teil. Sie wurden zumeist durch die nationalen Metrologieinstitute oder durch in den Abkommen benannten Institutionen direkt eingeladen. In diesem Zusammenhang stellten sie ihre technische Kompetenz und Erfahrung weltweit zur Verfügung.

# PTB

**Die Anlagen**

# Kuratorium

## Mitglieder

Präsident des Kuratoriums

**Ministerialdirektor Dr. jur. Eckhard Franz**  
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 Festkörper-  
forschung, 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  
Infineon Technologies AG, München

**Prof. Dr. h. c. mult. Dr. phil. Peter Fulde**

Direktor am Max-Planck-Institut für  
Physik Komplexer Systeme, Dresden

**Dipl.-Ing. Helmwart Fülles**

**Prof. Dr. rer. nat. Axel Haase**

Lehrstuhl „Experimentelle Physik V“  
Universität Würzburg

**Prof. Dr. rer. nat. Theodor W. Hänsch**

Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching  
und Sektion Physik  
Ludwig-Maximilians-Universität, München

**Prof. Dr. rer. nat. Jüßen Mlynek**

Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft, Berlin

**Prof. Dr. rer. nat. Frank Pobell** (bis 11.2006)

Wissenschaftlicher Direktor  
Forschungszentrum Rossendorf

**Dr.-Ing. habil. Joachim Scheuren**

Geschäftsführer der Müller-BBM, Planegg

**Prof. Dr. sc. nat. Joachim P. Schoenes**

Technische Universität, Braunschweig

**Dr. rer. nat. Wolfgang Schwitz**

Direktor des Eidgenössischen Amtes für  
Messwesen (metas), 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. Klaus-Dieter Sommer**

Direktor Landesamt für Mess- und Eichwesen  
Thüringen, Ilmenau

**Dr.-Ing. Peter Maximilian Stehle**

Mitglied der Unternehmensleitung  
Freudenberg und Co., Weinheim

**Prof. Dr. h. c. Dr. med. Günter Stock** (bis 11.2006)

Mitglied des Vorstandes der Schering AG, Berlin

**Prof. Dr. phil. Hans Tiziani**

Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

**Prof. Dr. h. c. Dr. rer. nat. Joachim Treusch**

Präsident der Jacobs University Bremen

**Dr. rer. nat. Martin Winterkorn**

Vorstandsvorsitzender der Volkswagen AG

**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

Neu berufen (ab 11.2006):

**Prof. Dr. Klaus-Peter Jäckel**

Kompetenzzentrum Analytik, BASF AG

**Prof. Dr.-Ing. Hans Schuler**

Vice President Engineering Service, BASF AG

**Prof. Dr. Rainer Metternich**

Mitglied des Vorstandes der Bayer Schering  
Pharma AG



## Präsidium

**Präsident**  
Prof. Dr. E. O. Göbel

☎ 10 00

**Vizepräsident**  
Prof. Dr. M. Peters

☎ 20 00

**Mitglied des Präsidiums**  
Prof. Dr. M. Kühne

☎ 30 00

Abteilung 1  
**Mechanik und Akustik**  
Dr. R. Schwarz

☎ 10 10

Abteilung 2  
**Elektrizität**  
Dr. H. Bachmair

☎ 20 10

Abteilung 3  
**Chemische Physik  
und Explosionsschutz**  
\*Prof. Dr. M. Peters

☎ 20 00

Abteilung 4  
**Optik**  
Dr. F. Riehle

☎ 40 10

Abteilung 5  
**Fertigungsmesstechnik**  
Dr. G. Wilkening

☎ 50 10

Fachbereich 1.1  
**Masse**  
Dr. P. Zervos

☎ 11 00

Fachbereich 1.2  
**Festkörpermechanik**  
Dr. M. Gläser

☎ 12 00

Fachbereich 1.3  
**Kinematik**  
Dr. F. M. Jäger

☎ 13 00

Fachbereich 1.4  
**Gase**  
Prof. Dr. Dr. D. Doppeide

☎ 14 00

Fachbereich 1.5  
**Flüssigkeiten**  
Dr. G. Wendt

☎ 15 00

Fachbereich 1.6  
**Schall**  
Dr. Ch. Koch

☎ 16 00

Fachbereich 1.7  
**Angewandte Akustik**  
Prof. Dr. W. Scholl

☎ 17 00

Fachbereich 2.1  
**Gleichstrom und  
Niederfrequenz**  
Dr. J. Melcher

☎ 21 00

Fachbereich 2.2  
**Hochfrequenz und Felder**  
Dr. T. Schrader

☎ 22 00

Fachbereich 2.3  
**Elektrische Energiemesstechnik**  
Dr. M. Kahmann

☎ 23 00

Fachbereich 2.4  
**Quantenelektronik**  
\*Dr. H. Bachmair

☎ 20 10

Fachbereich 2.5  
**Halbleiterphysik und  
Magnetismus**  
Dr. U. Siegner

☎ 25 00

Fachbereich 2.6  
**Elektrische Quantenmetrologie**  
Dr. F. J. Ahlers

☎ 26 00

Fachbereich 3.1  
**Metrologie in der Chemie**  
Dr. B. Güttler

☎ 31 00

Fachbereich 3.2  
**Analytische Messtechnik  
und Druck**  
Dr. P. Ulbig

☎ 32 00

Fachbereich 3.3  
**Chemisch-physikalische  
Stoffeigenschaften**  
Dr. H. Bauer

☎ 33 00

Fachbereich 3.4  
**Grundlagen des  
Explosionsschutzes**  
Dr. H. Bothe

☎ 34 00

Fachbereich 3.5  
**Zünddurchschlagsprozesse**  
Dr. U. Klausmeyer

☎ 35 00

Fachbereich 3.6  
**System- und Eigensicherheit**  
Dr. U. Johannsmeyer

☎ 36 00

Fachbereich 3.7  
**Zündquellsicherheit**  
\*Dr. U. Johannsmeyer

☎ 36 00

Fachbereich 4.1  
**Photometrie und angewandte  
Radiometrie**  
Dr. K. Stock

☎ 42 00

Fachbereich 4.2  
**Bild- und Wellenoptik**  
\*Dr. K. Stock

☎ 42 00

Fachbereich 4.3  
**Quantenoptik und  
Längeneinheit**  
Dr. P. Becker

☎ 43 00

Fachbereich 4.4  
**Zeit und Frequenz**  
Dr. C. O. Weiss

☎ 44 00

Fachbereich 4.5  
**Optische Technologien**  
\*Dr. F. Riehle

☎ 45 00

Fachbereich 5.1  
**Nano- und Mikrometrologie**  
Dr. L. Koenders

☎ 51 00

Fachbereich 5.2  
**Längen- und Winkelteilungen**  
Dr. H. Bosse

☎ 52 00

Fachbereich 5.3  
**Koordinatenmesstechnik**  
\*Dr. G. Wilkening

☎ 50 10

Fachbereich 5.4  
**Längenmaße und -messmittel**  
Dr. A. Abou-Zeid

☎ 54 00

Fachbereich 5.5  
**Wissenschaftlicher Gerätebau**  
Prof. Dr. F. Löffler

☎ 55 00

## Deutscher Kalibrierdienst

Akkreditierungsstelle des  
Deutschen Kalibrierdienstes  
Dr. W. Bosch



☎ 19 00

Fachaufsicht: BMWi

## Benannte Stellen nach europäischen Richtlinien (Nummer: 0102)

Zertifizierungsstelle für  
Messgeräte  
EG-Richtlinien 2004/22/EG  
Dr. H. Stolz  
im Fachbereich Q.3

☎ 83 20

Zertifizierungsstelle für  
nichtselbsttätige Waagen  
EG-Richtlinie 90/384/EWG  
Dr. P. Zervos  
im Fachbereich 1.1

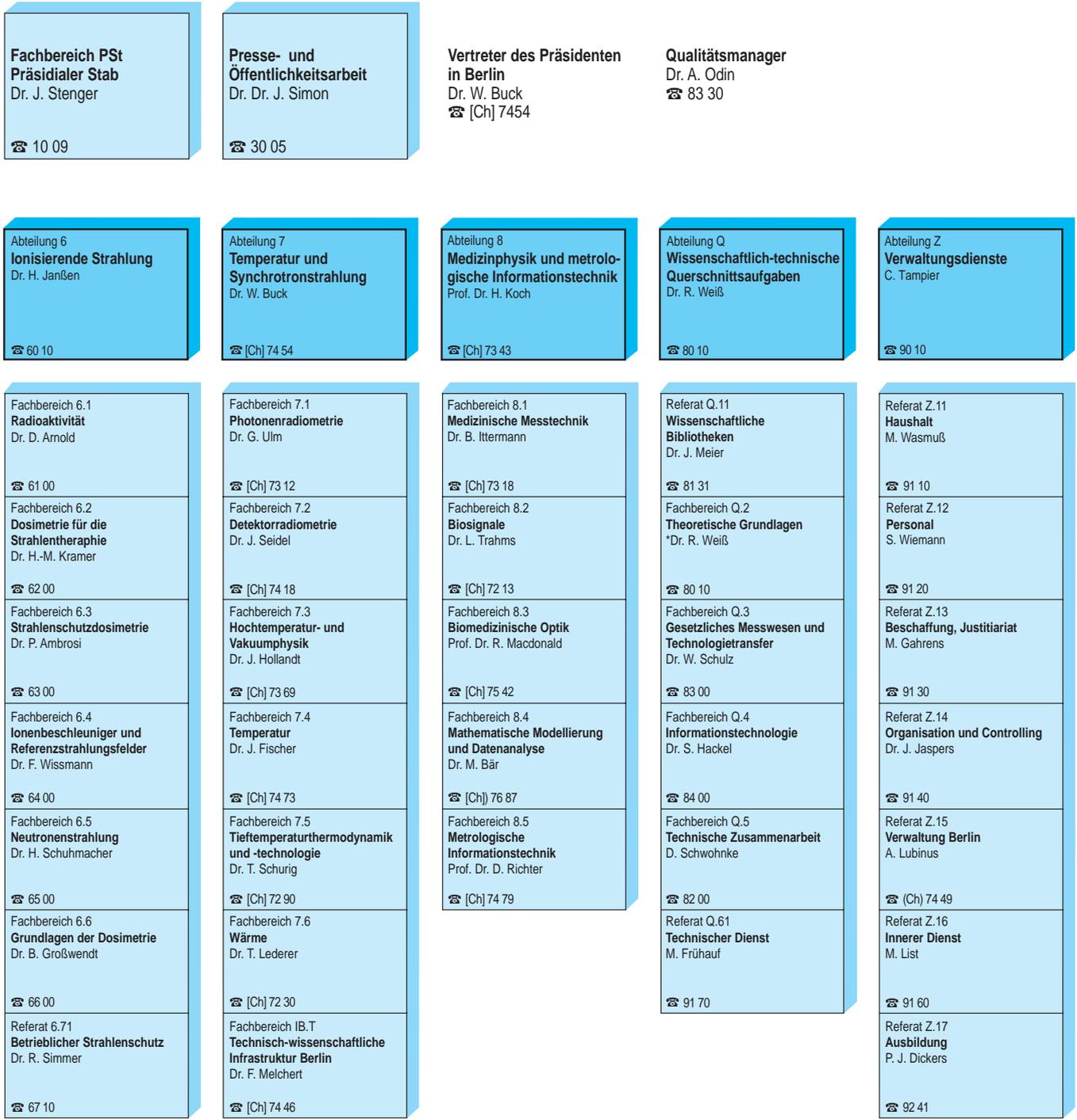
☎ 11 00

Zertifizierungsstelle für  
Explosionsschutz  
EG-Richtlinie 94/9/EG  
Dr. U. Johannsmeyer  
im Fachbereich 3.6

☎ 36 00

# Organigramm

Stand: 31. Dezember 2006



## Ausschüsse

Personal	A-PE	Dr. Weiß	☎ 80 10
Investitionen	A-IV	Prof. Dr. Peters	☎ 20 00
IT-Infrastruktur	A-IT	Dr. Hackel	☎ 84 00
Metrologische Dienstleistungen	A-MD	Prof. Dr. Peters	☎ 20 00
Internationale Zusammenarbeit	A-IZ	Prof. Dr. Kühne	☎ 30 00
Qualitätsmanagement	A-QM	Dr. Odin	☎ 83 30
Forschungsprogramme	A-FP	Dr. Stenger	☎ 10 09

<b>Gesamtpersonalrat</b>	R. Thomas	☎ (Ch) 73 60
<b>Örtlicher Personalrat Braunschweig</b>	U. Meyer	☎ 10 90
<b>Örtlicher Personalrat Berlin</b>	R. Thomas	☎ (Ch) 73 60
<b>Gleichstellungsbeauftragte</b>	C. Krügener	☎ 91 33
<b>Gesamtvertretung der Schwerbehinderten</b>	T. Quandt	☎ 10 97
<b>Vertretung der Schwerbehinderten Braunschweig</b>	T. Quandt	☎ 10 97
<b>Vertretung der Schwerbehinderten Berlin</b>	I. Wichmann	☎ (Ch) 74 48

**Zeichenerklärung**  
 ☎ (05 31) 592-0 Braunschweig  
 Durchwahl 592 ...  
 ☎ (030) 34 81-1 Berlin-Charlottenburg  
 [Ch] Durchwahl 34 81 ...  
 \* wahrgenommen durch

# Ja

## **Anschriften der PTB**

---

### Hausadressen

#### *Braunschweig:*

Bundesallee 100  
38116 Braunschweig  
☎ (05 31) 592-0  
Durchwahl 592-....  
Telefax: (05 31) 592-92 92

#### Postfach-Adresse

Postfach 33 45  
38023 Braunschweig

#### *Berlin-Charlotteburg:*

Abbestraße 2–12  
10587 Berlin  
☎ (030) 34 81-1  
Durchwahl 34 81-7... [Ch]  
Telefax: (030) 34 81-74 90

#### Internet

<http://www.ptb.de/>  
E-Mail: [poststelle@ptb.de](mailto:poststelle@ptb.de)

## **Impressum**

---

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin

Braunschweig, März 2007

Satz, Gestaltung: PTB, Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Übersetzung: PTB, Sprachendienst

Druck: Saxoprint, Dresden

Nachdruck mit Quellenangabe gestattet.



# Jahresbericht im Internet

Der gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2006. 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.

## **Inhalt:**

- **Vorwort**
- **Arbeitsgebiete und Ziele**
- **Nachrichten des Jahres**
- **Aus den Abteilungen**
  - Abteilungsleiterberichte
  - Nachrichten
  - Tätigkeitsbereiche
  - Forschungsvorhaben
  - Kooperationen
- **Zahlen und Fakten**
  - Aktuelle Statistiken
- **Anhang**
  - Nationale/Internationale Normungsgremien
  - Seminare/Workshops/Konferenzen
  - Kolloquien
  - Zulassungen des Eichwesens
  - Externe Lehrtätigkeit
  - Promotionen
- **Datenbank Publica**
  - Wissenschaftliche Veröffentlichungen

# 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  
 Kohlrusch-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  
 Kohlrusch-Bau  
 Max-Wien-Turm  
 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  
 Kösters-Bau  
 Kopfermann-Bau  
 v.-Laue-Bau  
 Paschen-Bau  
 Reinraumzentrum  
 Vieweg-Bau

## Abteilung 5

### Fertigungsmesstechnik

Abbe-Bau  
 Bessel-Bau  
 Bothe-Bau  
 Hauptwerkstatt  
 Kohlrusch-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  
 Kohlrusch-Bau  
 Vieweg-Bau  
 Zentralgebäude

## PÖ

Zentralgebäude

unterstrichen: Sitz Abteilungsleitung