

PTB

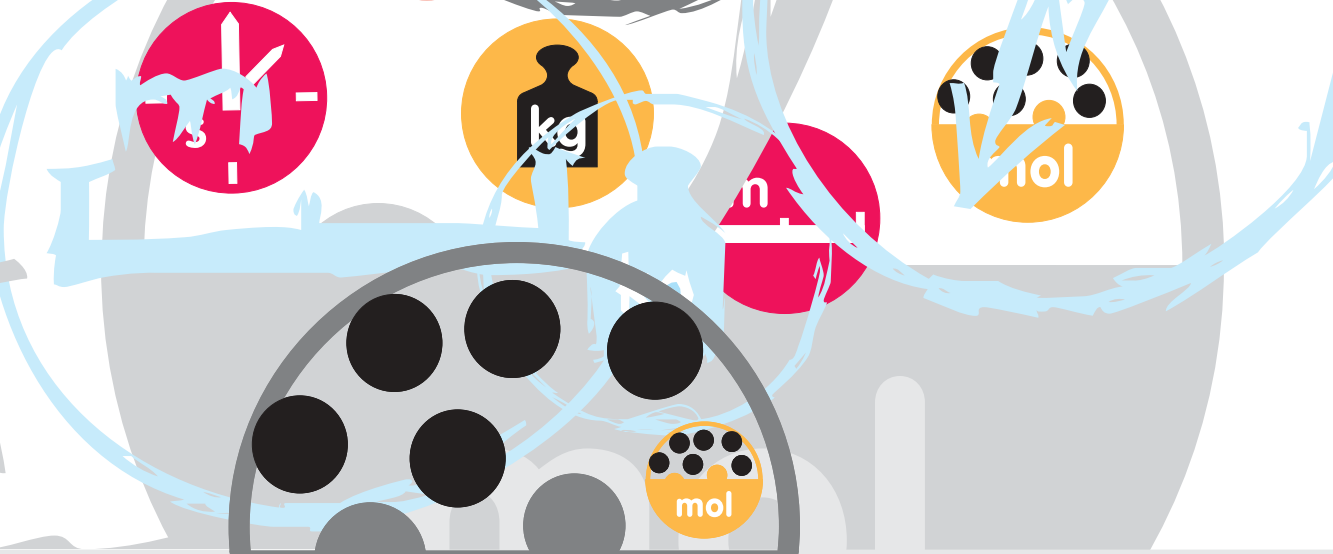
Annual Report

Jahresbericht

2005



die
PTB



Braunschweig
März 2006

ISSN 0340-4366

Vorwort

Im vergangenen Jahr richtete die Öffentlichkeit stärker als sonst ihre Aufmerksamkeit auf die Physik und die physikalische Technik. „The World Year of Physics“ und gleichzeitig das „Einstein-Jahr“ haben dafür gesorgt. Wir, die PTB, haben uns dabei vielfältig eingebracht und engagiert – eine intensive Zeit für unsere Öffentlichkeitsarbeit. So drehte sich vieles um Einstein, angefangen mit dem Sonderheft der PTB-Mitteilungen zum Thema „Metrologische Spuren Einsteins“ über die „Einstein-Ausstellung“ im Hermann-von-Helmholtz-Bau unseres Berliner Instituts bis hin zur Unterstützung diverser Einstein-Ausstellungen mit Exponaten und Postern zu Atomuhren. Das Thema Zeit war uns im letzten Jahr auch eine eigene Ausstellung wert: Punktgenau 50 Jahre nach dem Beginn des Zeitalters der Cäsiumatomuhren haben wir im Braunschweigischen Landesmuseum die von uns konzipierte und gestaltete Dauer Ausstellung „Rezept für eine Atomuhr“ eröffnet – mit der für den Wissenschaftsbetrieb ausgemusterten primären PTB-Uhr CS4 im Zentrum. Unsere Atomuhren haben im letzten Jahr allerdings nicht nur die Braunschweiger Öffentlichkeit überzeugt, sondern auch die Jury, die im Auftrag von Bundesregierung und deutscher Wirtschaft „365 Orte im Land der Ideen“ auswählen durften. Bei dieser Image- und Standortinitiative für Deutschland ist die PTB zum Ende der Sommerzeit im Oktober 2006 mit einer „Langen Nacht der Zeit“ vertreten. Damit aber noch nicht genug in Sachen Öffentlichkeitsarbeit. Hinzu kamen im letzten Jahr unsere neuerliche Teilnahme an der „Langen Nacht der Wissenschaften“ in Berlin, ein Schülertag in Braunschweig und anschließend wieder ein „Tag der offenen Tür“ – mit einer Rekordbesucherzahl. Dar-

über hinaus hatten wir im letzten Jahr mehrere hundert Wirtschaftsvertreter aus der Stadt und Region Braunschweig zum „Unternehmergespräch“ auf Einladung des Oberbürgermeisters zu Gast. Dies alles sowie die inzwischen schon etablierten Publikationen PTBnews und maßstäbe verdeutlichen der Öffentlichkeit und nicht zuletzt den Entscheidungsträgern in der Politik die Arbeit der PTB und vermitteln die Qualität und die Bedeutung dieser Arbeit für Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft.

Dieser Jahresbericht zieht, so ist es seine Aufgabe, Bilanz. Mit den „Nachrichten des Jahres“, den „Zahlen und Fakten“ sowie den Abteilungsberichten gibt er einen vertieften Einblick in unsere Arbeit, die sich, wie ich finde, wieder sehen lassen kann. Unser Blick allerdings ist nach vorne gerichtet. Das Jahr 2006 wird wieder Veränderungen und neue Herausforderungen mit sich bringen. Einige davon sind bereits jetzt vorher- und absehbar: Die Implementierung der Europäischen Messgeräte Richtlinie (MID), die unser bewährtes Eichsystem ablösen wird, gehört ebenso dazu wie etwa unsere avisierten experimentellen Beiträge zur angekündigten Neudefinition der SI-Einheiten Kilogramm, Ampere, Kelvin und Mol. Angesichts der Leistungen unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bin ich mir sicher, dass wir auch unter zunehmend schwierigen Randbedingungen unsere Mission, für Fortschritt und Zuverlässigkeit im Messwesen zu sorgen, weiterhin erfüllen werden.

Ernst O. Göbel



Foreword

In the past year, the public has directed its attention more strongly than ever towards physics and physical engineering. "The World Year of Physics" and at the same time the "Einstein Year" have ensured this. We, the PTB, have involved ourselves here in manifold ways – an intensive time for our public relations. Thus many things were centred around Einstein, beginning with the special edition of the PTB-Mitteilungen on the topic "Einstein's Metrological Tracks", over the "Einstein Exhibition" in the Hermann-von-Helmholtz building of our Berlin Institute, to the contribution of exhibits and posters on atomic clocks to various Einstein exhibitions. The subject "time" was deemed worthy of having its own exhibition this past year: Exactly 50 years after commencement of the era of caesium atomic clocks we have in the Braunschweigisches Landesmuseum (State Museum of Braunschweig) opened the permanent exhibition "Recipe for an Atomic Clock" conceived and designed by us – with the primary PTB clock CS4, discharged from scientific operation, in its centre. Our atomic clocks have in the past year not only convinced the Braunschweig public, but also the jury which by order of the federal government and the German economy was asked to select "365 places in the country of ideas". Through this image and location initiative for Germany, the PTB is represented in October 2006, at the end of Central European Summer Time, with a "Long Night of Time". But that's not yet all regarding public relations. There were in addition in the past year our renewed participation in the "The Long Night of the Sciences" in Berlin, a Pupil Day in Braunschweig, followed again by an "Open Day" – with a record number of visitors. Moreover, in the past year we have had several hundred

economic representatives from the city and region of Braunschweig as guests for the "Business Talks" at the invitation of the Mayor. All of this as well as the publications PTBnews and maßstäbe, established meanwhile, make the work of PTB clear to the public and last but not least to the political decision-makers, and convey the quality and importance of this work for economy, science and society.

This Annual Report takes stock, as is its task. Through the "News of the year", the "Figures and facts" as well as the reports of the divisions, it provides a deep insight into our work, which, as I find, can indeed again present itself. Our view is directed forwards, however. The year 2006 will again bring changes and new challenges. Some of them are already now predictable and foreseeable: The implementation of the European Measuring Instruments Directive (MID), which will replace our proven and tested verification system, is to be included here as well as our announced experimental contributions to the envisaged redefining of the SI units kilogram, ampere, kelvin and mole. In view of the achievements of our staff members, I am certain that even under increasingly difficult ancillary conditions we will continue to fulfil our mission for progress and reliability in metrology.

Ernst O. Göbel

Inhaltsverzeichnis

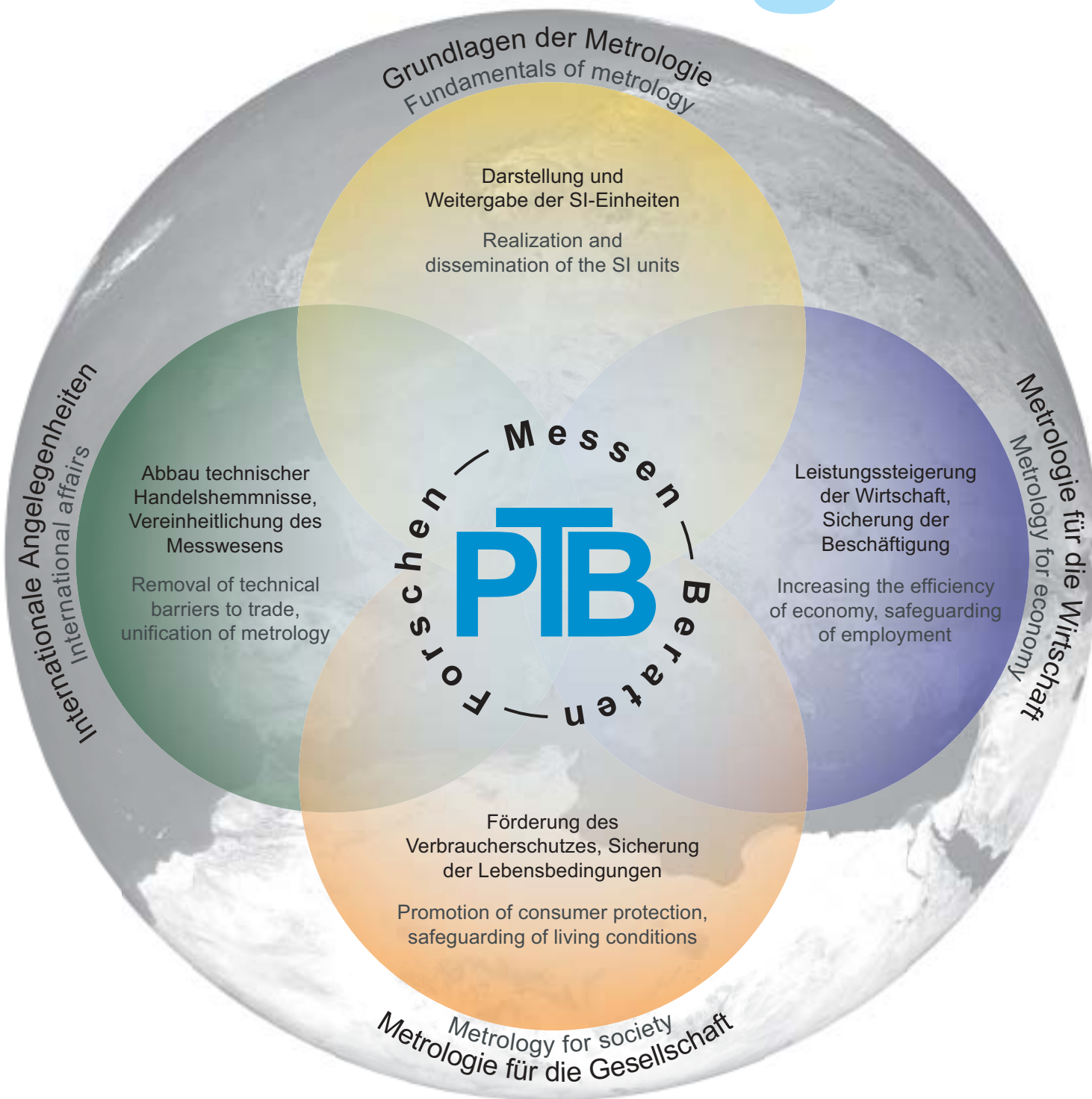
Vorwort • Foreword

Die PTB	5
Arbeitsgebiete und Ziele • Fields of work and objectives	6
Nachrichten des Jahres • News of the year	16
Zahlen und Fakten • Figures and facts	36
Die Abteilungen	46
Mechanik und Akustik	47
Elektrizität	61
Chemische Physik und Explosionsschutz	73
Optik	85
Fertigungsmesstechnik	99
Ionisierende Strahlung	111
Temperatur und Synchrotronstrahlung	123
Medizinphysik und metrologische Informationstechnik	135
Wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben	149
Der Deutsche Kalibrierdienst	157
Qualitätsmanagement	158
Die Anlagen	160
Kuratorium	161
Organigramm	162
Organisatorisches	164
Jahresbericht im Internet	165
Geländepläne	166



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 66 %.

The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) – the national metrology institute 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 frontiers. 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 firm, 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 the international level. Research work and the technological development serve to accomplish this task with competence and a sense of responsibility.

The share of research and development in the four areas of work of the PTB represented opposite has been 66 % in the last 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. Aber auch bei der Darstellung von Einheiten auf der Basis klassischer Prinzipien, z. B. für die dimensionelle Messtechnik, steigen die Anforderungen an die tolerierbaren Unsicherheiten stetig, so dass Technologien verbessert bzw. neu entwickelt und genutzt werden müssen. Zunehmende Bedeutung gewinnt die Rückführung von Messungen in der analytischen und speziell klinischen Chemie auf international anerkannte Normale oder Normalmesseinrichtungen, die für ausgewählte organische und anorganische Analyte in der PTB und ihren Kooperationspartnern (BAM, UBA, DGKL) entwickelt bzw. betrieben werden. Von besonderer gesellschaftlicher Bedeutung ist die Entwicklung von Normalen und Normalmesseinrichtungen für die medizinische Diagnostik und Therapiekontrolle, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung, die Ultraschall-Diagnostik oder optische, bioelektrische, biomagnetische und NMR-Diagnoseverfahren.

Insbesondere aus Sicht moderner Fertigungstechnik gewinnt das Gebiet der Nanometro-

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 “the provision of 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 to 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. 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.

Especially for modern production engineering, the field of nanometrology increasingly gains 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

logie zunehmend an Bedeutung, wobei dies nicht nur die quantitative dimensionelle Vermessung von Mikro- oder Nanostrukturen mit Auflösung 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 oder die Entwicklung von Elementen und Schaltungen für die Quanten-Informationstechnologie.

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, Frequenzstandards für künftige optische Atomuhren, verbesserter Normale für die Photometrie, der Dosimetrie ionisierender Strahlung bis zu der Realisierung der Temperaturskala bei sehr tiefen und sehr hohen Temperaturen.

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.

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.

Owing to the work of the PTB, the development and manufacture of voltage standards on the basis of superconductors (Josephson effect) has made significant progress. Due to successful technology transfer, new challenges could be taken up such as the development of programmable voltage standards or of elements and circuits for quantum information technology.

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.

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.

Immer mehr deutsche Firmen setzen diese Forderung konsequent in ihre Praxis um, indem sie entweder selbst DKD-akkreditierte Laboratorien für die Kalibrierung ihrer Betriebsnormale eingerichtet haben bzw. in weiter steigender Zahl einrichten (im Jahr 2005 wurde die Zahl von 370 DKD-akkreditierten Laboratorien überschritten) oder die Kalibrierdienstleistungen durch Aufträge an DKD-Laboratorien vergeben.

Wissenschaft und Wirtschaft enger zu verzahnen ist eine politische Forderung, welche die PTB ernst nimmt. Bei allen Forschungs- und Entwicklungsergebnissen prüft die PTB, ob diese auch als Schutzrechte, Patente bzw. Gebrauchsmuster oder durch Know-how-Verträge für eine Vermarktung durch Innovationen in Anspruch genommen werden sollen.

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.

An ever increasing number of German companies consistently put this requirement into practice either by having DKD-accredited laboratories of their own for the calibration of their working standards or by increasing their number (in 2005, a total number of 370 DKD laboratories was exceeded), or by entrusting DKD laboratories with the calibration.

To interlink science and economy more closely is a political demand the PTB takes seriously. Whenever research and development results are obtained, the PTB checks whether they can be used as property rights, patents or registered designs or through know-how agreements for marketing innovations.

Seminars and symposia dealing with the scientific and technical development of important fields of work of PTB play an important role in the transfer of know-how from PTB to German economy. On the 14th of November 2005, for example, the 212th PTB seminar "Metrology closely related with the production process in automotive

Eine wichtige Rolle im Knowhow-Transfer von der PTB in die deutsche Wirtschaft übernehmen Seminare und Fachtagungen, die die wissenschaftlich-technische Entwicklung wichtiger Arbeitsgebiete der PTB zum Thema haben. So wurde am 14. November 2005 in Braunschweig mit 70 Teilnehmern aus Wissenschaft und Forschung das 212. PTB-Seminar „Produktionsnahe Messtechnik im Automobilbau“ durchgeführt, das als Auftaktveranstaltung zur 7. VDI/VDE-Fachtagung „Koordinatenmesstechnik“ diente. Die wissenschaftliche Tagungsleitung beider Veranstaltungen lag in den Händen des Fachbereichs „Koordinatenmesstechnik“ der PTB. Dabei konnte die PTB die Entscheidung für den Bau eines neuen Größtgerätes zum Test von Koordinatenmessgeräten unter industriellen Umgebungsbedingungen bekannt geben. Im Jahr 2007 soll auf dem PTB-Gelände ein Neubau zum Betrieb einer Simulationskammer errichtet werden, mit der unter anderem Koordinatenmessgeräte unter realistischen industriellen Einsatzbedingungen metrologisch untersucht werden können. Diese einzigartige Einrichtung wird dazu dienen, den hohen Stand der Fertigungsmesstechnik in der PTB weiter auszubauen.

engineering“, which served as an introducing event to the 7th VDI/VDE symposium “Coordinate Metrology“, was realized in Braunschweig with 70 participants from science and research. The PTB’s “Coordinate Metrology“ Department was responsible for the scientific direction of both events. On that occasion, PTB could disclose the decision to construct a new very large device for the testing of coordinate measuring machines under industrial environmental conditions. In 2007, a new building for the operation of a simulation chamber will be constructed on the PTB premises, which will allow – among other things – coordinate measuring machines to be metrologically investigated under realistic industrial conditions of use. This unique facility will serve to further develop the high level of industrial metrology at PTB.

Metrologie für die Gesellschaft

In weiten Bereichen des täglichen Lebens besteht ein besonderes öffentliches Interesse an richtigen Messergebnissen und zuverlässigen Messeinrichtungen. In diesem Geschäftsbereich ist es 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 noch die Bauartzulassung bzw. Prüfung von Messgeräten im Rahmen nationaler oder europäischer Rechtsvorschriften (im Wesentlichen: Eichgesetz), 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. Eine Novellierung dieses Gesetzes ist aufgrund der Umsetzung der Europäischen Messgeräterichtlinie für 2006 in Vorbereitung, zu der die PTB maßgeblich beiträgt, um der Industrie auch künftig das erforderliche Konformitätsbewertungsverfahren anbieten zu können.

Der Erhalt bzw. die Wiederherstellung der Gesundheit der Bürger ist ein elementares Bedürfnis der Gesellschaft. Die PTB ist gemäß Medizinproduktegesetz zuständig für die Sicherstellung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Medizin. Sie leistet hierzu durch die Bereitstellung eines hochentwickelten 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 Normalmeseinrichtungen, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender

Metrology for society

In wide areas of everyday life, the public has a great interest in correct measurement results and reliable measuring facilities. In this area, 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 focus in this area still is the type approval and examination of measuring instruments under national or European law (basically: Verification Act), 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.).

PTB performs most of the type approvals on the basis of the Verification Act. In view of the implementation of the European Measuring Instruments Directive in 2006, an amendment of this Act is under preparation. PTB will considerably contribute to this Directive to be able to continue offering the required conformity assessment procedure to industry also in future.

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 system. This contribution encompasses not only the development of new, or the improvement of existing, measurement methods for diagnostics and therapy control and the production of standards and standard measuring devices, for example for the dosimetry of ionizing radiation, ultrasound diagnostics, medical devices with a measuring function but also activities to trace back analytical measurements in the field of clinical chemistry to the SI units and the mole in particular.

der Strahlung, die Ultraschall-Diagnostik, für medizinische Geräte mit Messfunktion sowie durch Arbeiten zur Rückführung von analytischen Messungen in der klinischen Chemie auf die SI-Einheiten, insbesondere auf das Mol.

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 Metrologie für die Gesellschaft umfasst überwiegend Aufgaben, die gesetzlich geregelt sind. In etwa 30 Gesetzen und Verordnungen sind der PTB verschiedene Tätigkeiten zugewiesen. Die besondere Verantwortung der PTB ergibt sich dadurch, dass sie in den meisten dieser Rechtsvorschriften als einzige Stelle genannt ist.

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.

Zur Beratung der Ministerien hat die PTB im Jahr 2005 ein Positionspapier mit Vorschlägen zur Modernisierung des gesetzlichen Messwesens vorgelegt, in dem auch Wege zur weiteren Privatisierung technischer Aufgaben unter besonderer Berücksichtigung der Bundeseinheitlichkeit aufgezeigt werden. Diese Unterstützung der Ministerien erstreckt sich auch auf die Neuordnung des Anerkennungs- und Akkreditierungswesens, das durch ein Bundesgesetz geregelt werden soll.

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 the national and on the international level.

Metrology for society mainly covers tasks which are regulated by law. In about 30 acts and ordinances, different activities are assigned to the PTB. The particular responsibility of the PTB derives from the fact that in most of these legal prescriptions, the PTB is the only body mentioned.

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.

As regards advice to ministries, PTB has in 2005 submitted a position paper with proposals for the modernization of legal metrology which also contains suggestions for further assigning public technical tasks to private bodies with due regard to uniformity throughout the country. This support of the ministries also covers the reorganization of the recognition and accreditation system which is to be regulated by a federal law.

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 in jüngster Zeit abgeschlossenen 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 verabschiedet worden. Bis zum Wirksamwerden im Jahr 2006 unterstützt die PTB die Wirtschaft mit bilateralen Abkommen.

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. Dies gilt weltweit und insbesondere für Europa.

Die PTB wird bei der Entwicklung und Gestaltung der europäischen und globalen Metrologie weiter eine führende Rolle einnehmen und ihre Erfahrungen aus den nationalen Netzwerken einbringen. Dabei werden die

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 the export-oriented German measuring instrument industry. With these objectives, the PTB actively cooperates in the OIML and in the WELMEC. In 2003, an international Mutual Acceptance Arrangement (MAA) for type approvals was adopted. Until it becomes effective in 2006, PTB will support economy by bilateral agreements.

The requirements to be met by metrology will in future continuously increase as regards their scope and complexity so that an individual institute in the long run cannot satisfy all demands. Coordination and cooperation as regards research and development are therefore indispensable. This is valid worldwide and particularly for Europe.

The PTB will continue to play a leading role in the development and shaping of the European and global metrology system and profit from the experience it has gained in national networks. The plans of the European Commission for the shaping of the European

Pläne der Europäischen Kommission zur Gestaltung der europäischen Forschungslandschaft einbezogen und umgesetzt.

Die PTB arbeitet 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 2005 war sie in 377 Vorhaben eingebunden. Die PTB sieht dies als wichtige 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 15 Länder in vier Kontinenten durch 17 bilaterale Projekte beim Aufbau ihrer MNPQ-Infrastruktur unterstützt. Weitere Länder profitieren von insgesamt neun regionalen und sektoralen Projekten. Der finanzielle deutsche Beitrag betrug ca. 4 Mio. Euro.

research landscape will be included and put into practice.

The PTB is substantially involved in all international metrology organizations, for a considerable part in leading functions. 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 makes also a substantial contribution to international standardization by cooperating in bodies of ISO, IEC, CEN and CENELEC. In 2005, it was integrated in 377 projects. The PTB sees this as an important task in the service of 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 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, 15 countries in four continents have been supported in the establishment of their MSTQ structure by 17 bilateral projects. Additional countries profit from a total of nine regional and sectoral projects. The financial contribution of Germany amounted to 4 million Euro.

Nachrichten

Akkumulation einer wägbaren Masse von Wismut-Ionen

Mit dem PTB-Experiment Ionenakkumulation, das die atomare Masseneinheit experimentell bestimmen soll, konnte erstmalig eine wägbare Masse von 40 mg Wismut-Ionen akkumuliert werden. Mit einem neu entwickelten Verdampferofen für die kommerzielle Ionenquelle und einer ersten Kollektorversion wurden Ionenströme von bis zu 2,5 mA am Kollektor gemessen.

Es wurden mehrere Versuche durchgeführt, in denen jeweils etwa 7 mg, 28 mg und 40 mg aufgesammelt und mit der Vakuumwaage gewogen wurden. Die Zerstäubungsverluste wurden durch Schichtdickenmessungen an der Rückseite der Eintrittsblende des Kollektors ermittelt. So konnte die atomare Masseneinheit erstmalig mit einer relativen Abweichung vom CODATA-Wert von etwa $9 \cdot 10^{-4}$ experimentell ermittelt werden. Die relative Unsicherheit der Wägung betrug $5,2 \cdot 10^{-4}$, die der Ladungsmessung $7,3 \cdot 10^{-6}$. Die Untersuchungen zur Ermittlung der Unsicherheit für die Zerstäubungsverluste dauern noch an.

Die technischen Neuerungen des Experiments, welche die jetzigen Ergebnisse ermöglichen, betreffen u. a. den Ionenquellenofen. Ein genügend hoher Dampfdruck für Wismut bis zu Temperaturen von 1000 °C kann nun über mehrere Stunden aufrecht erhalten werden. Darüber hinaus wurde die Strahlführung für eine maximale Wismut-Transmission optimiert und die früher verwendete magnetische Quadrupollinse aus der Strahlführung entfernt. Dadurch konnte eine Transmission von etwa 50 % für Wismut erzielt werden.

Experimenteller Aufbau zur Ionenakkumulation

Experimental set-up for ion accumulation

Accumulation of a weighable mass of bismuth ions

The PTB's ion accumulation experiment, which is aimed at determining the unit of the atomic mass by experiment, for the first time allowed a weighable mass of 40 mg bismuth ions to be accumulated. With the aid of a newly developed evaporator oven for the commercial ion source and a first collector version, ionic currents of up to 2.5 mA were measured at the collector.

Several tests were performed in which approx. 7 mg, 28 mg and 40 mg were collected and weighed with the vacuum balance. The evaporation losses were determined by layer thickness measurements on the back of the collector's entrance aperture. This allowed the unit of the atomic mass to be experimentally determined for the first time with a relative deviation from the CODATA value of approx. $9 \cdot 10^{-4}$. The relative uncertainty of the weighing process amounted to $5.2 \cdot 10^{-4}$, that of the charge measurement to $7.3 \cdot 10^{-6}$. The investigations into the uncertainty of the evaporation losses have not yet been completed.

The technical innovations of the experiment which made the present results possible, relate among other things to the ion source oven. A sufficiently high vapour pressure for bismuth up to temperatures of 1000 °C can now be maintained for several hours. In addition, beam guiding was optimized for maximum bismuth transmission and the

formerly used magnetic quadruple lens was removed from the beam guidance. This allowed a transmission of approx. 50 % to be achieved for bismuth.



Temporekord bei der Programmierung magnetischer Speicherchips

Ein in der PTB entwickeltes und mittlerweile patentiertes Verfahren macht magnetische Speicherchips (MRAM) jetzt genauso schnell wie die schnellsten herkömmlichen digitalen Speicherbauteile (SRAM).

In einem MRAM wird die digitale Information nicht, wie in den heute üblichen Speicherchips, in Form elektrischer Ladungen gespeichert, sondern über die Orientierung der Magnetisierung in magnetischen Zellen. Dadurch kann ein MRAM die Daten nichtflüchtig speichern – die Informationen bleiben auch bei Ausschalten der Stromversorgung erhalten. Dies bietet beträchtliche Vorteile, weil zum Beispiel der zeitaufwendige Systemstart von Rechnern umgangen werden kann, auch wenn die aktuellen MRAM-Prototypen noch nicht mit den schnellsten flüchtigen SRAM-Speichern mithalten können.

Ein schnellerer MRAM-Betrieb wurde bislang durch magnetische Anregungen verhindert, die während des Schreibvorgangs entstehen und nur langsam abklingen. Ein neu entwickeltes MRAM-Programmierverfahren ermöglicht es nun, diese magnetischen Anregungen während des Schreibvorgangs weitestgehend zu unterdrücken. Durch diese sogenannte „Ballistische Bitansteuerung“ ist der Schreibvorgang in weniger als 500 ps abgeschlossen, und MRAM-Chips mit Taktzeiten von mehr als 2 GHz sind möglich.

MRAM aus einer Matrix aus magnetischen Speicherzellen (grün) und gekreuzten Leiterbahnen zum Programmieren (gelb bzw. rot). Durch einen Strompuls durch zwei Leiterbahnen (rot) wird die Zelle am Kreuzungspunkt programmiert.

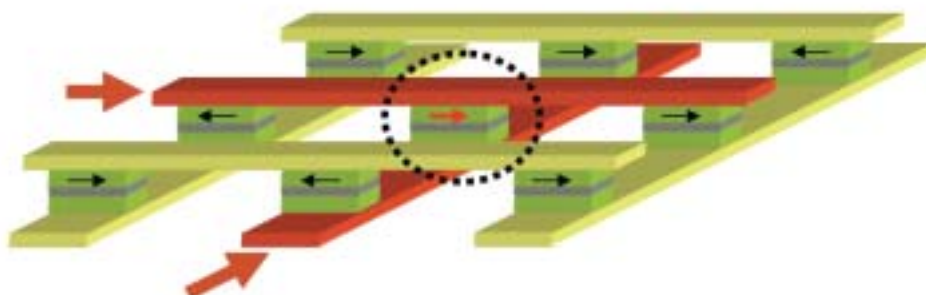
Speed record in the programming of magnetic storage chips

A procedure developed at PTB which has meanwhile been patented, now makes magnetic storage chips (MRAM) as fast as the fastest conventional digital storage components (SRAM).

In a MRAM, digital information is not stored in the form of electrical charges as in today's storage chips, but via the orientation of magnetization in magnetic cells. By this, a MRAM can store the data in a non-volatile way – i.e. the information is preserved even when the power supply is switched off. This offers considerable advantages. The system start of computers, for example, which is rather time-consuming, can be avoided although the present MRAM prototypes cannot yet keep up with the fastest volatile SRAM storage units.

Fast MRAM operation has so far been prevented by magnetic excitations which are caused during the writing process and decay only slowly. A newly developed MRAM programming procedure now allows these magnetic excitations to be largely suppressed during the writing process. This so-called “ballistic bit triggering” allows the writing process to be concluded in less than 500 ps, and MRAM chips with clock rates of more than 2 GHz are possible.

MRAM from a matrix of magnetic storage cells (green) and crossed conducting tracks for programming (yellow or red). A current pulse through two conducting tracks (red) programs the cell at the cross-over point.



Raman-Spektroskopie: Neues primäres Messverfahren für die Chemie

Die Entwicklung und Etablierung neuer Messverfahren zur Realisierung von Primärnormalen zählt auch im Bereich der Metrologie in der Chemie zu den zentralen Forschungsaufgaben. Als besonders geeignet erscheint aufgrund ihrer Empfindlichkeit und Spezifität die oberflächenverstärkte Ramanstreuung (Surface-Enhanced Raman Scattering, SERS), die, analog zur Massenspektrometrie, auch in Kombination mit isotopenmarkierten internen Standards eingesetzt werden kann.

Ausschlaggebend für die Anwendung der Isotopenverdünnung ist ein massenabhängiger Isotopeneffekt, der zu einer Wellenzahlverschiebung einzelner charakteristischer Schwingungsbanden eines Moleküls führt. Die Auswertung beschränkt sich somit auf die Bestimmung von Intensitätsverhältnissen anstelle von absoluten Signalintensitäten. Ein derartiges Verhältnisverfahren ist für metrologische Zwecke von besonderem Interesse, da z. B. Materialverluste und Matrixeffekte, die beide Isotopomere eines Analyten gleichermaßen betreffen, das Resultat nicht beeinflussen.

Das Verfahren wurde am Beispiel der Konzentrationsbestimmung von Kreatinin im Blutserum entwickelt und validiert. Die dabei erzielten Resultate sind, nach einer ersten Abschätzung, mit Unsicherheiten von etwa 3 % behaftet. Eine Übertragbarkeit des Verfahrens auf höhermolekulare Verbindungen, z. B. Proteine, wird derzeit untersucht.

Raman spectroscopy: new primary measuring method for chemistry

The development and establishment of new measuring methods for the realization of primary standards is one of the central research tasks of metrology, also in the field of chemistry. Due to its sensitivity and specificity, surface-enhanced Raman scattering (SERS), which – analogous to mass spectrometry – can also be used in combination with isotopically labelled internal standards, seems to be especially suited.

Decisive for the application of isotopic dilution is a mass-dependent isotope effect which leads to a wavenumber shift of individual characteristic vibration bands of a molecule. Thus the analysis requires only the determination of intensity relations instead of absolute signal intensities. Such a ratio method is of special interest for metrological purposes since e.g. material losses and matrix effects, which affect both isotopomers of an analyte equally, do not have an influence on the result.

The method was developed and validated using the example of the determination of the creatinine concentration in blood serum. According to a first estimate, the results thus obtained show an uncertainty of measurement of approx. 3 %. Transferability of the method to higher molecular compounds, e.g. proteins, is being investigated.

Erster ^{28}Si -Testkristall erreicht 99,99 % Anreicherung

Im Rahmen des internationalen Avogadro-Projekts wurde der erste Probekristall mit einer Masse von mehr als 400 g und einer Isotopenreinheit von mehr als 99,99 % für Testmessungen an die PTB ausgeliefert. An der Herstellung waren folgende Institute beteiligt: Das Zentralbüro für Zentrifugentechnik des Russischen Atomministeriums in St. Petersburg (Herstellung und Anreicherung des SiF_4 -Gases), das Institut für hochreine Materialien in Nishni-Novgorod (Umwandlung in SiH_4 -Gas, chemische Reinigung und Abscheidung eines Polykristalls) und das Institut für Kristallzüchtung in Berlin (Züchtung des Si-Einkristalls mittels Zonenreinigungsverfahren). Die für eine weitere Verwendung des Materials zur Kugelherstellung notwendige chemische Reinheit wurde nach mehreren Zonenzügen erreicht. Im Fachbereich „Metrologie in der Chemie“ wurden für die Fremdatomkonzentrationen mittels Infrarot-Spektrometrie folgende Werte ermittelt: für Kohlenstoff $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, für Sauerstoff $4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ und für Bor $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Der Anteil von mehr als 99,99 % ^{28}Si im Kristall, bestimmt am Institut für Referenzmaterialien und Messungen der EU in Geel, liegt über dem vereinbarten Wert. Diese Anreicherung konnte während des gesamten Produktionsprozesses aufrecht erhalten werden. Damit ist es erstmals gelungen, einen perfekten Silicium-einkristall isotopisch und chemisch rein herzustellen.

^{28}Si -Einkristall,
Anreicherungsgrad
99,991 %

First ^{28}Si test crystal reaches 99.99 % enrichment

Within the scope of the international Avogadro project, the first test crystal with a mass of more than 400 g and an isotopic purity of more than 99.99 % was handed over to PTB for measurements. The following institutes were involved in its production: Central Office for Centrifuge Development of the Russian Nuclear Ministry in St. Petersburg (production and enrichment of the SiF_4 gas), Institute for Ultrapure Materials in Nishni-Novgorod (conversion into SiH_4 gas, chemical purification and chemical vapour deposition of a polycrystal) and Institute for Crystal Growth in Berlin (Si single crystal growing by means of a floating-zone purification method). The chemical purity required

for further use of the material for the sphere production was achieved after several floating-zone runs. In PTB's Metrology in Chemistry department, the following values were determined for the impurity concentrations by infrared spectrometry: $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ for carbon, $4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ for oxygen and $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ for boron. The Si fraction of more than 99.99 % ^{28}Si in the crystal which was determined at the Institute for Reference Materials and Measurements of the EU in Geel, lies above the agreed value. This enrichment could be maintained during the whole production process. It has thus been possible for the first time to grow a perfect silicon single crystal, isotopically and chemically pure.

^{28}Si single crystal,
degree of enrichment
99.991 %



Hintergrundfreie chemische Bildgebung

Die nichtlineare Mikroskopie auf Basis der kohärenten Anti-Stokes-Raman-Streuung (CARS) ist ein hochauflösendes molekülspezifisches Bildgebungsverfahren zur Untersuchung biologischer und technischer Proben. Durch eine in der PTB entwickelte neuartige Detektionsmethode konnte die bei der CARS-Mikroskopie auftretende Kontrastminderung durch Hintergrundsignale erfolgreich unterdrückt werden.

Dieses so genannte „gated heterodyne CARS“ (GH-CARS)-Verfahren stellt eine neue Anwendung phasenkohärenter Femtosekunden-Superkontinua dar. Es nutzt neben der Ramanverschiebung die molekülspezifische Schwingungs-Dephasierungszeit als Kontrastmechanismus. Gemeinsam mit der Gruppe von Prof. Eberhard Riedle, LMU München, konnte hiermit eine Steigerung des Signal-Hintergrund-Verhältnisses um einen Faktor >100 gezeigt werden.

Nun wurde das Konzept erfolgreich zur kontrastverbesserten CARS-Mikroskopie angewendet. Als Probe dienten 10- μm Polystyrolkugeln in Wasser, das auf Grund seiner breiten Raman-Banden starke Hintergrundsignale liefert. Diese konnten durch die GH-CARS-Technik signifikant unterdrückt werden.

Mittels GH-CARS-Mikroskopie könnte man beispielsweise mikroskopische Benzoltröpfchen im Grundwasser abbilden, wobei wegen der hohen Frequenzselektivität sogar verschiedene Benzolderivate unterschieden werden könnten. Dies wäre mit konventionellen Licht- und CARS-Mikroskopen unmöglich.

CARS-Aufnahmen von 10- μm Polystyrolkugeln in Wasser ohne (a) und mit Einsatz des GH-CARS-Verfahrens (b). Unterhalb der Bilder sind die Intensitätsprofile entlang der durch die Pfeile definierten Linien gezeigt.

CARS images of 10- μm polystyrene spheres in water without (a) and with application of the GH-CARS procedure (b). Below the images, the intensity profiles along the lines defined by the arrows are shown.

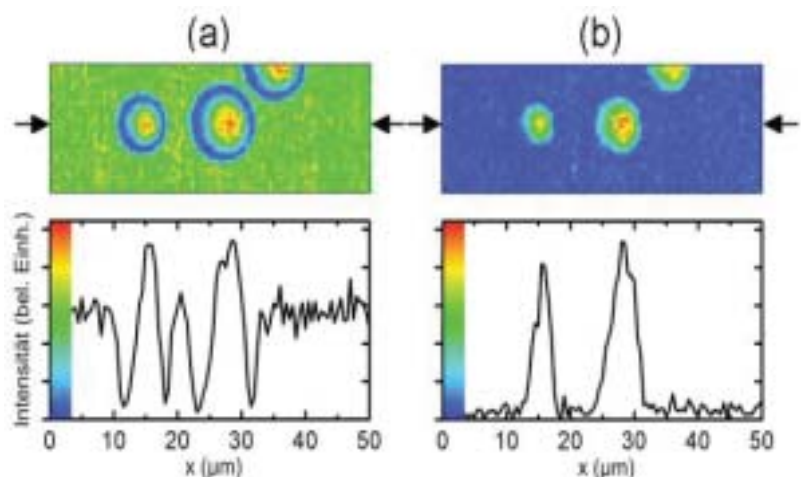
Background-free chemical imaging

Non-linear microscopy on the basis of coherent anti-stokes Raman scattering (CARS) is a high-resolution molecule-specific imaging procedure for the investigation of biological and technical samples. A novel detection method developed at PTB allows the contrast reduction which occurs in CARS microscopy due to background signals to be successfully suppressed.

This so-called “gated heterodyne CARS” (GH-CARS) procedure represents a new application of phase-coherent femto-second super continua. In addition to Raman displacement, it uses the molecule-specific oscillation de-phasing time as contrast mechanism. In cooperation with the group of Prof. Eberhard Riedle, LMU Munich, an increase in the signal-background ratio by a factor of >100 could be shown.

Now, the concept was successfully applied to contrast-improved CARS microscopy. 10- μm polystyrene spheres in water, which furnishes strong background signals due to its broad Raman bands, were used as sample. These signals could be significantly suppressed by the GH-CARS technique.

By means of GH-CARS microscopy, microscopic benzene droplets could, for example, be imaged in the ground water. Due to the high frequency selectivity, even a differentiation between different benzene derivatives would be possible. This would be impossible with conventional light and CARS microscopes.



Sub-Nanometer Reproduzierbarkeit an inkrementalen Längenmesssystemen

Inkrementale Längen- und Winkelmesssysteme ermöglichen eine präzise Positionierung und Bewegungssteuerung in modernen Fertigungssystemen. Die inkrementalen Messsysteme basieren auf dem Prinzip der optischen Abtastung eines Substrates mit aufgebrachtener Strichteilung. Bei Relativbewegung von Abtastkopf und Teilungsträger werden die periodischen Änderungen des Abtastsignals zur Positionsmessung verwendet. Höchste Anforderungen an solche Messsysteme werden z. B. in der Halbleiterfertigung gestellt: über Bereiche von mehreren 100 mm sind qualitativ hochwertige Positions-Messsignale mit hoher Auflösung und möglichst geringer Linearitätsabweichung für die schnelle Regelung der Bewegungsachsen bereitzustellen.

Im Rahmen eines internationalen Maßvergleiches an einem inkrementalen Messsystem mit einer Länge von 280 mm wurden Untersuchungen zur erzielbaren Reproduzierbarkeit der Längenmessungen vorgenommen. Die PTB-Messungen erfolgten dabei mit dem Nanometerkomparator. Bei mehreren Messreihen wurde hierbei eine Standardabweichung von 0,3 nm erzielt. Eine erste Analyse der Ergebnisse des Maßvergleiches mit zwei anderen Vakuum-Längenkomparatoren hat eine – weltweit bislang einmalige – Übereinstimmung innerhalb von $2 \cdot 10^{-8}$ ergeben. Hiermit ist der Leistungsstand des Nanometerkomparators für die Charakterisierung inkrementaler Messsysteme eindrucksvoll belegt.

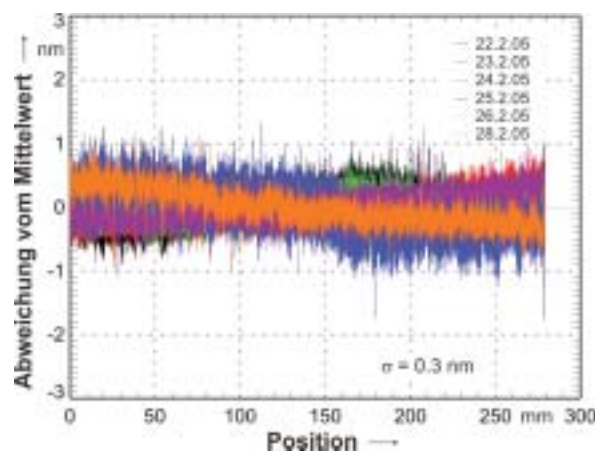
Reproduzierbarkeit der Längenmessungen mit dem Nanometerkomparator an einem inkrementalen Messsystem der Länge 280 mm. Gezeigt sind die Abweichungen vom Mittelwert aus mehreren Messreihen, bei denen Abtastkopf und Maßverkörperung nach jeder Messreihe neu justiert und um 180° gedreht wurden.

Reproducibility of the length measurements performed with the nanometer comparator on an incremental measuring system 280 mm in length. The figure shows the deviations from the mean value of several measurement series, in the case of which scanning head and artefact were readjusted after each measurement series and turned through 180° .

Sub-nanometer reproducibility on incremental length measuring systems

Incremental length and angle measuring systems allow precise positioning and motion control in modern production systems. The incremental measuring systems are based on the principle of optical scanning of a substrate with applied line scale. In the case of relative movements of scanning head and scale bearing strip, the periodic changes of the measuring signal are used for position measurement. Highest demands for such measuring systems are, for example, made in semiconductor production: over ranges of several 100 mm, position measuring signals of high quality are to be made available with high resolution and as low a linearity deviation as possible for fast control of the axes of motion.

Within the scope of an international comparison on an incremental measuring system 280 mm in length, investigations were performed into the achievable reproducibility of length measurements. The PTB measurements were carried out with the nanometer comparator. In several measurement series, a standard deviation of 0.3 nm was obtained. A first analysis of the results of the comparison with two other vacuum length comparators has shown a – worldwide so far unique – agreement within $2 \cdot 10^{-8}$. This has impressively confirmed the level of proficiency of the nanometer comparator for the characterization of incremental measuring systems.



Neues Primärnormal für die Wasser-Energiedosis

Die PTB betreibt eine neue Primärnormal-Messeinrichtung für die Darstellung der Einheit Gray (Gy) der Wasser-Energiedosis, DW, für ^{60}Co -Gammastrahlung. Ein Wasserkalorimeter löst das bisherige, seit rund 25 Jahren eingesetzte Normal ab, welches auf der Totalabsorption der ionisierenden Strahlung in Eisensulfatlösung basierte. Durch den Übergang wurde die relative Standard-Messunsicherheit von früher 0,5 % auf 0,2 % reduziert.

Da die zu messende strahlungsinduzierte Temperaturerhöhung am Messort innerhalb eines Wasserphantoms mit ca. 0,24 mK pro Gy sehr gering ist und das Kalorimeter bei einer Wassertemperatur von 4 °C betrieben wird, ergeben sich hohe Anforderungen sowohl an die Messtechnik als auch an die Temperaturstabilisierung des Kalorimeters. Um geringe Standardmessunsicherheiten zu erzielen, wurden die Auswirkungen verschiedener Einflussgrößen, wie z. B. für Wärmeleitungseffekte oder des so genannten kalorischen Defektes, sorgfältig analysiert und korrigiert. Dies geschah mit Hilfe detaillierter experimenteller Untersuchungen für unterschiedliche Bestrahlungsbedingungen sowie auf Basis vergleichender Modellrechnungen zum Wärmetransport bzw. zur Radiolyse von Wasser.

Mit dem Beginn des Jahres 2006 wird die Kalibrierung von Sekundärnormalen für die Wasser-Energiedosis auf Basis des neuen Primärnormal durchgeführt. Dies führt zu einer Änderung der Kalibrierfaktoren um ca. 0,2 %.

Das Wasserkalorimeter (Sicht auf das Strahlungseintrittsfenster) vor der ^{60}Co -Bestrahlungsanlage der PTB

The water calorimeter (view onto the radiation entrance window) in front of the ^{60}Co irradiation facility of PTB

New primary standard for the water absorbed dose

PTB operates a new primary standard measuring device for the realization of the unit Gray (Gy) of the water absorbed dose, DW, for ^{60}Co gamma radiation. A water calorimeter replaces the standard used for almost 25 years which was based on the total absorption of ionizing radiation in ferric sulphate solution. By the transition, the relative standard uncertainty was reduced from formerly 0.5 % to 0.2 %.

As the radiation-induced temperature increase at the place of measurement is very small inside a water phantom (approx. 0.24 mK per Gy), and as the calorimeter is operated at a water temperature of 4 °C, very high requirements must be met by both the measuring technique and the temperature stabilization of the calorimeter. To achieve small standard uncertainties, the effects of different influence quantities such as, for example, thermal conduction effects or the so-called caloric defect, were carefully analyzed and corrected. This was done with the aid of detailed experimental investigations for different irradiation conditions as well as on the basis of comparative model calculations for heat transport and/or radiolysis of water.

Beginning with the year 2006, calibration of secondary standards for the water absorbed dose will be performed on the basis of the new primary standard. This will change the calibration factors by approx. 0.2 %.



Einsteins einziges Experiment

Anlässlich der zentralen Jahrestagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) wurde im Rahmen der Verleihung der DPG-Preise am 6. März 2005 im Hermann-von-Helmholtz-Bau des Instituts Berlin eine Ausstellung eröffnet, in der Einsteins einzige publizierte experimentelle Arbeit, durchgeführt 90 Jahre zuvor in der Berliner Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR), dokumentiert wurde.

Unmittelbar nach seiner Ankunft in Berlin im Jahr 1914 nutzte Einstein die hervorragenden experimentellen Möglichkeiten in der PTR und beobachtete zusammen mit seinem niederländischen Kollegen Johannes Wander de Haas die durch ein alternierendes Magnetfeld angeregte Drehschwingung eines kleinen Eisenzylinders. Er vermutete als Ursache des Magnetismus des Zylinders die magnetischen Momente der Elektronen im Zylindermaterial, als deren Ursache man die Ampèreschen Molekularströme annahm. Durch Ausrichten der Momente im Feld einer Spule konnten Einstein und de Haas den Zylinder in Drehung versetzen: der Einstein-de Haas-Effekt war gefunden und das so genannte "gyromagnetische Verhältnis" des Elektrons bestimmt. Die richtige Deutung identifiziert den Effekt heute als Wirkung des damals noch unbekanntenen Elektronenspins.

Das historische Experiment kann als originalgetreuer und funktionsfähiger Nachbau besichtigt und in Betrieb gesetzt werden. Es ist in der Ausstellung von anderen Beispielen historischer und moderner Messverfahren, die Eigenschaften von Elektronen nutzen, umrahmt.

Nachbau des historischen Einstein-de Haas-Experiments in der PTB



Einstein's only experiment

On the occasion of the central annual meeting of the Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG – German Physical Society) an exhibition was opened in the context of the awarding of the DPG prizes on 6 March 2005 in the Hermann von Helmholtz building of the Berlin Institute, in which Einstein's only publicized experimental work, carried out 90 years earlier in the Berlin Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR), was documented.

Immediately upon his arrival in Berlin in the year 1914, Einstein utilized the outstanding experimental opportunities in the PTR and observed, together with his Dutch colleague Johannes Wander de Haas the rotary oscillation of a small iron cylinder stimulated by means of an alternating magnetic field. The cause of the magnetism of the cylinder he conjectured to be the magnetic moments of the electrons in the cylinder material, the cause of which one assumed to be the ampere molecular currents. By aligning the moments in the field of a coil, it was possible for Einstein and de Haas to enable the cylinder to rotate: the Einstein-de Haas effect was discovered and the so-called "gyromagnetic ratio" of the electrons was determined. The correct interpretation today identifies the effect as the impact of the then still unknown electronic spin.

The historical experiment can be viewed and set into operation as a true-to-the-original and functional replica. It is framed in the exhibition by other examples of historical and modern measuring techniques which utilize the properties of electrons.

Replica of the historical Einstein-de Haas experiment in the PTB

Magnetische Resonanz im Nanoteslabereich

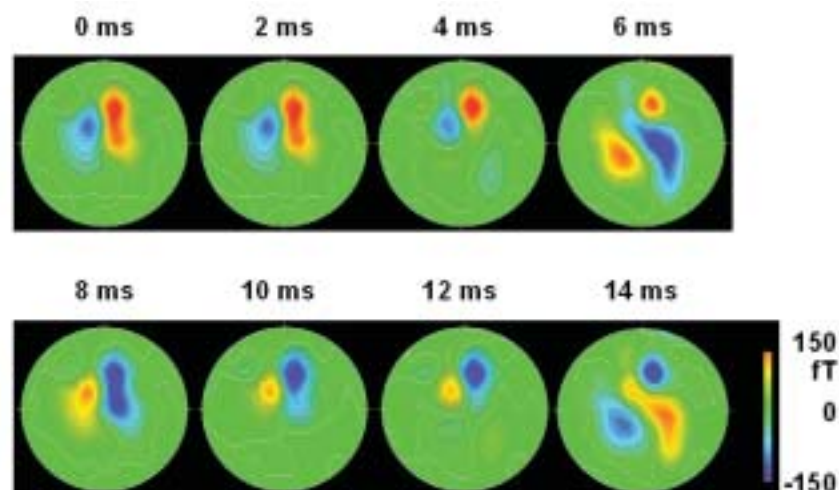
Die kernmagnetische Resonanz ist heute in der chemischen Analytik wie in der medizinischen Diagnostik ein unentbehrliches Hilfsmittel. Dabei werden üblicherweise statische Magnetfelder von mehreren Tesla Flussdichte eingesetzt. Mittels hoch empfindlicher supra-leitender Quanteninterferometer (SQUIDs) ist es möglich, die Präzession von Kernmomenten auch in sehr viel niedrigeren Feldern zu messen. Schwache Felder mit einer hinreichenden Homogenität lassen sich aber nur dann erzeugen, wenn das Erdmagnetfeld (~ 40 mT) effizient abgeschirmt wird. Im magnetischen Abschirmraum der PTB wurde so die Präzession von Wasserstoffkernen bei Flussdichten von 40 nT bis 4 mT gemessen. Dabei konnten die natürlichen Resonanzlinienbreiten verschiedener Substanzen (Wasser, Benzol, Chloroform) mit Werten um 0,1 Hz aufgelöst werden.

Für die medizinische Anwendung eröffnet der Einsatz schwacher Felder neue Anwendungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel die gleichzeitige Darstellung von Anatomie und Hirnfunktionen.

Magnetic resonance in the nanotesla range

Nuclear magnetic resonance is an indispensable tool today in chemical analysis and also in medical diagnostics. Static magnetic fields of several Tesla flux density are normally employed thereby. By means of highly sensitive superconducting quantum interferometers (SQUIDs) it is possible to measure also the precession of nuclear moments in very much lower fields. It is however only possible to produce weak fields with a sufficient homogeneity when the Earth's magnetic field (~ 40 mT) is efficiently shielded. Thus in PTB's magnetic shielding room, the precession of hydrogen nuclei was measured at flux densities of 40 nT to 4 mT. The natural resonance line widths of various substances (water, benzene, chloroform) could be resolved thereby at values of 0.1 Hz.

In medical application, the use of weak fields opens new applications such as, e.g., the simultaneous representation of anatomy and brain functions.



Präzession der Kernmomente zweier Wasserproben im gegenseitigen Abstand von 25 mm in einem Magnetfeld von 1,5 mT. Das Bild zeigt eine Folge von Isofeldlinienbildern, die im neuen Berliner Abschirmraum BMSR-2 mit einem Vielkanal-SQUID gemessen wurde. Aufgrund der Homogenität des angelegten Feldes bleibt die hier sichtbare gegenläufige Phasenbeziehung zwischen den Kernmagnetisierungen der beiden Proben über die ganze Lebensdauer der Kernmagnetisierungen ($3 \cdot T_2 \approx 10$ s) erhalten.

Precession of the nuclear moments of two water samples equidistant at 25 mm in a magnetic field of 1.5 mT. The picture shows a series of isofield-line pictures which were measured in the new Berlin shielding room BMSR-2 with a multi-channel SQUID. Due to the homogeneity of the applied field, the opposing phase ratio between the nuclear magnetizations of the two samples visible here is maintained for the entire life cycle of the nuclear magnetizations ($3 \cdot T_2 \approx 10$ s).

Verbessertes Dienstleistungsangebot für die Industrie

Im Jahre 2000 fasste die Bundesregierung unter dem Schlagwort „e-Government“ den Beschluss, alle Dienstleistungen der Bundesbehörden bis Ende 2005 elektronisch den Bürgern zur Verfügung zu stellen. Hieran anknüpfend präsentierte die PTB auf der CeBit 2005 unter den Rubriken „Partner des Mittelstandes“ und „Technologietransfer“ die wesentlichen Dienstleistungen und Technologieangebote auf eigens hierfür geschaffenen Internet-Portalen.

Dieser gewandelte Internet-Auftritt – mit deutlich erweiterten Online-Suchmöglichkeiten – brachte wesentliche Verbesserungen: Für die Recherche stehen nun mehrere Datenbanken (zu Kalibrieren & Messen, Zertifizierung, Explosionsschutz, Gremienarbeit, Patenten und Veröffentlichungen) zur Verfügung. Die Technologieangebote und die jeweiligen Kontaktpersonen sind daher für die Kunden der PTB leichter als zuvor recherchierbar.

Künftig wird zusätzlich eine Übersicht der Mess- und Forschungseinrichtungen innerhalb der PTB (z. B. Reinraumzentrum, EMV-Kabinen, Magnetisch abgeschirmte Räume, Hydrodynamisches Testfeld etc.) bereitgestellt. Interessierte Industriekunden können diese Einrichtungen zu marktüblichen Konditionen nutzen.

Interaktive Maske der Patentdatenbank im PTB-Webportal „Partner des Mittelstandes“

(www.mittelstand.ptb.de). Eine Auswahl kann hier nach Technologiebegriffen von Halbleitertechnik, Medizin, Optik bis hin zur Sicherheitstechnik getroffen werden. Auch nach Begrifflichkeiten des internationalen Patentierungscode IPC kann im Klartext gesucht werden.

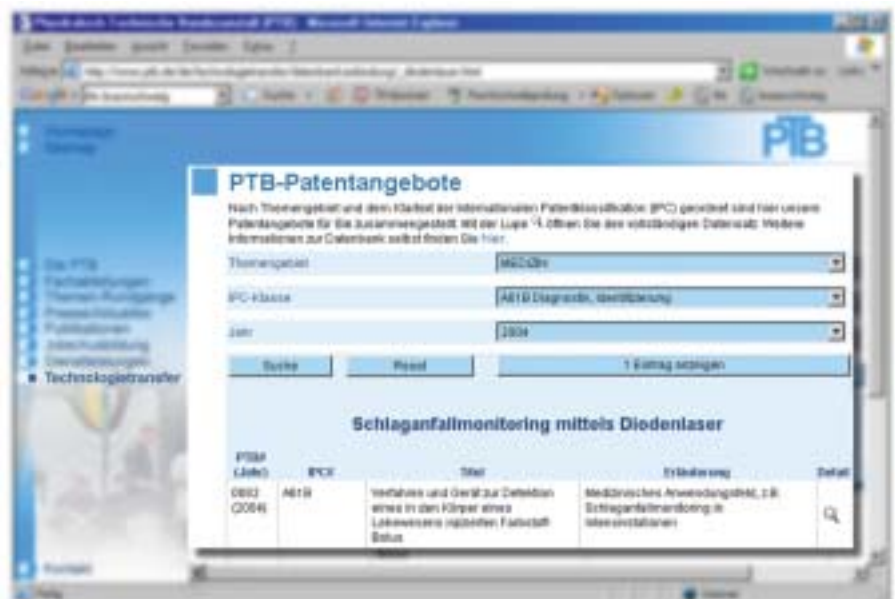
Interactive template of the patent database in the PTB Web portal “Partner des Mittelstandes” (Partners of medium-sized businesses) (www.mittelstand.ptb.de). A selection can be made here based on technology terms from semiconductor technology, medicine, optics to safety engineering. Also one can search for classifications of the International Patent Code IPC in clear text.

Improved range of services for industry

In 2000, the Federal government conceived a resolution under the key word “e-Government” to make available all services of the federal authorities to all citizens electronically by the end of 2005. Linked to this, PTB presented at the CeBit 2005, under the categories “Partner of medium-sized businesses” and “Technology transfer”, the essential services and technological offers on Internet portals expressly created for this purpose.

This converted Internet presence – with distinctly expanded Online-search facilities – has brought considerable improvements: Several databases are now available for research (for calibration & measurement, certification, explosion protection, committee work, patents and publications). The technology offers and the respective contacts are thus researched more easily than before for customers of PTB.

Available in addition henceforth will be an overview of the measuring and research facilities within PTB (e.g. Clean Room Centre, EMC cabins, magnetically shielded rooms, hydrodynamic test field etc.). Interested customers from industry can use these facilities on usual market terms and conditions.



56. Sitzung des Kuratoriums

Das Kuratorium traf sich am 28. und 29. April 2005 zu seiner 56. Jahrestagung in Braunschweig.

Die Tagung begann mit der Besichtigung ausgewählter Messplätze durch die Kuratoren und Gäste und setzte sich am Nachmittag mit Berichten zu der Entwicklung in zwei Abteilungen der PTB fort. Unter der Überschrift „Metrologie in der Chemie – Wie ist der Stand – Wie geht es weiter“ stellte Dr. Wolfgang Hemminger, Leiter der Abteilung 3, den Anwesenden diesen Bereich vor. Anschließend referierte Prof. Dr. Hans Koch, Leiter der Abteilung 8, über die „Neuausrichtung der Metrologischen Informationstechnik als Querschnittsaufgabe“. Traditionell wurde der Nachmittag durch Vorträge junger Wissenschaftler der PTB abgerundet, die im Rahmen eines Kolloquiums aktuelle Forschungsarbeiten vorstellten.



Die Präsidenten von BAM und PTB, Prof. Hennecke und Prof. Göbel, unterzeichnen die Kooperationsvereinbarungen zu den Themen „Explosionsschutz“ und „Metrologie in der Chemie“

The Presidents of the BAM and PTB, Prof. Hennecke and Prof. Göbel, sign the cooperation agreement on the subjects “Explosion protection” and “Metrology in chemistry”

Die Sitzung am 29. April 2005 wurde erstmals von Dr. Eckhard Franz eröffnet, der als neuer für die PTB zuständiger Abteilungsleiter VIII im BMWA zugleich neuer Präsident des Kuratoriums der PTB ist. Dr. Franz hob in seinem Vortrag besonders den großen Beitrag der PTB für den technologie- und innovationsorientierten Mittelstand hervor und bezeichnete das sehr gute Ergebnis der Evaluation in der PTB als wichtige Grundlage einer positiven Entwicklung der PTB. Abschließend berichtete Dr. Franz über die Umsetzung der europäischen Mess-

56th meeting of the Board of Consultants

The Board of Consultants met on 28th and 29th April 2005 for its 56th annual meeting in Braunschweig.

The meeting began with a tour of selected measurement set-ups by Board members and guests and was followed in the afternoon by reports on the development in two divisions of PTB. Under the heading “Metrology in Chemistry – What is the state of things? – What are the future prospects?” Dr. Wolfgang Hemminger, head of Division 3, presented this area to those present. This was followed by a lecture given by Prof. Dr. Hans Koch, head of Division 8, on the “Redirection of metrological information technology as cross-sectional task”. True to tradition, the afternoon was rounded off by lectures given by young PTB scientists who presented current research work within the context of a colloquium.

The meeting on 29th April 2005 was, for the first time, opened by Dr. Eckhard Franz who is both the new head of Department VIII at the BMWA and responsible for PTB, and at the same time the new President of the Board of Consultants of the PTB. In his lecture, he particularly emphasized the great contribution of the PTB to the technologically and innovatively oriented medium-sized businesses and described the very good result of the evaluation in the PTB as important basis for a positive development of the PTB. In conclusion, Dr. Franz reported on the transposition of the European Measuring Instruments Directive (MID) into national law and its possible effects on the PTB as well as on the now existing draft of the accreditation law.



Dr. Flügge (3. v. l.) informiert über den aktuellen Leistungsstand des Nanometerkomparators

Dr. Flügge (3rd from left) giving information on the current performance status of the nanometer comparator



Teilnehmer an der 56. Sitzung des Kuratoriums

Participants in the 56th meeting of the Board of Consultants

geräterichtlinie (MID) in nationales Recht und deren mögliche Auswirkung auf die PTB sowie über den nun vorliegenden Entwurf des Akkreditierungsgesetzes.

Der Präsident der PTB, Prof. Dr. Ernst O. Göbel, stellte seinen Rechenschaftsbericht schwerpunktmäßig auf die Dienstleistungsbereiche der PTB, Messen, Prüfen/Zulassen und Beraten, ab. Er berichtete u. a. über die Inbetriebnahme einer 1,1-MN·m-Drehmoment-Normalmessenrichtung, die der PTB eine weltweit einzigartige Kalibriermöglichkeit gibt, und über ein gemeinsames Projekt von BAM, PTB und der Fa. Merck bezüglich einer Rückführungskette auf Primärnormale auf dem Gebiet der analytischen Chemie sowie weitere aktuelle Industriekooperationen. Darüber hinaus stellte Prof. Göbel den Stand der Umsetzung der Evaluierungsempfehlungen, einen Zwischenbericht zur „Zielvereinbarung PTB-BMWA“ und die beabsichtigte Durchführung des EU-Projektes „iMERA“ vor. Zum Ende des Berichtes informierte Prof. Göbel über die Verleihung des Technologietransferpreises 2004 an Wissenschaftler der PTB und über die Gründung eines Spin-Off-Unternehmens aus der PTB, das zukünftig auf dem Gebiet „Fertigungsmesstechnik“ tätig sein wird. Im weiteren Verlauf der Sitzung informierte der Schatzmeister des Helmholtz-Fonds e. V., Ruprecht von Siemens, über die weiterhin positive wirtschaftliche Entwicklung des Fonds.

Persönliches:

Als neues Mitglied des Kuratoriums wurde Prof. Dr. h. c. Dr. Lothar Siekmann berufen.

Im Berichtsjahr schied das Mitglied Prof. Dr. Volker Pilz aus dem Kuratorium aus.

The President of the PTB, Prof. Dr. Ernst O. Göbel, placed the focus of his report and statement of account on the services sector of the PTB: measuring, testing/approval and consultancy services. He reported on, among other things, the putting into operation of a 1.1 MN·m torque standard machine which provides PTB with a worldwide unique possibility of calibration, and on a mutual project between BAM, PTB and the Merck company regarding a chain of traceability to primary standards in the field of analytical chemistry as well as further current industrial cooperations. Moreover, Prof. Göbel presented the state of conversion of the evaluation recommendations, an interim report on the “Target Agreement between PTB and BMWA”, and the intended realization of the EU project “iMERA”. At the end of the report, Prof. Göbel presented information on the awarding of the Technology Transfer Prize 2004 to PTB scientists and on the establishment of a spin-off of PTB which will in future work in the field of “precision engineering”. In the further course of the meeting, the treasurer of the Helmholtz-Fonds e. V., Ruprecht von Siemens, presented information on the continued positive economic development of the fund.

Personal Matters:

Prof. Dr. hc Dr. Lothar Siekmann was appointed a new member of the Board of Consultants.

In the year under report, Prof. Dr. Volker Pilz, member of the Board of Consultants, took his leave.

Helmholtz-Symposium „Mathematik für die Metrologie“

Das Helmholtz-Symposium „Mathematics for Metrology“ führte am 14. Juni 2005 rund 100 national und international führende Experten auf den Gebieten der mathematischen Modellierung und Datenanalyse zusammen. Peter Deuffhard (Freie Universität und Zuse-Institut Berlin) stellte die Aktivitäten des DFG-Forschungszentrum für angewandte Mathematik „Matheon“ vor, James Warren (NIST, Gaithersburg) die mathematische Modellierung von Kristallwachstum, Peter Maass (Universität Bremen) indirekte Messungen und inverse Methoden in technischen Systemen, Peter Hunter (University of Auckland) die Realisierung des „virtuellen Menschen“, d.h. die realistische mathematische Modellierung von Form und Funktion einzelner Organe sowie die Integration in ein Modell des Menschen, Jürgen Kurths (Universität Potsdam) die Synchronisationsanalyse multivariater Daten, und Alexander Reinefeld (Humboldt-Universität und Zuse-Institut Berlin) die Perspektiven und Herausforderungen der weltweiten Datenorganisation.

Der Hintergrund der Themenwahl war die Beobachtung, dass in der modernen Metrologie die Mathematik eine immer wichtigere Rolle sowohl in der Modellierung komplexer Messprozesse als auch in der Analyse von Messdaten spielt. Dabei kommen zunehmend fortgeschrittenere Methoden zum Einsatz, so dass in der Zukunft eine stärkere Verknüpfung der Metrologie mit aktuellen Forschungsrichtungen der Mathematik zu erwarten ist.

Helmholtz Symposium “Mathematics for Metrology“

On June 14, 2005, the Helmholtz Symposium “Mathematics for Metrology“ brought together approx. 100 nationally and internationally leading experts in the fields of mathematical modelling and data analysis. Peter Deuffhard (Freie Universität and Zuse-Institut of Berlin) presented the activities of the DFG research centre for applied mathematics “Matheon“, James Warren (NIST, Gaithersburg) the mathematical modelling of crystal growth, Peter Maass (University of Bremen) indirect measurements and inverse methods in technical systems, Peter Hunter (University of Auckland) the realization of the “virtual human“, i.e. the realistic mathematical modelling of shape and function of individual organs as well as the integration into a human model, Jürgen Kurths (University of Potsdam) the synchronization analysis of multivariate data and Alexander Reinefeld (Humboldt Universität and Zuse-Institut of Berlin) the prospects and challenges of the worldwide data organization.

The background of the subject selection was the observation that, in modern metrology, the role of mathematics is gaining in importance both in modelling complex measuring processes and in analyzing measuring data. In this regard, increasingly advanced methods are being used so that, in future, a stronger linkage between metrology and the current research trends in mathematics is to be expected.



Gruppenbild vom Helmholtz-Symposium

Group photograph of the Helmholtz Symposium

Helmholtz-Preis: Messungen an magnetischen Nanopartikeln

Thomas Uhlig und Martin Heumann, zwei junge Physiker aus der Arbeitsgruppe von Professor Josef Zweck, Universität Regensburg, sind für ihre Messungen an magnetischen Nanopartikeln mit dem Helmholtz-Preis für Metrologie ausgezeichnet worden. Die offizielle Preisübergabe fand im festlichen Rahmen am Montag, 13. Juni 2005, im Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) in Berlin statt.

Die beiden Forscher konnten ein Transmissions-Elektronenmikroskop soweit modifizieren, dass sie Abbildungen der magnetischen Konfigurationen, kombiniert mit mikromagnetischen Messungen, mit bisher unerreicht hoher räumlicher Auflösung von unter 10 Nanometern (nm) gewinnen konnten. Untersuchungen an einzelnen Nanopartikeln (Durchmesser bis hinunter zu 100 nm) wurden so erst möglich. Dabei zeigte sich, dass sich die Nanopartikel viel individueller verhalten, als es man es aufgrund der räumlichen Nachbarschaft und der identischen Herstellungsbedingungen erwarten würde: Die magnetischen Feldstärken, die nötig sind, um ein vorliegendes Nanopartikel umzumagnetisieren (die so genannten Schaltfeldstärken), fallen von Teilchen zu Teilchen, je nach geometrischer Form, sehr unterschiedlich aus. Wer in Zukunft Speicherzellen auf der Basis von Nanopartikeln bauen will, wird diesen Befund berücksichtigen müssen.

Helmholtz Prize: Measurements on magnetic nanoparticles

Thomas Uhlig and Martin Heumann, two young physicists from the working group led by Professor Josef Zweck at the University of Regensburg, were awarded the Helmholtz Prize for Metrology for their measurements on magnetic nanoparticles. The official award ceremony took place on Monday June 13, 2005, at the Federal Ministry of Economics and Labour (BMWA) in Berlin.

The two scientists were able to modify a transmission electron microscope in such a way that they could obtain images of the magnetic configurations combined with micromagnetic measurements with a previously unachieved spatial resolution of less than 10 nm. Thus, for the first time, investigations on individual nanoparticles (of diameters down to 100 nm) have become possible. These showed that the nanoparticles behave in a much more individual way than one would expect given the spatial vicinity and the identical conditions of production: The magnetic field strengths which are necessary to re-magnetize an existing nanoparticle (the so-called switching field strengths) vary considerably from one particle to another depending on their geometrical shape. Whoever wants to produce storage cells in future on the basis of nanoparticles will have to take these results into account.

Bei der Festveranstaltung zur Vergabe des Helmholtz-Preises 2005 (v. l. n. r.): Dr. Martin Heumann, Prof. Bernhard Kramer, Prof. Ernst O. Göbel, Dr. Eckhard Franz, Dr. Thomas Uhlig, Prof. Josef Zweck, Ruprecht von Siemens.

At the award ceremony for the Helmholtz Prize 2005 (from l.t.r.): Dr. Martin Heumann, Prof. Bernhard Kramer, Prof. Ernst O. Göbel, Dr. Eckhard Franz, Dr. Thomas Uhlig, Prof. Josef Zweck, Ruprecht von Siemens.



Technologietransferpreis für Zahnimplantatsystem

Eine vollkommen neue Zahnimplantattechnik wurde von der Industrie- und Handelskammer Braunschweig mit dem Technologietransferpreis ausgezeichnet. Professor Manfred Peters von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt hat das System gemeinsam mit Mitarbeitern des Universitätsklinikums Aachen und der Firma Heraeus bereits bis zur Marktreife entwickelt. Der Clou der neuen Technik: Sie kommt, im Gegensatz zu allen anderen Produkten, ohne jede Verschraubung aus.

Unter dem Produktnamen „IQ:Nect“ wird Heraeus das Implantatsystem im Jahr 2006 in Deutschland einführen, nachdem mehrere Millionen Euro in die Entwicklungs- und Testphase investiert worden sind. In einer Langzeitstudie wurden bis jetzt insgesamt 150 Patienten mit knapp 500 Implantaten versorgt – mit überzeugenden Ergebnissen. „Das Implantatsystem“, so Heraeus in einem Schreiben an die IHK, „ist ein hervorragendes Beispiel für Technologietransfer und eng verzahnte Projektarbeit, in der Expertenwissen aus Wissenschaft, Klinik und der Praxis optimal kombiniert wurden.“

Das jetzt prämierte Zahnimplantatsystem benötigt – im Gegensatz zu fast allen anderen Implantatsystemen – keine inneren Verschraubungen, sondern setzt auf einen Clipmechanismus und eine neuartige Verbindungstechnologie über chemisch ausgehärtete Sprengringe. Innere Spannungen treten bei diesem Zahnersatz nicht mehr auf. Und: Die Handhabung des Systems ist – präzise gefertigte Systemteile vorausgesetzt – deutlich einfacher, so dass Fehlermöglichkeiten für Zahnarzt und Zahntechniker auf ein Minimum reduziert werden.

IHK-Präsident Dr. Klaus Schubert überreicht Prof. Manfred Peters den Technologietransferpreis.

The president of the IHK, Dr. Klaus Schubert, presents the technology transfer prize to Prof. Manfred Peters.

Technology Transfer Prize for dental implant system

For the development of a novel dental implant technology, Professor Manfred Peters from the Physikalisch-Technische Bundesanstalt has been awarded the Technology Transfer Prize by the Chamber of Industry and Commerce (IHK) of Braunschweig. Together with colleagues from the Aachen University Clinic and the company of Heraeus, he has already developed the system for market readiness. The revolutionary idea behind this new technique: in contrast to all other products, no screws are required.

In 2006, Heraeus will launch the implant system onto the German market under the brand name “IQ:Nect” after several millions of Euro have been invested into the development and test phase. Within the scope of a long-term study, so far 150 patients have been provided with approx. 500 implants – which has led to convincing results. “The implant system”, says Heraeus in a letter addressed to the IHK, “is an outstanding example of technology transfer and closely intertwined project work which has optimally combined expert knowledge from science, medical theory and practice.”

Contrary to nearly all other implant systems, this new dental implant system requires no interior screws. Instead, it is based on a clipping mechanism and a novel connecting technology using chemically hardened snap rings. Internal strains no longer occur with this kind of dental implant. Furthermore, the system is much easier to handle – provided the system parts were designed precisely – so that the risk of making an error is reduced to a minimum for the dentist and the dental technician.



Ehemaliger Forschungsreaktor der PTB wird Zentralwerkstatt

Der Rückbau und die Stilllegung des ehemaligen Forschungs- und Messreaktors (FMRB) der PTB wurden abgeschlossen: Das Reaktorgebäude wurde vom Niedersächsischen Umweltministerium aus der atomrechtlichen Aufsicht entlassen und kann jetzt uneingeschränkt genutzt werden. In die nun freigegebenen Gebäude wird nach und nach der Wissenschaftliche Gerätebau der PTB einziehen.

Die Experimentierhalle des FMRB während des Reaktorbetriebs (1967-1995).



Test hall of the FMRB during reactor operation (1967-1995).

PTB's former research reactor becomes central workshop

The dismantling and closedown of PTB's former research and measuring reactor (FMRB) have been completed: The reactor building was released from surveillance under the Atomic Energy Act by the Ministry of the Environment of Lower Saxony and can now be used without any restrictions. Little by little, PTB's Scientific Instrumentation department will be moving into the released buildings.

Im Rahmen des Rückbaus und der Stilllegung des Reaktors fielen insgesamt 585 t in Chargen sortierte Reststoffe an. Davon gab die Genehmigungsbehörde 350,8 t Material uneingeschränkt und 73,3 t zur Entsorgung auf die Deponie frei. Die verbleibenden 160,9 t radioaktiver Abfälle (vor allem Beton-schutt, Metallteile und Kunststoff) wurden nach fest vorgegebenen Ablaufplänen in Spezialfässer verpackt, durch zwei unabhängige Sachverständige geprüft und in ein eigens dafür genehmigtes Zwischenlager in der PTB eingelagert.

Insgesamt wurden 45 Kontrollbereichsräume (20 400 m² Oberflächen) mit 6410 Anlagen-teilen, 139 andere Räume, 9500 m² Fassaden- und Dachflächen sowie 6000 m² Bodenfläche im Außenbereich von der Genehmigungs-behörde freigegeben und aus der atomrecht-lichen Aufsicht entlassen. Jede der einzelnen Maßnahmen wurde im Auftrag des Nieder-sächsischen Umweltministeriums durch einen unabhängigen Sachverständigen begleitet. Die PTB hat seit 1995 bis zur Entlassung des letzten Teilbereichs des Reaktors gesonderte Mittel in Höhe von EUR 16,3 Mio. für die Stilllegung und den Rückbau aufgebracht.

Within the scope of the dismantling and closedown of the reactor, a total of 585 t of residues, sorted into batches, have accumulated. 350.8 t of this material were unrestricted and another 73.3 t have been released by the authorization authority for disposal at a waste site. The remaining 160.9 t of radioactive wastes (mainly concrete rubble, metallic parts and plastics) were packed into special barrels in compliance with predetermined process plans; they were then checked by two independent experts and stored in an ad hoc authorised interim storage facility at PTB.

A total of 45 rooms, once classified as "controlled areas", a surface of 20 400 m², with 6410 facility parts, 139 other rooms, 9500 m² of façade and roof surfaces, as well as 6000 m² of floor surface in the outer area were cleared by the authorization authority. By order of the Ministry of the Environment of Lower Saxony, each individual measure was attended by an independent expert. From 1995 until the release of the last reactor portion, PTB has spent special funds to the amount of 16.3 million euros on the dismantling and closedown.

Zu Gast bei der PTB

Gleich mehrmals im vergangenen Jahr öffnete die PTB einem breiten Publikum ihre Türen. Den Anfang machte am 11. Juni 2005 das Institut Berlin, als es zur „Lange Nacht der Wissenschaften“ einlud und dem Publikum einen originalgetreuen und funktionstüchtigen Nachbau des einzigen Experiments von Albert Einstein vorführte. Mit diesem Experiment, das Einstein 1915 gemeinsam mit dem Physiker Wander Johannes de Haas in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt durchführte, wollte er den Magnetismus des Elektrons nachweisen. Dieses historische Experiment wurde von einer Autorenlesung (Jürgen Neffe aus seiner Einstein-Biografie) und einer Ausstellung mit anderen Beispielen historischer und moderner Messverfahren mit Elektronen umrahmt.



Eine weite Reise durch das Land des Messens bot die PTB in Braunschweig an: Am 9. September waren Schulklassen zu Rundgängen durch die Laboratorien der PTB eingeladen. Insgesamt 75 Gruppen (rund 800 Schüler) lernten so die PTB von innen und aktuelle Forschungsfragen der Metrologie kennen. Am darauf folgenden Tag, am 10. September, veranstaltete die PTB auf dem Braunschweiger Gelände ihren Tag der offenen Tür, zu dem über 3500 Besucher kamen. Auf vier verschiedenen Rundgängen konnten die Besucher insgesamt 25 verschiedene Themen aus dem vielfältigen Aufgabengebiet der PTB kennen lernen – von „Auralisation“ (Höreindrücke von Schallereignissen) bis „Zahn um Zahn“ (Hochgenaue Verzahnungsmesstechnik). Mit im Programm waren natürlich auch

Visitors to the PTB

In the past year, PTB has opened its doors several times to a broad public. To begin with, the Berlin Institute issued an invitation to the “Lange Nacht der Wissenschaften” (The Long Night of the Sciences) on 11th June 2005 and presented to the public a true-to-the-original and functional replica of the only experiment by Albert Einstein. In this experiment, which Einstein carried out in 1915 together with the physicist Wander Johannes de Haas in the Physikalisch-Technische Reichsanstalt, he wanted to prove the magnetism of the electron. This historical experiment was conducted in an appropriate setting, including a reading (Jürgen Neffe from his biography of Einstein) and an exhibition with additional examples of historical and modern measuring techniques with electrons.

A long journey through the land of measurement was offered by the PTB in Braunschweig: On 9th September school classes were invited to tour through the laboratories of PTB. A total of 75 groups (approx. 800 pupils) thus got to know the internal workings of the PTB and familiarized themselves with current research problems in metrology. On the following day, the 10th of September, the PTB held its open day on the site in Braunschweig, which was attended by more than 3500 visitors. The visitors had the opportunity – on four different tours – to familiarize themselves with 25 various topics from the diverse areas of activity of the PTB – from “auralisation” (aural impressions of sound events) to “tooth for tooth” (highly precise gearing measuring techniques). Included in



die Cäsiumatomuhren, aus denen die gesetzliche Zeit in Deutschland abgeleitet wird und die maßgeblich zur Weltzeit beitragen. Die Besucher konnten entweder zu Fuß durch das parkartige Gelände der PTB wandern oder sich bequem von den Rundfahrbussen von einem Highlight zum nächsten bringen lassen. Währenddessen konnten Kinder sich auf der Hüpfburg vergnügen, sich an Bastelaktionen beteiligen oder bei „Phaeno mobil“ selber einfache Experimente durchführen.



Einen Tag vor diesen großen Publikumstagen „für alle“ war die PTB am 8. September Gastgeber des 23. Braunschweiger Unternehmergesprächs, zu dem alljährlich der Braunschweiger Oberbürgermeister einlädt. Über 200 Gäste aus Wirtschaft und Forschung folgten der Einladung, die in diesem Jahr an einem außergewöhnlichen Ort stattfand: in der im Juni 2005 aus dem Atomgesetz entlassenen Reaktorhalle der PTB. Vor der Weiternutzung durch die PTB bestand hier die Möglichkeit auf ein Stück Wissenschaftsgeschichte hinzuweisen, da der 1995 abgeschaltete Reaktor jahrelang als Neutronenquelle diente.

Grußworte sprachen der PTB-Vizepräsident Prof. Dr. Manfred Kochsiek, der Staatssekretär im Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit Georg Wilhelm Adamowitsch, der niedersächsische Wirtschaftsminister Walter Hirche und der Braunschweiger Oberbürgermeister Dr. Gerd Hoffmann. Für die musikalische Umrahmung sorgten die „Swing Units“.

the programme, of course, were also the caesium atomic clocks, from which legal time is taken in Germany and which contribute considerably to Universal Coordinated Time (UTC). The visitors could either wander through the park-like grounds or allow themselves to be taken comfortably by tour bus from one highlight to the next. Meanwhile, children could have fun on the bouncy castle, participate in the crafts events or carry out simple experiments themselves at the “Phaeno mobil”.

One day before this great public day “for everyone” – on the 8th of September – the PTB was the host of the 23rd Braunschweig Business Talks, an annual invitation extended by the mayor of Braunschweig. More than 200 guests from industry and research accepted the invitation to the Talks which were held at an unusual site this year: in PTB's reactor hall which had been released from the Atomic Energy Act in June 2005. Before its continued use by PTB it was possible to point out a piece of scientific history, as the reactor, switched off in 1995, had served as a neutron source for years.



Greetings were given by PTB's Vice-president, Prof. Dr. Manfred Kochsiek; the State Secretary in the Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (Federal Ministry for Economy and Labour), Georg Wilhelm Adamowitsch; the Minister of Economy in Lower Saxony, Walter Hirche; and the Mayor of Braunschweig, Dr. Gerd Hoffmann. The “Swing Units” provided a musical setting.

Rezept für eine Atomuhr

Erstmals hat eine primäre Atomuhr das Zeitlabor der PTB verlassen. Bisher mussten alle Interessierte – und viele waren und sind interessiert – den Weg in die PTB, an die Peripherie Braunschweigs finden, um eine solche Uhr zu sehen. Nun gibt es hierzu eine Alternative: Eine primäre Cäsiumatomuhr, die CS4, ist am 16. Juni 2005 ins Braunschweigische Landesmuseum umgezogen und bildet dort den Mittelpunkt der Dauerausstellung „Rezept für eine Atomuhr“, die von der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit der PTB konzipiert und umgesetzt wurde. Genau 50 Jahre vor dem Eröffnungstag dieser Ausstellung war das Zeitalter der Cäsiumatomuhren eingeläutet worden.

Der Ausstellungstitel verrät, dass es um mehr geht als ein hochtechnisches Objekt in den öffentlichen Raum zu stellen. Und so ist vor allem derjenige in der Ausstellung richtig, der etwas über die physikalischen Prinzipien erfahren möchte, die in den Atomuhren stecken. Cäsiumatome, als wesentliche „Zutat“, werden beim „Rezept für eine Atomuhr“ ebenso vorgestellt wie Mikrowellen und Magnetfelder. Und es fehlt auch nicht der Zählmechanismus, aus dem schlussendlich Sekundenticks resultieren. Und auch wer sich fragt, woher Funkuhren die Zeit nehmen und welchen Zweck es überhaupt hat, die Zeit atomuhrengenau zu realisieren, findet in der Ausstellung Antworten.

Mit der Ausstellung im Braunschweigischen Landesmuseum hat die PTB einen „Außenposten“ ihrer Öffentlichkeitsarbeit und die Stadt eines ihrer prominentesten Kinder in ihrer Mitte.

„Rezept für eine Atomuhr“ – eine Dauerausstellung der PTB im Braunschweigischen Landesmuseum am Burgplatz. Die Öffnungszeiten: Di, Mi, Fr, Sa, So: 10:00 Uhr bis 17:00 Uhr. Do: 13:00 Uhr bis 20:00 Uhr. Eintritt frei.

“Recipe for an atomic clock” – a permanent exhibition of PTB in the Braunschweigisches Landesmuseum (State Museum of Braunschweig) at the Burgplatz. The opening hours are: Tue, We, Fr, Sa, Su: 10:00 am to 5:00 pm. Thu: 1:00 pm to 8:00 pm. Admittance is free of charge.

Recipe for an atomic clock

For the first time, a primary atomic clock has left the time laboratory of PTB. Hitherto, all interested parties – and many were and are interested – have had to find their way to PTB at the periphery of Braunschweig to see such a clock. Now there is an alternative to this: A primary caesium atomic clock, the CS4, moved to the Braunschweigisches Landesmuseum (State Museum of Braunschweig) on 16 June 2005 and there forms the focal point of the permanent exhibition “Recipe for an atomic clock” which was conceived and realized by PTB’s Press and Information Office. Exactly 50 years before the opening day of this exhibition, the era of the caesium atomic clock had been heralded.

The title of the exhibition reveals that the objective here is more than just to place a highly technical object in a public room. And thus it follows that a person desiring to learn something about the physical principles of atomic clocks is at the right place in this exhibition. Caesium atoms, as essential “ingredient”, are introduced at the “Recipe for an atomic clock”, as are also microwaves and magnetic fields. And the counting mechanism from which finally the second ticks result is also present. Likewise, anyone wondering where the radio-controlled clocks take the time from and what the purpose for realizing the time to atomic-clock accuracy actually is will find answers at the exhibition.

With the exhibition in the State Museum of Braunschweig (Braunschweigisches Landesmuseum) PTB has gained an “external post” of its Information Office and the city has one of its most prominent children in its midst.



Promotionen 2005 • Doctorates in 2005

Dmitri Balachov (2.4)	Development and investigation of double-barrier Josephson junctions and their implementation in superconductor electronics
Thorsten Buschmann (1.4)	Faseroptischer Liniensensor mit hoher Ortsauflösung für die Durchflussmesstechnik
Shizhi Cao (5.11)	Der Antastprozess von Mikrotastern bei dimensionellen Messungen
Gerald Fütterer (5.2)	UV-Shearing Interferometrie zur Vermessung lithographischer Phase Shift Masken und VUV-Strukturierung
Hasan Nuzha (7.52)	Aufbau einer Kernkühlstufe zur Untersuchung der kondensierten Materie bei ultratiefen Temperaturen und hohen Magnetfeldern
Tobias Schneider (4.43)	Optical Frequency Standard with a single $^{171}\text{Yb}^+$ ion
René Straßnick (8.52)	Ladezustandsbestimmung und Batteriemangement für verschlossene Bleiakkumulatoren in Elektrostraßenfahrzeugen
Uwe Steinhoff (8.21)	Selected Methods for Signal Analysis in High-Resolution Electro- and Magnetocardiography
Falk Tegtmeier (1.2)	Mehrkomponenten-Dehnungsaufnehmer für das Monitoring von Bauwerken

Zahlen und

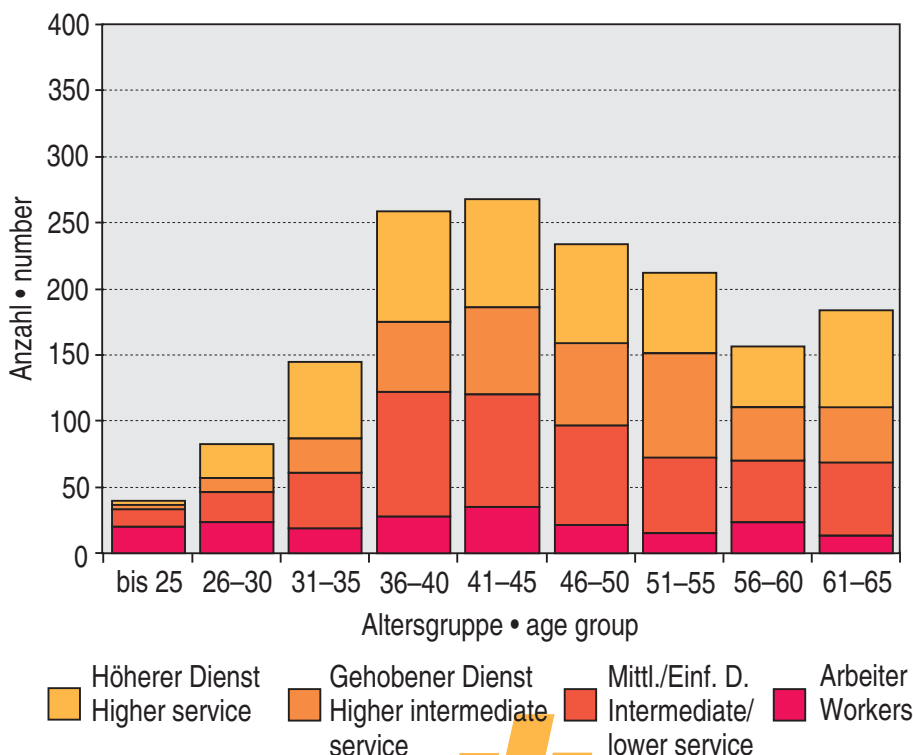
Personal: Entwicklung • Staff: development

Personelle Entwicklung von 1996 bis 2005 (Stand: 31. Dezember 2005) • Development of staff

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

Beschäftigungsverhältnis	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
a)										
Beamte • civil servants	483	483	486	490	501	503	507	506	508	510
Angestellte • employees	869	850	827	821	808	786	767	744	727	692
Arbeiter • workers	242	234	227	223	201	204	201	201	193	196
Kasino personal • canteen staff	8	8	8	6	6	7	7	6	0	0
gesamt • total	1602	1575	1548	1540	1516	1500	1482	1457	1428	1398
b)										
Auszubildende • trainees	133	142	150	151	147	136	138	144	158	159
Aushilfskräfte temporary staff	16	19	35	32	44	52	53	52	61	69
Drittmittelpersonal staff members financed by third parties	104	85	110	70	92	104	106	122	105	109
Mitarbeiter gesamt staff member total	1855	1821	1843	1793	1799	1792	1779	1775	1752	1735

Personal: Altersstruktur • Staff: age structure



Altersstruktur der Mitarbeiter/innen unterschieden nach Laufbahngruppen (ohne Auszubildende)

Age structure of staff distinguished by civil service groups (not including trainees)

Fakten

Ausbildung • Training (31. Dezember 2005)

	BS	Berlin	
Kommunikationselektroniker	9 (0)	3 (0)	communication electronics technologists
IT-Systemelektroniker	23 (6)	- -	information and telecommunication technologists
Elektroniker/in für Geräte und Systeme	32 (10)	- -	electronics technician for devices and systems
Physiklaboranten	20 (5)	- -	laboratory technicians, physics
Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik	7 (4)	- -	electronics engineer for electrical and building services engineering
Elektroinstallateure	11 (0)	- -	electrical fitters
Feinwerkmechaniker			precision instrument maker
Fachrichtung Feinmechanik	14 (3)	5 (2)	speciality: precision mechanics
Feinwerkmechaniker			precision instrument maker
Fachrichtung Maschinenbau	8 (0)	- -	speciality: mechanical engineering
Fotografen	5 (2)	- -	photographers
Technische Zeichner	4 (1)	- -	draftsmen
Köche	1 (0)	- -	cooks
Mikrotechnologen	1 (1)	- -	microtechnologists
Tischler	- -	4 (0)	joiners
IT-Systeminformatiker	- -	2 (2)	IT systems technicians
Fachangestellte für Bürokommunikation	- -	10 (3)	specialists in office communications
gesamt	135 (32)	24 (7)	total

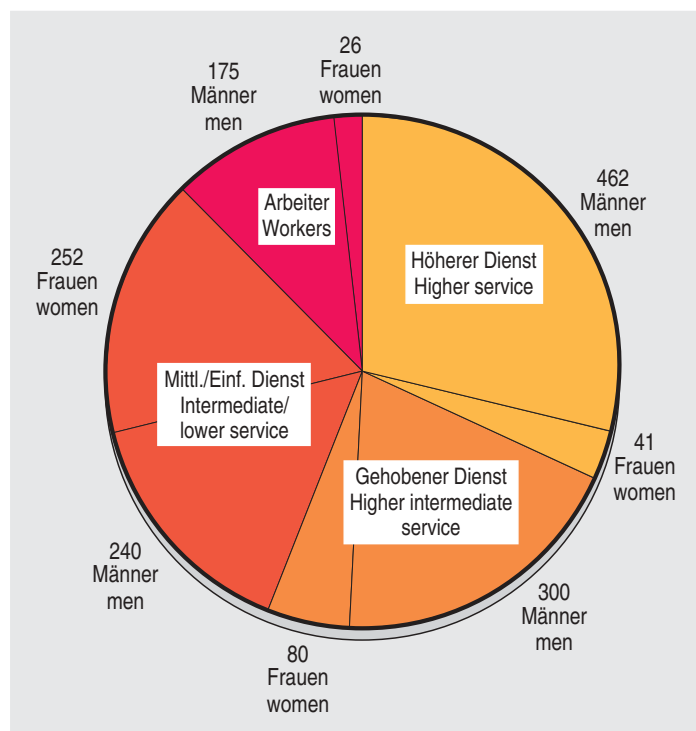
Die PTB gehört zu den größten Ausbildungsbetrieben in der Region. Gegenwärtig sind 159 Auszubildende bei der PTB angestellt. In Klammern sind die Neueinstellungen im Berichtsjahr angegeben.

The PTB is among the most important institutions of the region which provide training. 159 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)



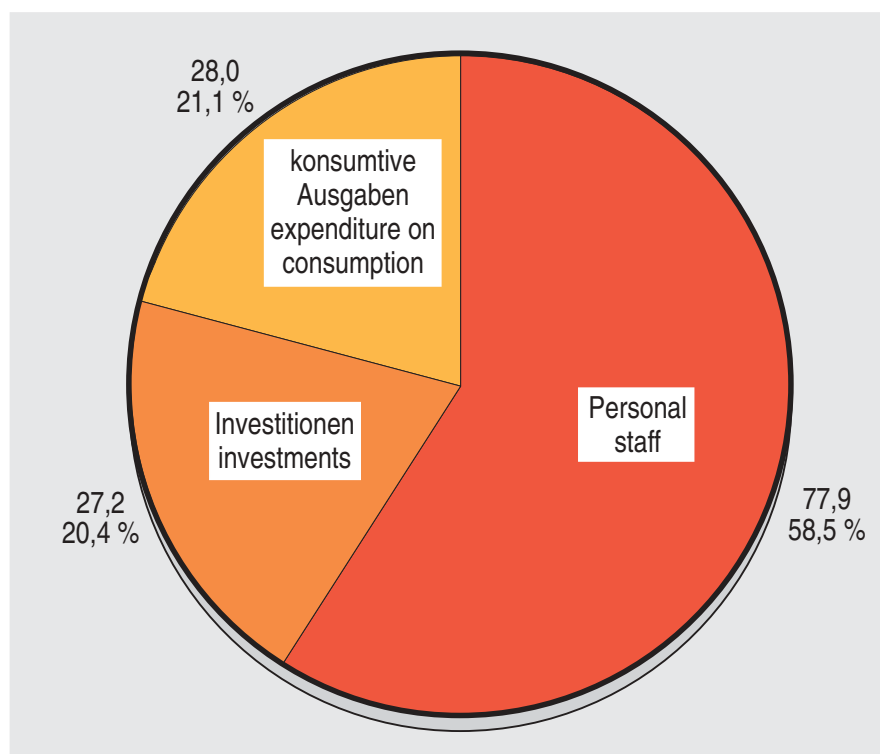
Haushalt: Gebühren • Budget: charges

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	2003	2004	2005	charges
Amtshandlungen und sonstige Gebühren	6232	6492	6008	official acts and repayment work; other fees
Prüfung und Zulassung von Spielgeräten von Prüfstellen (Elektrizität)	1492	1391	1489	tests and approvals of gaming machines of test centres (electricity)
Leistungen im Rahmen des DKD	388	233	251	services rendered within the framework of DKD
gesamt	9535	9670	8971	total

Haushalt: Ausgabenverteilung • Budget: break-down of expenditure



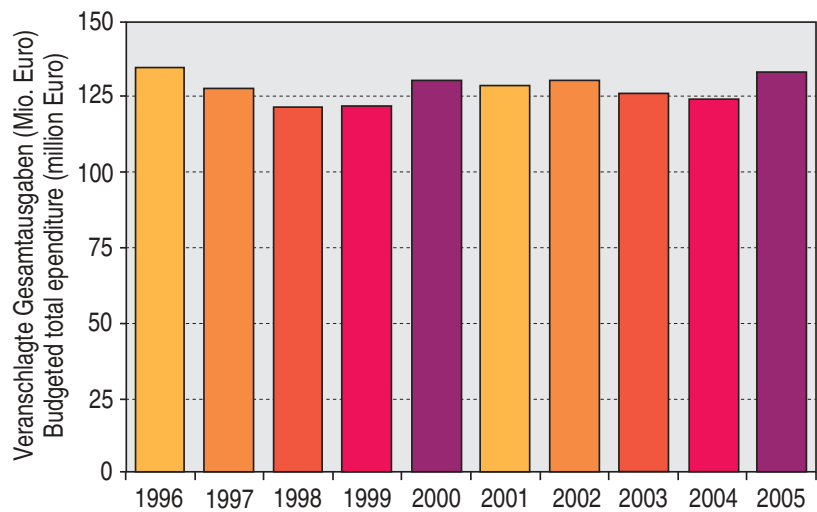
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. Euro). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

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	2003	2004	2005	budgetary means
Personalausgaben	77,2	77,2	77,9	staff costs
Investitionen (Bau und Geräte)	21,2	21,4	27,2	investments (building activities and instruments)
konsumtive Ausgaben	27,5	26,0	28,0	expenditure on consumption
gesamt	125,9	124,6	133,1	total

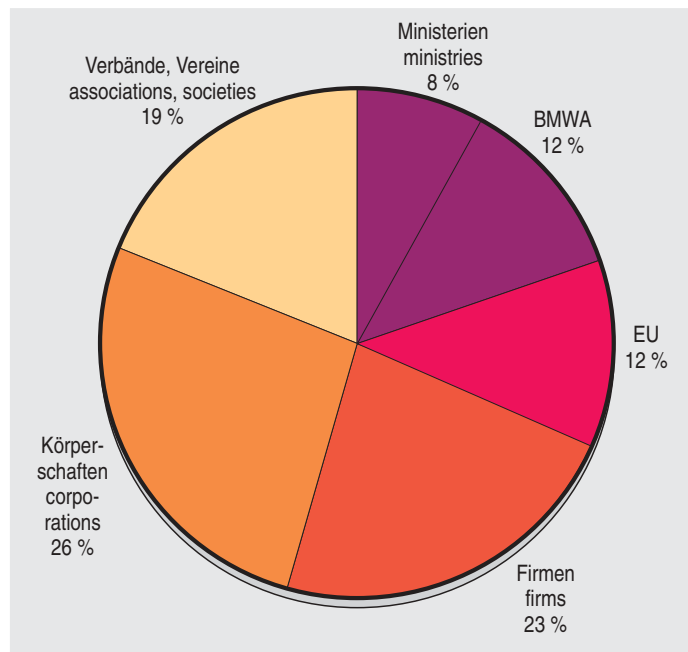
Haushalt: Entwicklung • Budget: development



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

Drittmittel: Forschungsprojekte • Third party funds: research projects

Die Drittmittel für Forschungsvorhaben summieren sich 2005 auf 6,8 Mio. Euro. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Insgesamt wurden im Berichtsjahr 10,7 Mio. Euro für 257 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) verwendet (davon 1,9 Mio. Euro für 65 Projekte in Berlin). Hinzu kommen 24 Sachbeihilfen der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit einem Gesamtvolumen von 808 000 Euro, davon fünf Sachbeihilfen mit 260 000 Euro in Berlin.



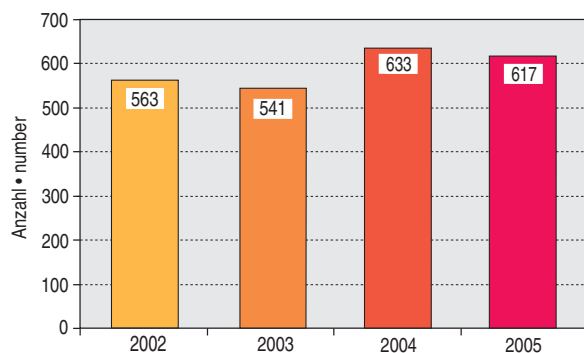
In 2005, the third-party funds for research projects added up to a total of 6.8 million Euro. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources. In the year under review, a total of 10.7 million Euro were used for 257 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 1.9 million Euro of these for 65 projects in Berlin. Added to this are 24 contributions in kind from the Deutsche Forschungsgemeinschaft with an overall volume of 808 000 Euro, five of these contributions with a volume of 260 000 Euro for Berlin.

Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures

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

... in Braunschweig		2003	2004	2005	
elektrische Energie	MWh	24 731	42 635	26 194	electrical energy
Wärme	MWh	26 380	24 942	23 336	heat
Gas	m ³	35 397	32 144	25 845	gas
Wasser	m ³	94 413	100 477	99 930	water
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnliche					
Gewerbeabfälle	t	119	111	112	refuse-like industrial waste
recycelte Abfälle	t	275	445	191	recycled waste
Sonderabfälle	t	108	35	28	hazardous waste
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	146 430	127 222	110 540	waste disposal costs (approx.)
... in Berlin		2003	2004	2005	
elektrische Energie	MWh	3250	4358	4344	electrical energy
Gas	m ³	47 500	12 100	8590	gas
Wasser	m ³	29 500	33 230	39 290	water
Helium, flüssig	l	29 000	40 550	43 900	helium, liquid
Stickstoff, flüssig	l	61 000	72 771	63 374	nitrogen, liquid
Abfälle:					waste produced:
Reststoffe insgesamt (ca.)	t	235	121	171	residues, total (approx.)
hausmüllähnliche					
Gewerbeabfälle	t	28	56	55	refuse-like industrial waste
recycelte Abfälle	t	195	62	112	recycled waste
Sonderabfälle	t	12	3	4	hazardous waste
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	37 000	37 000	14 800	waste disposal costs (approx.)

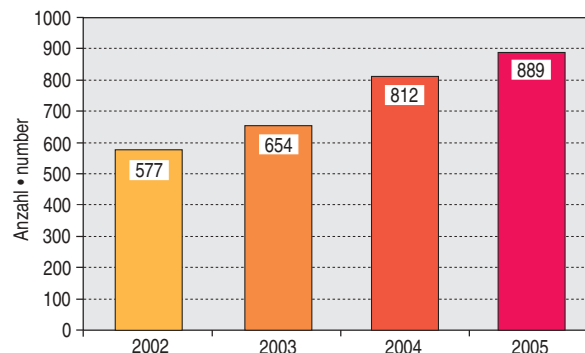
Veröffentlichungen • Publications



Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 2002 bis 2005 (vgl. Datenbank im Internet)

Number of publications by PTB staff members (in scientific journals, books, conference digests, etc.) between 2002 and 2005 (cf. database on the web)

Vorträge • Lectures



Anzahl der auswärtigen Vorträge, die PTB-Mitarbeiter/innen in den Jahren 2002 bis 2005 gehalten haben

Number of lectures held by PTB staff members outside PTB between 2002 and 2005

Aus dem Veranstaltungskalender • Events

	2003	2004	2005	
PTB-Seminare	11	11	10	PTB Seminars
Tagungen, Workshops, etc. *	75	16	15	Conferences, workshops, etc. *
Kolloquien	86	89	94	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).

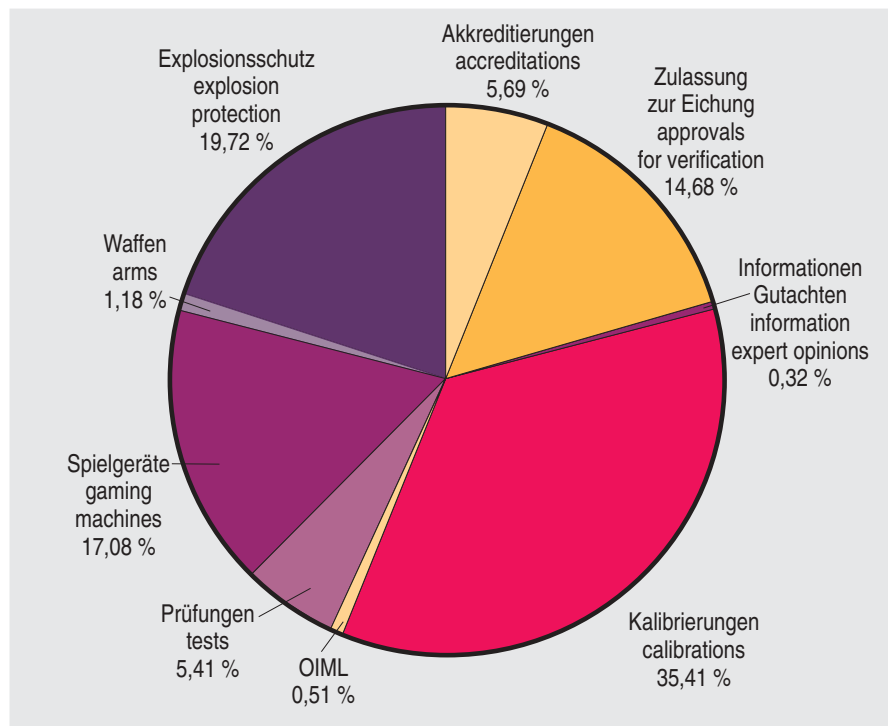
*Ab 2004 werden nur noch große nationale und internationale Veranstaltungen gezählt.

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 2005 auf die verschiedenen Dienstleistungsbereiche der PTB. Gesamteinnahmen: 8,76 Millionen Euro.



Distribution of the income of 2005 among the various service sectors of PTB. Total receipts: 8.76 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 15 Länder in vier Kontinenten durch 17 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, 15 countries in four continents were assisted within the scope of 17 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.

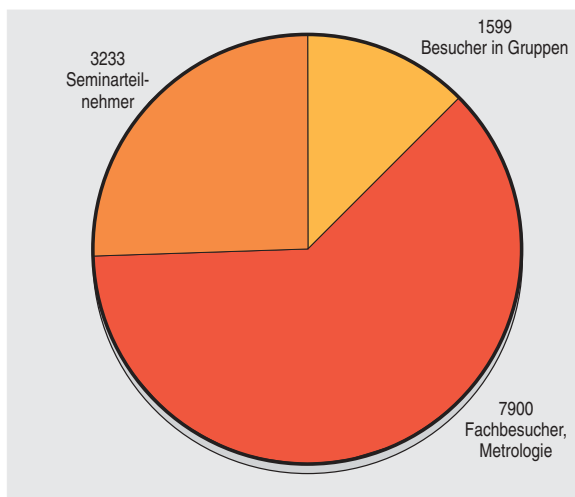
Gastwissenschaftler, Gäste und Besucher

Im letzten Jahr kamen 12 732 Besucher aus aller Welt in die PTB (Standort Braunschweig). Den größten Anteil bildeten die metrologischen Fachbesucher aus Wissenschaft und Wirtschaft (7900) sowie die Teilnehmer an unterschiedlichsten Seminaren, Tagungen und Kolloquien (3233). Auch der allgemeine Besucherdienst der PTB, im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit, fand wie gewohnt regen Zuspruch. 1599 Besucher (in 72 Gruppen) schauten den Wissenschaftlern in ihren Laboratorien über die Schultern. Die meisten dieser Besucher waren Schüler und Studenten.

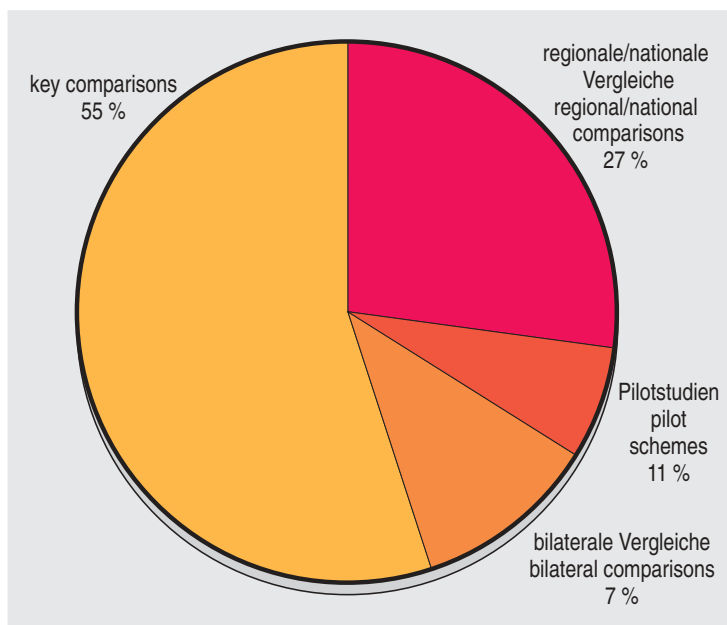
Guest scientists, guests and visitors

Last year, 12 732 people from all parts of the world visited PTB (Braunschweig site). Most of them were metrological professionals from science and economy (7900) as well as participants in the diverse seminars, meetings and colloquia (3233).

PTB's general visitor service within the scope of public relations work was also popular as usual. 1599 visitors (in 72 groups) observed the scientists work in their laboratories. Most of these visitors were pupils and students.



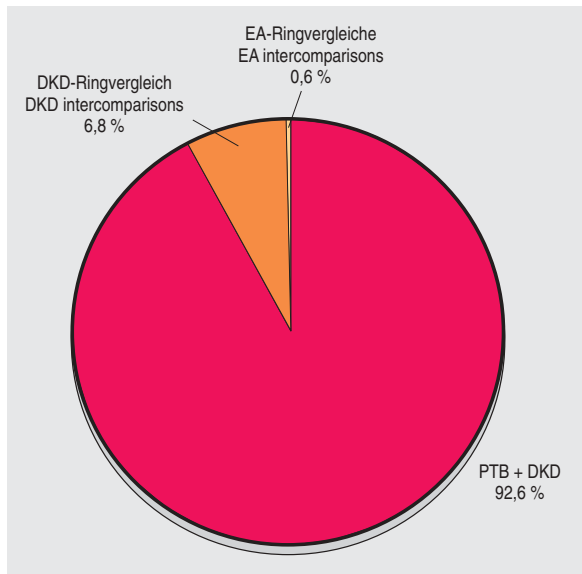
Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements



In the year under review, the PTB participated in 44 comparison measurements, viz. 24 key comparisons, (organized by the Consultative Committees of the International Committee for Weights and Measures, CIPM), 12 regional/national comparisons, 3 bilateral comparisons and 5 pilot schemes.

Die PTB nahm im Berichtsjahr an 44 Vergleichsmessungen teil und zwar an 24 Schlüsselvergleichen (key comparisons, organisiert von den Beratenden Komitees des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht, CIPM), 12 regionalen/nationalen Vergleichen, 3 bilateralen Vergleichen und 5 Pilotstudien.

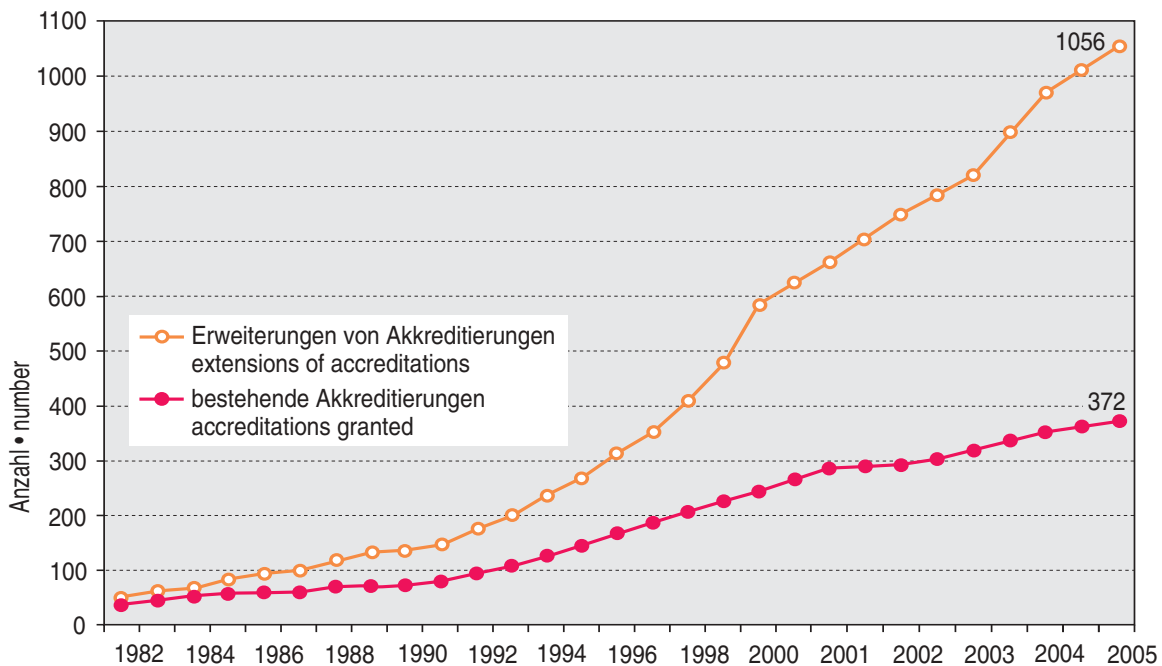
DKD-Vergleichsmessungen • DKD comparison measurements



Die im DKD akkreditierten Laboratorien (DKD-L) nahmen im Berichtsjahr an 163 Vergleichsmessungen teil. Den größten Anteil daran hatten 151 bilaterale Vergleichsmessungen zwischen der PTB und DKD-L. Hinzu kommen elf DKD-Ringvergleiche mit mehreren DKD-L und der PTB als Referenzlaboratorium sowie ein EA-Ringvergleich, an dem DKD-L teilnehmen.

In the year under review, the accredited DKD laboratories (DKD-L) participated in 163 comparison measurements, the largest portion (151) being bilateral comparison measurements between PTB and DKD-L. Added to this were eleven DKD intercomparisons involving several DKD-L, with the PTB acting as the reference laboratory, as well as one EA intercomparison, involving DKD-L.

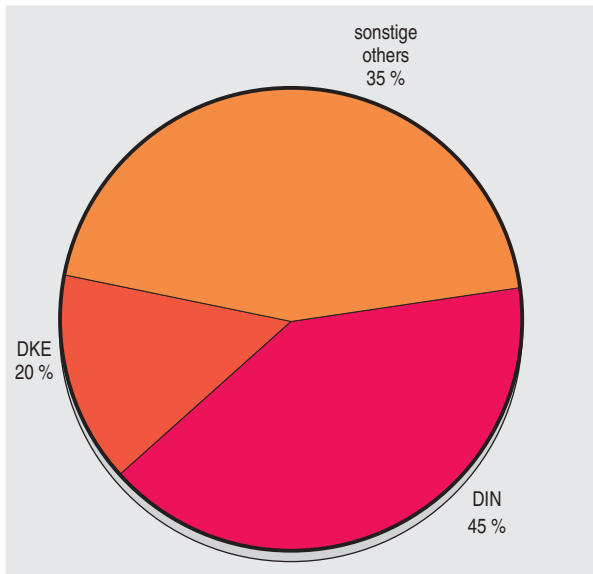
Deutscher Kalibrierdienst (DKD) • German Calibration Service (DKD)



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 28 Akkreditierungen im Berichtsjahr, denen sechs 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 28 accreditations granted in the year under review and six cancellations due, for example, to the merger of firms.

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

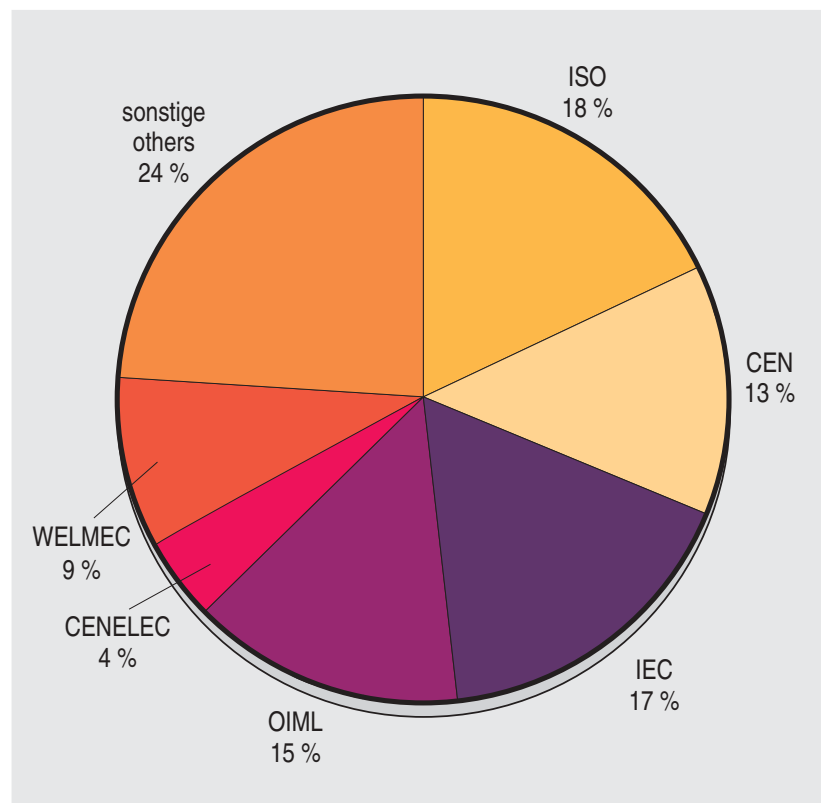


Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei nationalen Normungsvorhaben. Innerhalb des *Deutschen Instituts für Normung e. V.* (DIN) war die PTB an 186 Normenvorhaben beteiligt, bei der *Deutschen Elektrotechnischen Kommission* (DKE) bei 82 Vorhaben.

Break-up of the PTB's committee work for national standardization projects (in percent). PTB cooperated in 186 projects of the *Deutsches Institut für Normung* (DIN) and in 82 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 377 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 377 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.

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



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 Schalleistung 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 Staatsinstituten, 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

Blick in die neue Prototypwaage, mit der 1-kg-Massenormale aus Edelstahl zukünftig mit einer Reproduzierbarkeit von $0,3 \mu\text{g}$ an das nationale Kilogramm-Prototyp aus Platin-Iridium angeschlossen werden können.

1.1 Masse

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

Bei den Massekomparatoren der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* fand ein weiterer Generationswechsel statt: Nach über 17-jährigem Einsatz wurde im Juli 2005 die bisher als Prototypwaage genutzte 1-kg-Komparatorwaage der PTB durch einen hochauflösenden 1-kg-Vakuum-Massekomparator der neuesten Generation abgelöst (Bild 1).

Wesentliche Schwerpunkte der drei Arbeitsgruppen *Waagen*, *Dynamisches Wägen* und *IT-Wägetechnik* waren:

- Inbetriebnahme einer neuen Temperatorkammer für Wägezellenprüfungen in der 2-MN-Kraftnormalmeseinrichtung der PTB. Hiermit sind Prüfungen von Wägezellen nach der Internationalen Empfehlung OIML R60 bis maximal 200 t (Druckbelastung) im Temperaturbereich von $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $+55 \text{ }^\circ\text{C}$ möglich.
- Erfolgreicher Abschluss der experimentellen und theoretischen Untersuchungen zum nichtlinearen Verhalten von piezoelektrischen Sensoren.
- Fortsetzung der Arbeiten an der Revision der OIML-Empfehlung R76 für nichtselbsttätige Waagen. Der zweite, an 26 OIML-Mitgliedsländer zur Stellungnahme verschickte Entwurf beinhaltet zahlreiche, metrologisch bedeutsame Neuerungen, wie z. B. Ausweitung des modularen Konzeptes, Anforderungen an fahrzeugmontierte Waagen, Anforderungen an metrologisch relevante Software, Anpassung der EMV-Anforderungen an aktuelle IEC-Normen und das 2004 verabschiedete OIML-Dokument D11. Mit dem Abschluss der Revision der R76 ist Ende 2006 zu rechnen.

Ind Akustik

- Beginn einer neuen Industriekooperation auf dem Gebiet der „Mechatronik“. Diese Kooperation hat die systematische, wissenschaftliche Untersuchung bestehender Sensortechnologien und die Entwicklung neuer Technologien zum Ziel, mit denen vorhandene Wägesensoren zukünftig abgelöst werden könnten.
- Fortsetzung der Vorbereitungen auf die Einführung der europäischen Messgeräte-Richtlinie MID für das Gebiet der selbsttätigen Waagen (SW) durch Einbringung konkreter Vorschläge in die WELMEC-Arbeitsgruppen 2 und 8. Die Vorschläge betreffen insbesondere die reibungslose Überführung nationaler Bauartzulassungen von SW in europäische Zulassungen sowie die Vorbereitung auf das neue, in der MID vorgesehene Konformitätsbewertungsmodul „H1“.
- Mitwirkung an den vorbereitenden Arbeiten zur Umsetzung des 2004 von der OIML beschlossenen „Mutual Acceptance Arrangement“ (MAA), insbesondere durch Schulungen hinsichtlich der Anwendung der ISO/IEC 17025 auf Bauartprüfungen von Waagen und Wägezellen nach den OIML-Empfehlungen R76 und R60.

In der Arbeitsgruppe *Gravimetrie* ist ein Verfahren zur Gewinnung von Schwerfeldinformationen aus Anomalienkarten weiterentwickelt und für weite Teile Europas erfolgreich erprobt worden. Mit Hilfe eines statistischen Interpolationsalgorithmus und einer geeigneten Reduktion der Anomalien wird so die Berechnung einer örtlichen Fallbeschleunigung mit relativen Unsicherheiten $< 10^{-6}$ möglich. Hiermit konnte das Gravitationszonenkonzept von WELMEC mit hoher Zuverlässigkeit validiert und weiterentwickelt werden.

1.2 Festkörpermechanik

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

Mit Zunahme des Einsatzes mikromechanischer Systeme in der industriellen Produktion, Medizintechnik und Forschung steigen Nachfrage und Anforderung an die Qualitätssicherung für Kraftsensoren im Bereich < 2 N. Um rückführbare Messungen durchführen zu können, wurden zwei Messeinrichtungen weiterentwickelt. Die eine basiert auf der Benutzung eines klassischen Lastgehänges, die zweite – innovative – auf der Benutzung elektromagnetisch kompensierter Wägezellen. Letztere erlaubt die stufenlose Einstellung beliebiger Kräfte und zeitlicher Kraftverläufe innerhalb des Arbeitsbereichs. Die Kraft kann bis auf wenige Mikronewton konstant gehalten werden.

Im Rahmen des bevorstehenden Schlüsselvergleichs auf dem Gebiet der Drehmomentmessung wurde eine Klimakammer entwickelt und gebaut, mit deren Hilfe es möglich ist, Temperatur und Feuchte im Bereich des Transfornormals während einer Kalibrierung innerhalb der Messeinrichtung zu variieren und die entsprechenden Einflüsse zu ermitteln. Zur Verbesserung der Langzeitstabilität unter Transportbedingungen wurde eine Transportbox erstmalig unter Einsatz von Vakuum-Isolationspaneelen aufgebaut. Diese haben eine um etwa den Faktor zehn kleinere Wärmeleitfähigkeit als herkömmliche Isolationsmaterialien (wie zum Beispiel Styropor). Zusätzlich werden im Innenraum der Behälter spezielle Wärmespeicherplatten eingesetzt, die für konstante Bedingungen im Inneren sorgen.

Die 1,1 MN · m-Drehmomentmesseinrichtung ist auf reges Interesse von Seiten der Industrie gestoßen. Innerhalb des letzten Jahres haben

schon mehrere Firmen aus dem In- und Ausland Kalibrierungen nachgefragt. Ein bekannter Systemhersteller führte messtechnische Untersuchungen seiner Aufnehmer auf dieser Anlage durch.

Im Rahmen des Fachausschusses „Drehmoment“ des *Deutschen Kalibrierdienstes* (DKD) hat ein Ringvergleich anzeigender Kalibrier-einrichtungen für Drehmomentschraubwerkzeuge nach DKD-R 3-8 mit zwei Geräten stattgefunden. Alle zehn Teilnehmer kamen dabei zu vergleichbaren Ergebnissen, was zeigt, dass die Stabilität der verwendeten Einrichtungen für den Vergleich hinreichend war, die Teilnehmer die Messwerte richtig bewertet haben und das Messunsicherheitsintervall von 1 % eingehalten wird.

In der Arbeitsgruppe *Periodische Kräfte* werden die vorhandenen Messeinrichtungen hinsichtlich Messbereich bis 10 kN und Frequenzbereich derzeit bis 1000 Hz weiterentwickelt und optimiert. Um den vielfältigen Anforderungen in der Praxis gerecht zu werden, gewinnt die Entwicklung neuartiger Kraftaufnehmer und Messverfahren für dynamische Kräfte eine zunehmende Bedeutung. Die PTB untersucht und entwickelt derzeit neue Verfahren und Sensoren, um diesen Anforderungen gerecht zu werden.

Am Ionenexperiment konnte erstmalig eine wägbare Masse von Wismut-Ionen akkumuliert werden. Es wurden mehrere Versuche durchgeführt, in denen bis zu 40 mg aufgesammelt wurden. Dabei konnte eine relative Messunsicherheit von ca. $5 \cdot 10^{-4}$ reproduziert werden. Dies wurde ermöglicht durch die völlige Rekonstruktion des Ofens der Ionenquelle, mit der nun ein genügend hoher Dampfdruck für Wismut mit Temperaturen bis zu 1000 °C erzeugt werden kann. Darüber hinaus wurde die Strahlführung für eine maximale Transmission von Wismut (ca. 50 %) optimiert. Damit sind zurzeit Ströme im Ionen-Kollektor von 2,5 mA möglich (Bild 2). Schließlich wurde eine Kollektoranordnung, bestehend aus einem Kollektor-Positioniersystem, einem zylinderförmigen Kollektor und einem vorgeschalteten Blenden-system zur Unterdrückung von Sekundärelektronen sowie zur Strahlpositionskontrolle aufgebaut. Der Kollektor wurde außerdem mit Glasmonitoren zur Messung der Sputterverluste versehen.

1.3 Kinematik

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

In der Arbeitsgruppe *Beschleunigung* wurde bei der 5-km/s²-Stoßbeschleunigungs-Normalmeseinrichtung durch Optimierung des Federantriebs die untere Grenze für den Spitzenwert der Stoßbeschleunigung auf 25 m/s² (bisher 150 m/s²) gesenkt, was einem seit Jahren bestehenden Bedarf bei einigen DKD-Laboratorien entspricht.

Die bei den Beschleunigungs-Normalmeseinrichtungen der PTB verwendeten Spannungsnormale wurden in Kooperation mit der Abteilung *Elektrizität* erstmals auch für tiefe Frequenzen bis herab zu 0,1 Hz (bisher 10 Hz) kalibriert. Damit ist der gesamte Frequenzbereich, für den Kalibrieranforderungen für Beschleunigungsaufnehmer bestehen, ohne Interpolationen abgedeckt.

Im Rahmen des im Mai 2005 erfolgreich abgeschlossenen EU-Projekts LAVINYA wurde ein Informationsnetzwerk über Erfahrungen beim Einsatz und bei der Kalibrierung von Laservibrometern geschaffen und ein Entwurf für eine entsprechende Norm (ISO 16063-41: „Calibration of Laser-Vibrometers“) erstellt.

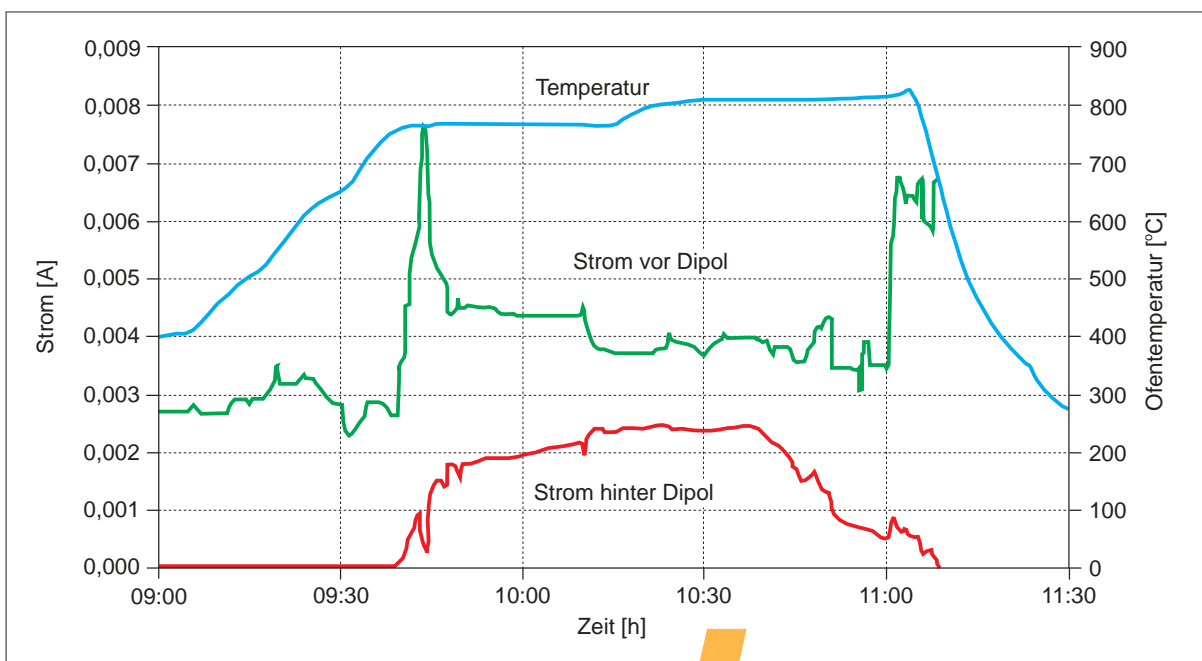
Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte werden zunehmend an Wechselverkehrszeichenanlagen (WVZ) angebunden, bei denen der angezeigte Wert der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von einem Zentralrechner gesteuert wird. Bei der Bauartzulassung ist die korrekte Berücksichtigung des sich ändernden Grenzwertes – auch bei realistischen Datenübertragungsfehlern – sicherzustellen. Zur Prüfung werden Tests im Realverkehr durch umfassende Tests mit einem speziell entwickelten Simulator ergänzt, mit dem sich eine Vielfalt von möglichen Stellzustandsänderungen und auch von Datenübertragungsfehlern in kurzer Zeit simulieren lässt.

An der 20-kN-Kraftstoß-NME wurden mit drei verschiedenen DMS-Kraftaufnehmern Untersuchungen zur Bestimmung ihrer Resonanzfrequenzen durchgeführt und mit anderen Messverfahren (z. B. Anregung durch



Bild 1: Übergabe der neuen Prototypwaage am 8. Juli 2005 von links nach rechts: Dr. Roman Schwartz, Leiter des PTB-Fachbereichs 1.1 Masse; Roland Nater, Leiter des Geschäftsbereichs Metrologie der Mettler-Toledo AG; Martin Firlus, Mitarbeiter der PTB-Arbeitsgruppe 1.11 Darstellung Masse

Bild 2: Temperatur des Wismutfens und die Ionenströme vor und hinter dem Dipolmagneten als Funktion der Messzeit



einen Hammerstoß) und mit FEM-Modalanalysen verglichen. Dabei zeigte sich, dass sich dieser zur dynamischen Charakterisierung von Kraftaufnehmern häufig verwendete Parameter nur mit den ergänzenden FEM-Modalanalysen zuverlässig bestimmen lässt.

Für Druckimpulse mit einer Amplitude bis 20 MPa und einer Impulsdauer von 1 ms wurde eine neue pneumatische Druckimpuls-Kalibriereinrichtung für Druckaufnehmer mit größerem Totvolumen (einige cm³) entwickelt (Bild 3). Sie zeichnet sich gegenüber der im Vorjahr gefertigten Anlage durch ein größeres Kompressionsvolumen aus und entspricht so den Wünschen der Forschung und Entwicklung der Dieselmotorentchnik und im Ex-Schutz.

Für die hydraulische Druckstoßkalibriereinrichtung mit Druckimpulsen mit einer Amplitude bis 800 MPa wurden die Stempelposition und die Geschwindigkeit der Fallkugel erstmals interferometrisch erfasst – ein wesentlicher Schritt zur Fortentwicklung der Anlage zu einer Normalmesseinrichtung für den dynamischen Druck.

Für die Beschlussverordnung, die aktuell bei der EU zur Notifizierung liegt, konnten insbesondere die Anlagen für die technischen Anforderungen spezifiziert und die entsprechenden Prüfapparaturen (für Elektroimpulsgeräte in Zusammenarbeit mit der Abteilung 2 *Elektrizität*) bzw. Verfahren (insbesondere für Bauartkontrollen von Schussapparaten mit Zwischenkolben) entwickelt und angewendet werden.

In einem von der ESA/ESTEC geförderten Kooperationsprojekt zur Messung der kinetischen Energie schneller Mikropartikel im Weltraum wurde ein kalorimetrischer Detektor entwickelt und erfolgreich mit einschlagenden Hochgeschwindigkeitspartikeln getestet (Bild 4). Der von der PTB entworfene Messaufbau verwendet ein neues Thermopile-Array des IPHT in Jena und Metallfolien als Partikelabsorber.

1.4 Gase

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

Seit dem 4. Mai 2004 wird von den deutschen, holländischen und französischen metrologischen Staatsinstituten (PTB, LNE und NMi-VSL) ein einheitlicher Gaskubikmeter für Erdgas unter hohen Drücken bereitgestellt, der als harmonisierter europäischer Gaskubikmeter bezeichnet wird. Bei der Harmonisierung wird ein gewichteter Mittelwert aus den drei unabhängigen Darstellungen der beteiligten Partner gebildet, der stabiler ist und eine kleinere Unsicherheit hat als die individuellen Einzeldarstellungen in den beteiligten Institutionen.

Das Verfahren der gewichteten Mittelwertbildung wurde 1999 zwischen PTB und NMi-VSL begonnen und am 4. Mai 2004 durch die Aufnahme des LNE in Frankreich abgeschlossen. Die Realisierung des harmonisierten Gaskubikmeters erfolgt in den Hochdruckprüfständen pigsar, Bergum und LADG der drei NMIs.

Im Rahmen internationaler Aktivitäten des CIPM/BIPM zur gegenseitigen Anerkennung von Kalibrierzertifikaten wurde im Hochdruck-Erdgasbereich ein Key Comparison organisiert, der im April 2005 abgeschlossen wurde. Der erhaltene Referenzwert gilt als die weltweit beste Realisierung der jeweiligen Messgröße. Nach dem Schlüsselvergleich ist der europäische harmonisierte Erdgaskubikmeter identisch mit diesem Referenzwert.

Nach dem erfolgreichen Testbetrieb des optischen Primärnormals für Erdgas auf dem Hochdruckprüfstand pigsar wird jetzt die Erweiterung der LDA-Messtechnik hinsichtlich einer detaillierten Untersuchung der Strömungs- und Düsengrenzschichtprofile am LDA-Düsenaustritt vorgenommen, um die angestrebte Messunsicherheit von 0,1 % für den Volumendurchfluss sicherzustellen. Hierzu sind sowohl LDA-Liniensensoren als auch traversierbare LDA-Systeme vorgesehen.

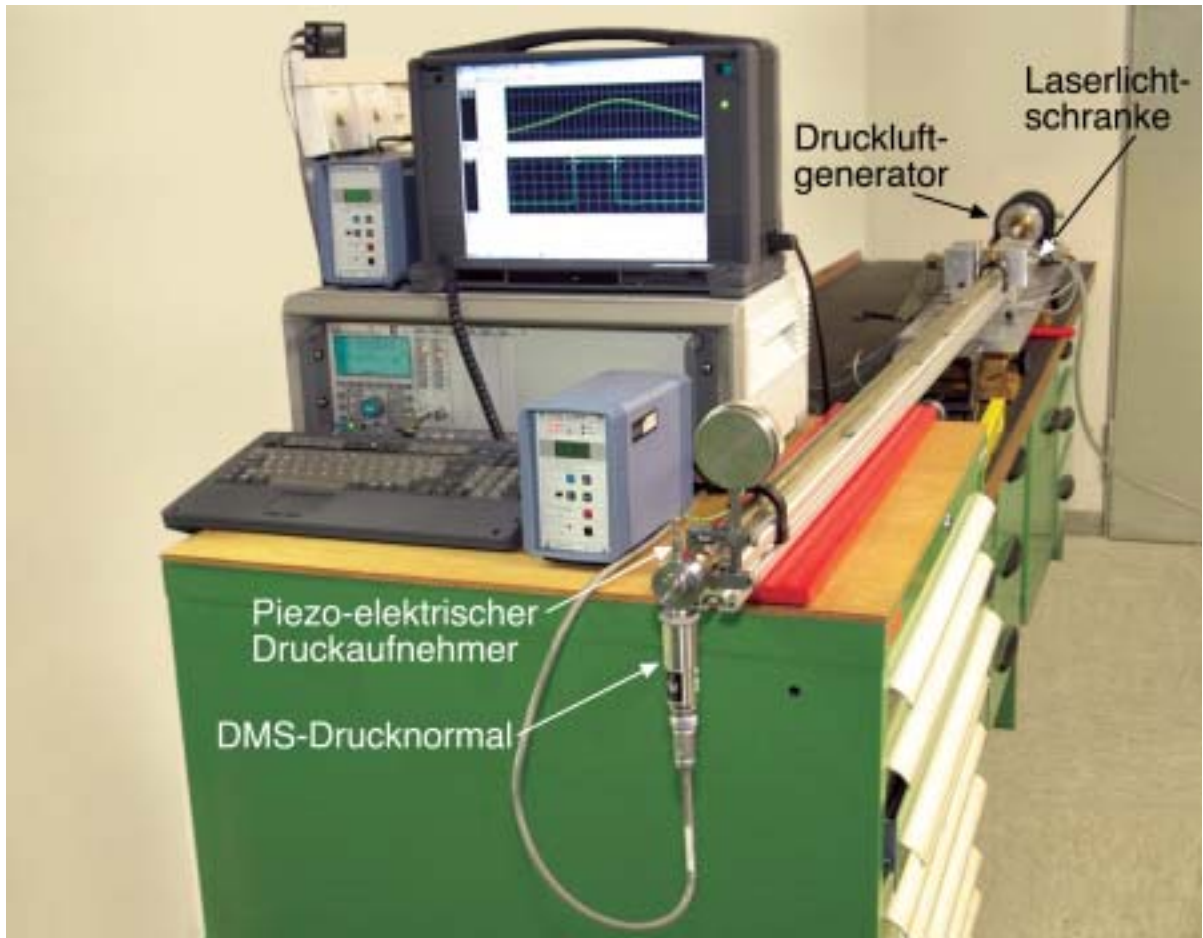


Bild 3: Neuartige zweistufige, pneumatische Druckimpuls-Kalibriereinrichtung mit Druckimpulsen von

20 MPa Amplitude und 1 ms Dauer für Druckaufnehmer mit großem Totvolumen

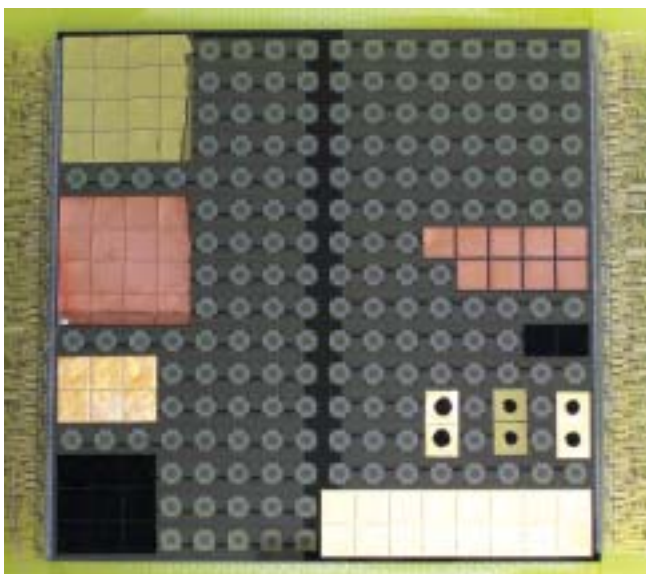


Bild 4a: (16 × 16)-Thermopile-Array (je Sensor 100 Thermoelemente) mit verschiedenen metallischen Partikelabsorberfolien

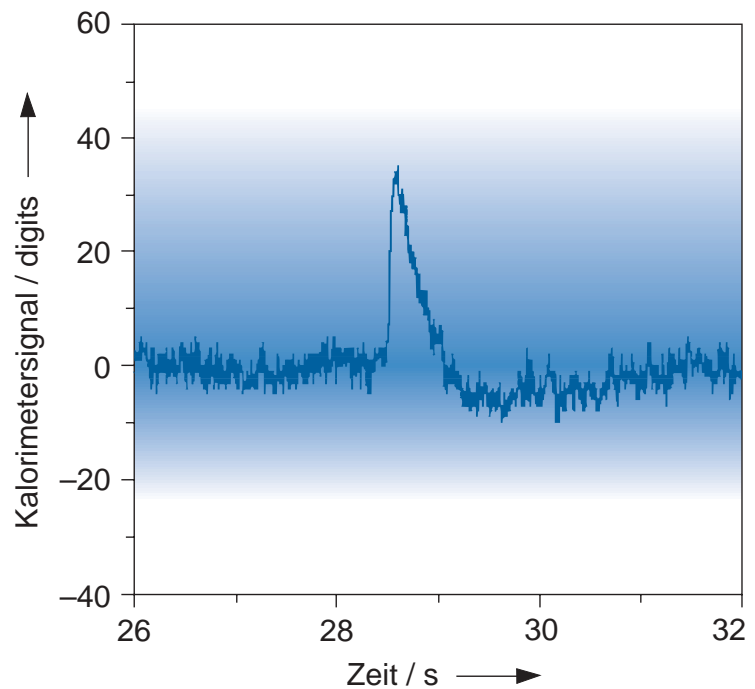


Bild 4b: Signalverlauf bei einem einschlagenden Eisenpartikel von 140 nJ kinetischer Energie (Masse: $1,2 \cdot 10^{-14}$ kg, Geschwindigkeit: 4,9 km/s)

In drittmittelgeförderten Vorhaben und Kooperationen laufen Entwicklungen von miniaturisierten LDA-Systemen für die mehrkomponentige Strömungsgeschwindigkeitsmessung bis zur Entwicklung von Ganzfeldmessverfahren für die zeitaufgelöste Untersuchung von Strömungsgeschwindigkeitsfeldern in Rohrleitungen und Windkanälen. Insbesondere kann mit einem neu entwickelten Verfahren die bei bisherigen Doppler-Global-Velocimeter (DGV)-Systemen erforderliche Referenzkamera entfallen und die Messunsicherheit für die Geschwindigkeitsfeldmessung gegenüber konventionellen Systemen drastisch reduziert werden. Mit der neuen FSK (Frequency Shift Keying)-DGV-Technik konnten bei reduziertem technischem Aufwand Ganzfeldmessungen instationärer Geschwindigkeitsfelder erstmals mit einer zeitlichen Auflösung von 0,5 s und einer Geschwindigkeitsauflösung von 0,1 m/s (bisher ca. 4 m/s) durchgeführt werden.

Ein neues geometrisches Primärnormal auf der Basis des in der PTB entwickelten und patentierten Prinzips des Durchflusskomparators wurde für den Durchflussbereich von 0,02 m³/h bis 4 m³/h aufgebaut (Bild 5).

Auf Grund der mechanischen Konzeption wird es möglich sein, Kalibrierungen mit verschiedenen nicht aggressiven Gasen bis zu einem Druck von 10 bar mit einer Unsicherheit von ca. 0,05 % ($k = 2$) durchzuführen.

Wesentliche Vorteile gegenüber konventionellen Kolbengeräten sind:

- stationäre Druck- und Temperaturverhältnisse vor und während einer Kalibrierung
- sehr geringe Unsicherheit des geometrischen Referenz-Volumens
- Prüfbarkeit der inneren Dichtigkeit während einer Kalibrierung und
- Kalibrierung von Prüflingen, die selbst einen Durchfluss vorgeben (kritische Düsen, Durchflussregler bzw. Massestromregler).

Hauptanwendungsgebiet wird die Kalibrierung von Durchflussmessgeräten wie Blenden, Laminardurchflussmessern, thermischen Massestrommessern, Durchflussreglern (Massestromregler) und kritischen Düsen sein.

1.5 Flüssigkeiten

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

Die Aktivitäten des Fachbereichs konzentrieren sich entsprechend auf drei große Aufgabengebiete – das gesetzliche Messwesen in Form von Bauartzulassungen nach dem Eichgesetz und die damit verbundene Vorschriften- und Gremienarbeit, auf das Hydrodynamische Prüffeld als hochgenaue Flüssigkeits-Normalmesseinrichtung sowie auf Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Schaffung leistungsfähiger Transfernormale.

Nach wie vor liegen etwa 50 % der Tätigkeiten des Fachbereichs im Geschäftsbereich Messtechnik für die Gesellschaft. Die hier in der Arbeitsgruppe *Flüssigkeitsmessgeräte* zu bearbeitenden Bauartzulassungen von Messgeräten und Messanlagen zeigen eine ausgeprägte Tendenz zu zunehmender Komplexität, verstärktem Einsatz elektronischer Bausteine und umfangreicher Software. Fragen der Manipulationssicherheit und deren Überprüfbarkeit rücken in diesem Zusammenhang immer mehr in den Mittelpunkt ebenso wie die Entwicklung völlig neuartiger Messtechnik, die auf modernen Sensoren mit automatischer Steuerung und Überwachung der Messprozesse basiert und die Anforderungen des gesetzlichen Messwesens noch sicherer erfüllt. Dazu gehört zum Beispiel der Einsatz von automatischen Füllstandssensoren zur Heizölmessung auf Tankwagen. Das Erreichen der Eichfähigkeit solcher Messanlagen wurde dabei von der PTB maßgeblich unterstützt. Derzeit wird die entsprechende internationale Empfehlung OIML R 80 „Road and rail tankers“ unter gemeinsamer Federführung von PTB und SLM der Slowakei grundlegend überarbeitet, um die Anforderungen des gesetzlichen Messwesens schnell mit solch neuen Entwicklungen in Einklang zu bringen.

Einer der Schwerpunkte der wissenschaftlichen Aktivitäten der Arbeitsgruppe *Hydrodynamisches Prüffeld* (HDP) beschäftigt sich mit der Untersuchung des Einflusses der Prozessparameter Druck, Temperatur und Durchfluss auf das Messverhalten und die Genauigkeit der zu prüfenden Flüssigkeitsmessgeräte. Das HDP bietet hierfür weltweit einzigartige

Voraussetzungen, da diese Parameter einerseits in weiten Bereichen variieren, aber auch definiert und in hohem Maße konstant gehalten werden können. Notwendig sind diese Untersuchungen aktuell auch für eine sichere und nachvollziehbare Bewertung internationaler Vergleichsmessungen, wo derzeit nachweisbar extremer Handlungsbedarf besteht.

Bezüglich der Entwicklung medienunabhängiger Transfornormale wurde ein neues dynamisches Messverfahren entwickelt und zum Patent angemeldet, das weitgehend viskositätsunabhängig arbeitet. Gleichzeitig wurden erste Untersuchungen auf dem Gebiet der Strömungsdiagnostik und Strömungskonditionierung am Einbauort der Transfornormale unternommen. Dies betraf sowohl die Aufnahme von Geschwindigkeitsprofilen in relevanten Rohrleitungsteilen mit Laser-Doppler-Anemometern (Bild 6) als auch Versuche mit Gleichrichtern in speziellen Anordnungen mit geringem Druckverlust. Außerdem wurden erste positive Ergebnisse im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens von PTB und Eichbehörden zur Entwicklung von Transfornormalen zur Prüfung von Haus- und Wohnungswasserzählern „vor Ort“ erzielt. Die technische Realisierbarkeit solcher Transfornormale wurde anhand zahlreicher konkreter Prüfungen nachgewiesen und es wurden entsprechende Verfahrensanweisungen und Prüfablaufpläne erarbeitet.

1.6 Schall

Der Fachbereich *Schall* besteht aus den Arbeitsgruppen *Darstellung Schalleinheit, Ultraschall und Medizin* und *Schallfelder*.

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 medizinischen und sicherheitsrelevanten Zielsetzungen im Mittelpunkt der Arbeit.

Schallkalibratoren erzeugen bei bestimmten Frequenzen akustische Signale mit bekanntem und hochgenauem Schalldruckpegel und werden als Transfornormal für die Schalldruckeinheit eingesetzt. Der Eichpflicht

unterliegend muss eine Bauartzulassung durchgeführt werden, die der erst kürzlich deutlich erweiterten Norm IEC 60942 genügt. Um die Anforderungen umsetzen zu können, wurde ein neuer, auch transportabel einsetzbarer Messplatz (Bild 7) konzipiert. Dazu wurde eine Software entwickelt, die es ermöglicht, die Messdaten entsprechend den in der Norm beschriebenen Prüfverfahren automatisch zu erfassen und hinsichtlich der Einhaltung der Fehlergrenzen zu überprüfen. Nach einer Übergangszeit, in der auf dem „alten“ und dem „neuen“ Messplatz parallel gemessen wurde, zeigte sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Beim Schalldruckpegel werden Messunsicherheiten von bis zu 0,05 dB erreicht. Damit ist eine verlässliche und effektive Prüfung und Kalibrierung von Schallkalibratoren nach IEC 60942 in der Zukunft gesichert.

Ultraschall-Physiotherapie ist eine weit verbreitete medizinische Anwendung. In Normen ist festgelegt, dass zur Charakterisierung des abgegebenen Ultraschallfelds die in Wasser ermittelte Ultraschalleistung anzugeben ist. Zur Erleichterung und Verbesserung der Rückführung dieser Messung wurde in einer internationalen, von der EU geförderten Kooperation ein tragbares Ultraschall-Leistungsnormale (PPS) entwickelt und erprobt. Mit seiner Hilfe kann eine Kalibrierung der „vor Ort“ vorhandenen Technik erfolgen. Außerdem erlaubt eine spezielle Software auch eine Überprüfung des gesamten Messprozesses. Dafür legt das federführende Institut durch „geheime“ Programmierung fest, welche Leistungswerte abgegeben werden. Der Anwender hat diese Leistungen mit seinem Messgerät zu ermitteln und darüber zu berichten, ohne die Werte vorab zu kennen. Das Gerät steht jetzt Interessenten gegen Gebühr zur Verfügung.

Ultraschall im Frequenzbereich 20 kHz bis 200 kHz wird intensiv für die Reinigung von Teilen aller Art angewandt. Wegen der komplizierten Kavitationsvorgänge, die die Reinigungswirkung hervorbringen, kann bisher die aktuelle Reinigungswirkung jedoch nur geschätzt werden. Der messtechnische Zugang durch die Charakterisierung des Schallfelds erschließt die Möglichkeit zum genaueren Verständnis der komplizierten Vorgänge und ihrer Beschreibung und Kon-

trolle. Im Rahmen eines von der AiF geförderten Projekts konnten durch den Einsatz geeigneter Sensoren zur räumlichen Erfassung der Leistungsschallfelder und durch die Entwicklung von Verfahren zur Wirkungsbestimmung erstmals direkte räumliche Korrelationen zwischen spektralen Schallfeldparametern und der erreichten Reinigungswirkung bestimmt werden.

1.7 Angewandte Akustik

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

Ein Schwerpunkt der wissenschaftlichen Aktivitäten lag auf der Ermittlung von Unsicherheiten bei bauakustischen Messungen. Neben der summarischen Betrachtung aller Unsicherheitseinflüsse, für die eine Vielzahl von Ringversuchen und Vergleichsmessungen zur Auswertung kamen, wurden auch einzelne Unsicherheitskomponenten separat ermittelt. Darüber hinaus führten Untersuchungen an verkleinerten bauakustischen Prüfstandsmodellen zu wesentlichen Erkenntnissen zur Messung der Längsdämmung und zur Berücksichtigung der Dämpfung, außerdem über den Einfluss der Körperschallmoden des Prüflings sowie für die Berücksichtigung der Dämpfung. Im Zusammenhang mit der Dämpfung wurden auch Versuche durchgeführt, um die komplexen Materialparameter der in den Modellen verwendeten Materialien frequenzabhängig zu ermitteln (s. Bild 8). Außerdem wurde im Rahmen eines umfangreichen, vom *Deutschen Institut für Bautechnik* finanzierten Verbundprojekts ein Vorschlag für den Leichtbau-Katalog der neuen DIN 4109 erarbeitet, der nach seiner bauaufsichtlichen Einführung die Grundlage für bauakustische Prognosen darstellen wird.

Zur Feststellung der Eichfähigkeit von Schallpegelmessgeräten wurde ein neuer automatisierter Messplatz entwickelt, mit dem diese Messgeräte entsprechend der Norm DIN EN 61672-2 elektrisch überprüft werden können und der ab Januar 2006 für Zulassungsprüfungen verwendet wird. Dar-

über hinaus sind erste Voruntersuchungen durchgeführt worden, die klären sollen, für welchen Frequenzbereich eine Freifeld-Reziprozitätskalibrierung im großen reflexionsarmen Messraum der PTB durchgeführt werden kann. Bearbeitet wurde weiterhin die Fragestellung, wie das Warnsignal eines heranfahrenden Rettungswagens an eine Kreuzung im Innern eines Personenkraftwagens von einer Fahrerin oder einem Fahrer wahrgenommen wird. Die gemessenen Werte zeigen, dass häufig die Warnwirkung im Fahrzeuginnern nur mit Einschränkungen oder gar nicht vorhanden ist. Mit Hilfe einer Auralisation sind die Schallereignisse hörbar gemacht worden, so dass sie beispielsweise für Fahrerschulungen verwendet werden können.

Schwerpunkt der raumakustischen Tätigkeit waren Untersuchungen zum Einfluss von tieffrequenten Raumresonanzen in kleinen Räumen auf das Schallfeld sowie die raumakustische Qualität. Bei diesen Untersuchungen kamen Methoden der Modalanalyse und der Auralisation sowie subjektive Bewertungstests zur Anwendung. Darüber hinaus wurden Schallschutzschirme gegen eine zu hohe Lärmbelastung im Orchester entwickelt.

Auf dem Gebiet der Wärmeleitung wurden die seit Jahren erfolgreichen Arbeiten zur Entwicklung neuer transienter Messverfahren für thermische Transportgrößen fortgesetzt. Eine dritte Messgeräte-Lizenz wurde an einen schwedischen Hersteller vergeben; ein deutscher Hersteller verhandelt um die Lizenz eines weiteren Patents. Zudem wurde im Auftrag des *Deutschen Instituts für Bautechnik* zusammen mit 18 in- und ausländischen Partnern aus Forschung und Industrie ein Referenzmaterial für die Wärmeleitfähigkeit qualifiziert. Es unterstützt vorwiegend die europäischen Prüfinstitute im Bereich Bauphysik. Außerdem haben Präzisionsmessungen an verschiedenen Nanoflüssigkeiten gezeigt, dass die erwartete Verbesserung ihrer Wärmeleitfähigkeit bisher nicht erreicht werden konnte.



Bild 6: Messanordnung zur Untersuchung von Geschwindigkeitsprofilen, bestehend aus einem Rohrpassstück in 50 mm Nennweite mit brechzahl- und konturangepassten Fenstern und dem LDA-Messkopf

Bild 8: Versuchsaufbau zur Bestimmung des komplexen Elastizitätsmoduls von Silikon im Frequenzbereich von 10 Hz bis 600 Hz bestehend aus einem elektrodynamischen Schwingerreger (ganz oben), der Silikonprobe (weißer Stab in der Mitte) und zwei piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern mit Anschlusskabeln (an den Enden des weißen Stabes).

Bild 5: Der neu aufgebaute Durchflusskomparator bis 4 m³/h

Bild 7: Schallkalibrator (schwarze Box, rechts im Vordergrund), der auf ein Referenzmikrofon (silberner, senkrechter Zylinder, rechts im Vordergrund) aufgesteckt wurde



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

PTB erhält neue Prototypwaage

Nach über 17-jährigem Einsatz wird die bisher als Prototypwaage genutzte Komparatorwaage der PTB durch einen hochauflösenden 1-kg-Vakuum-Massekomparator der neuesten Generation abgelöst.

(M. Borys, FB 1.1, michael.borys@ptb.de)

Akkumulation von 40 mg Wismut

Mit der Ionenstrahlapparatur des Experimentes Ionenakkumulation wurden zum ersten Mal Wismutionen in einem Kollektor aufgefangen. Ihre Masse von 40 mg wurde mit einer relativen Unsicherheit von $5,2 \cdot 10^{-4}$ gewogen. Der Ionenstrom wurde integriert und die entsprechende Ladung mit einer relativen Unsicherheit von $7,3 \cdot 10^{-6}$ ermittelt. (C. Schlegel, FB 1.2, christian.schlegel@ptb.de)

Laserinterferometrische Messung der Störbewegungen von Beschleunigungserregern und darauf angepasste Kalibrierverfahren

Mit 3-D-Laservibrometern und Scanning-Vibrometern wurden elektrodynamische Schwinngererger auf Resonanzen und Störschwingungen bei hohen Frequenzen (bis 50 kHz) untersucht. Als Ergebnis konnte durch angepasste Messverfahren der Einfluss solcher Störungen bei der Primärkalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern deutlich reduziert werden. (Th. Bruns, FB 1.3, thomas.bruns@ptb.de)

Doppler-Global-Geschwindigkeitsfeldmessungen mit nur einer Kamera

Mit einem neu entwickelten FSK (Frequency Shift Keying)-Verfahren kann die bei bisherigen Doppler-Global-Velocimeter (DGV)-Systemen erforderliche Referenzkamera entfallen und die Messunsicherheit für die Geschwindigkeitsfeldmessung gegenüber konventionellen Systemen drastisch reduziert werden. Damit konnten bei reduziertem technischem Aufwand Ganzfeldmessungen instationärer Geschwindigkeitsfelder erstmals mit einer zeitlichen Auflösung von 0,5 s und einer Geschwindigkeitsauflösung von 0,1 m/s (bisher ca. 4 m/s) durchgeführt werden. Weiterhin wurden in einer Rohrströmung bereits Wirbelstrukturen mit Rotationsgeschwindigkeiten im Bereich von 0,3 m/s gemessen.

(H. Müller, FB 1.4, harald.mueller@ptb.de)

Das Hydrodynamische Prüffeld – Nutzung für verbesserte Gerätecharakterisierungen

Mit einer hohen Temperaturstabilität und der Möglichkeit, die Temperatur des Durchflussmediums über einen weiten Bereich einzustellen, bietet das Hydrodynamische Prüffeld als hoch genaue Durchfluss-Normalmessenrichtung qualitativ neue Möglichkeiten für genauere Messgerätekalibrierungen und verringert die Messunsicherheit bei Anschluss- und Vergleichsmessungen.

(R. Engel, FB 1.5, rainer.engel@ptb.de)

Der Einfluss von Körperschall-Moden auf die Schalldämmung

Durch Modellmessungen konnte ermittelt werden, dass unterschiedliche Frequenzlagen der Körperschallmoden eines bauakustischen Prüflings zu einer Unsicherheit der gemessenen Schalldämmmaße von ca. 2 dB bei tiefen Frequenzen führen. (V. Wittstock, FB 1.7, volker.wittstock@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Reduzierung der Messunsicherheit von Kraft-Normalmessenrichtungen

Die relativen Messunsicherheiten der Kraft-Normalmessenrichtungen der PTB betragen $< 2 \cdot 10^{-5}$ für direkte Massewirkung und $< 1 \cdot 10^{-4}$ für hydraulische Übersetzung. Durch theoretische und messtechnische Untersuchungen wurde gezeigt, dass insbesondere bei einem Key Comparison geringere Messunsicherheiten erreicht werden können. (R. Kumme, FB 1.2, rolf.kumme@ptb.de)

Große Nachfrage für Kalibrierungen auf der 1,1-MN · m-Dm-NME

Mit der Inbetriebnahme der 1,1-MN · m-Dm-NME besteht erstmals weltweit die Möglichkeit, Drehmomentmessgeräte in diesem Messbereich nicht nur rechnerisch zu spezifizieren, sondern auch zu kalibrieren. Anfragen zu Kalibrierungen und zur Vorbereitung solcher Messungen kommen aus den Bereichen Flugzeugindustrie, Schiffbau, Windenergieanlagen, Gasturbinen und anderen Bereichen der mechanischen Leistungsmesstechnik. (D. Peschel, FB 1.2, diedert.peschel@ptb.de)

Patentierter Durchflusskomparator für Durchflüsse von 0,02 m³/h bis 4 m³/h aufgebaut

Für den Durchflussbereich von 0,02 m³/h bis 4 m³/h wurde ein neuartiges volumetrisches Primärnormal aufgebaut, das als Durchflusskomparator konzipiert wurde. Nach Abschluss der Inbetriebnahme können in einem erweiterten Druckbereich (bis 10 bar, inerte Gase) Rückführungen mit verringerten Unsicherheiten durchgeführt werden.

(R. Kramer, FB 1.4, rainer.kramer@ptb.de)

Neuer Messplatz zur Bauartprüfung und Kalibrierung von Schallkalibratoren

Der Aufbau eines neuen Messplatzes ermöglicht die Automatisierung der Prüf Abläufe bei der Bauartprüfung und Kalibrierung von Schallkalibratoren.

(M. Brandt, FB 1.6, manfred.brandt@ptb.de)

Quantitative Bestimmung der Reinigungswirkung von Ultraschallbädern

Durch die Erfassung spektraler Schallfeldparameter direkt im Reinigungsbad kann die Effizienz von ultraschallgestützten Reinigungsprozessen bestimmt und optimiert werden. (K.-V. Jenderka, FB 1.6, klaus-vitold.jenderka@ptb.de)

Längsschalldämmungsmessung in normalen Schalldämmprüfständen

Spezielle Prüfstände zur Messung der Schall-Längsdämmung liegen bei vielen Prüfstellen nicht vor. Diese behelfen sich, indem sie den Prüfling in normale Prüfstände einbauen. Die PTB hat diese Vorgehensweise näher untersucht. (M. Schmelzer, FB 1.7, martin.schmelzer@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Neue Temperierkammer zur Prüfung von Wägezellen bis 200 t

Eine neuartige Temperierkammer in Verbindung mit einer Kraft-Normalmesseinrichtung (K-NME) mit Direktbelastung ermöglicht der PTB die Prüfung und Zertifizierung von Wägezellen mit Nennlasten bis zu 200 t. Die Einrichtung ist in Europa einzigartig und bietet Herstellern und Kunden erstmals die Möglichkeit der Zertifizierung von Wägezellen mit sehr großen Nennlasten, wie sie beispielsweise in der Schwerindustrie zum Einsatz kommen.

(O. Mack, FB 1.1, oliver.mack@ptb.de)

Listen der PTB-Prüfungen und Zulassungen gemäß §§ 7, 8 und 9 Beschussgesetz im Internet

Die Hersteller, Anwender und Vertreiber von Geräten, für deren Zulassung bzw. Prüfung gemäß den o. a. §§ die PTB zuständig ist, können die entsprechenden umfangreichen und laufend aktualisierten Listen inzwischen über das Internet abrufen. Die hohe Anzahl der Abrufe (monatlich mehr als 3000) dokumentiert den großen Bedarf.

(E. Franke, FB 1.3, ernst.franke@ptb.de)

PTB-Anforderungen für Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte

Um der PTB und den Herstellern von Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten eine transparente Basis für die Zulassungspraxis zu liefern, wurden die bestehenden PTB-Anforderungen entsprechend dem aktuellen Stand der Technik überarbeitet. Insbesondere wurden Anforderungen an mehrzielfähige Geräte, die Anbindung an Wechselverkehrszeichen und die Verwendung von Digitalkameras spezifiziert.

(F. Jäger, FB 1.3, frank.jaeger@ptb.de)

Vor-Ort-Prüfungen von Wohnungs- und Hauswasserzählern bald möglich

Erste positive Ergebnisse eines gemeinsamen Forschungsvorhabens von PTB und Eichbehörden zeigen die technische Realisierbarkeit von Wasserzählerprüfungen am Einbauort und bilden die Grundlage für eine entsprechende Erweiterung der existierenden Vorschriften für Befundprüfungen.

(G. Wendt, FB 1.5, gudrun.wendt@ptb.de)

Impulskraft-Durchflussmessgerät

Mit einem zum Patent angemeldeten neuartigen Durchflussmessgerät kann mittels einer Impulskraftmessung der Massenstrom einer Flüssigkeit unabhängig von seinen Stoffeigenschaften ermittelt werden.

(H. Többen, FB 1.5, helmut.toebben@ptb.de)

Tragbares Leistungsnormale zur Rückführung von Messeinrichtungen für Ultraschall-Physiotherapiegeräte

In einer internationalen Kooperation mit EU-Förderung wurde ein tragbares Leistungsnormale zur Rückführung von Messeinrichtungen für Ultraschall-Physiotherapiegeräte erfolgreich entwickelt und erprobt.

(K. Beissner, FB 1.6, klaus.beissner@ptb.de)

Akustische Wahrnehmung von Warnsignalen heranfahrender Rettungswagen

Untersuchungen haben gezeigt, dass häufig die Wirkung des Warnsignals eines heranfahrenden Rettungswagens im Fahrzeuginnern nur mit Einschränkungen oder gar nicht vorhanden ist. Die Schalldruckpegel im Fahrzeuginnern sind stark vom PKW selbst abhängig. Insbesondere bei Neuwagen und in der gehobenen Fahrzeugklasse wird großer Wert auf Schalldämmung von außen gelegt, wodurch die Hörbarkeit von externen Warnsignalen noch deutlich verringert wird.

(D. Ratschko, FB 1.7, dirk.ratschko@ptb.de)

Große Unterschiede beim Vergleich von Auralisationsergebnissen

Der Vergleich der Ergebnisse einer Auralisation mit verschiedenen Raumsimulationsprogrammen ergab große Unterschiede, die auf die Anwendung unterschiedlicher Kunstkopfmikrofone sowie Unterschiede in den Ray-tracing-Verfahren als auch in den Faltungsalgorithmen zurückzuführen sind.

(I. Bork, FB 1.7, ingolf.bork@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Revision der weltweit verwendeten Waagennorm R76 weit vorangeschritten

Die Arbeiten an der Revision der weltweit angewendeten Empfehlung „R76“ der „Organisation Internationale de Métrologie Légale“ (OIML) für nichtselbsttätige Waagen sind bereits weit vorangeschritten. Der voraussichtlich letzte Entwurf wird im September dieses Jahres fertig gestellt und zur Abstimmung an die Mitglieder des OIML-Arbeitsausschusses für nichtselbsttätige Waagen verteilt.

(M. Denzel, FB 1.1, michael.denzel@ptb.de)

Key Comparison Drehmoment

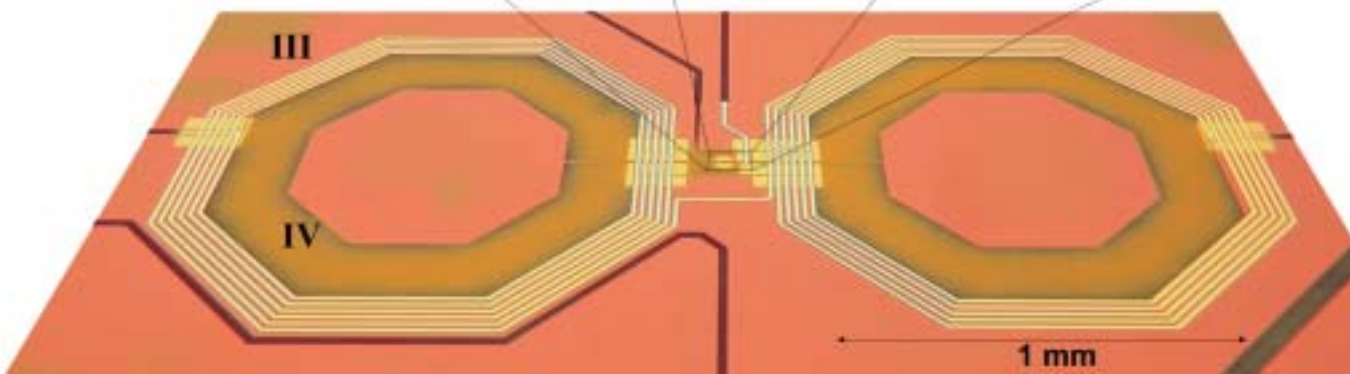
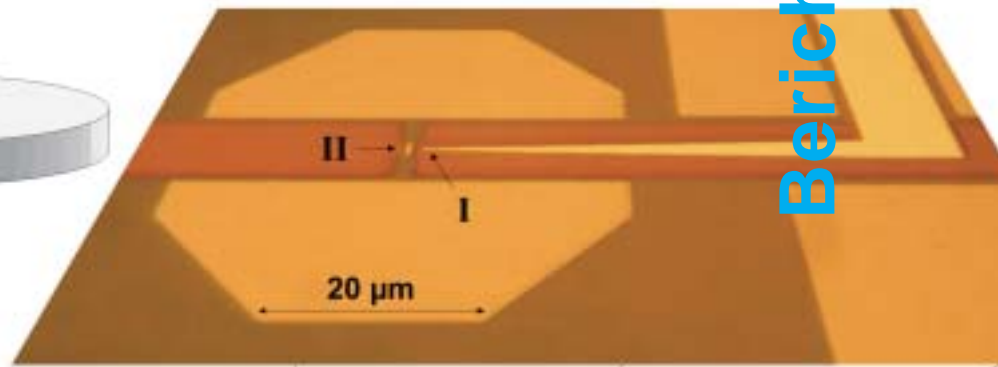
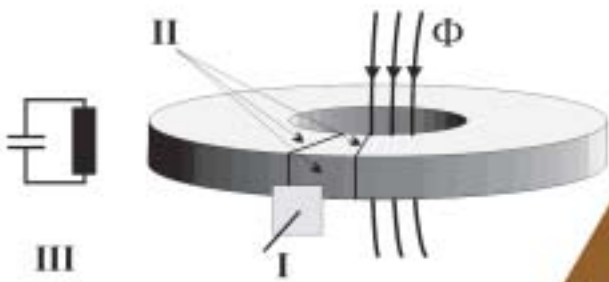
Die PTB bereitete 2005 die Key Comparison für die Größe Drehmoment im Messbereich bis $1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ vor. Sowohl die Untersuchungen an den ausgewählten Transferaufnehmern wie auch die Arbeiten zur Bestimmung des Einflusses der Umweltbedingungen während des Transports und in den Laboratorien auf die Messunsicherheit der Vergleichsmessungen wurden rechtzeitig abgeschlossen. Der Zeitplan des sternförmig organisierten Vergleichs mit der PTB als Referenzlaboratorium wird bisher von den Beteiligten exakt eingehalten. Damit ist das Ziel des Abschlusses und der Auswertung in 2006 erreichbar.

(D. Röske, FB 1.2, dirk.roeske@ptb.de)

Key Comparisons für Hochdruckerdgas erfolgreich abgeschlossen

Im Frühjahr 2005 wurde ein BIPM/CIPM-Key-Comparison für Hochdruck-Erdgas erfolgreich abgeschlossen. Es stellte sich heraus, dass von allen weltweit existierenden Hochdruck-Prüfständen insgesamt nur drei bereit und technisch in der Lage waren, sich zu beteiligen. Bei diesem CIPM-Vergleich hat sich ergeben, dass der Referenzwert identisch mit dem Harmonisierten Europäischen Erdgaskubikmeter ist, der seit Mai 2004 von der PTB, dem NMI-VSL und dem LNE bereitgestellt wird. (D. Dopheide, FB 1.4, dietrich.dopheide@ptb.de)

Elektrizität



Berichte der Abteilungen

Abteilung



Elektrizität

Das Jahr 2005 war für die Abteilung *Elektrizität* geprägt durch die Neuausrichtung einiger Arbeitsgebiete, gute Fortschritte in wichtigen Forschungsbereichen und verstärkte internationale Aktivitäten.

Im Fachbereich *Hochfrequenz und Felder* konzentriert sich die Entwicklung auf den Ausbau der Aktivitäten zu höheren Frequenzen unter besonderer Berücksichtigung von Antennenmessungen. Im Fachbereich *Halbleiterphysik und Magnetismus* wurde der magnetische Bereich neu strukturiert. Er wird sich in Zukunft verstärkt der Charakterisierung kleinster magnetischer Strukturen zuwenden.

Ein Verfahren zur schnellen Adressierung magnetischer Speicher (s. Nachricht des Jahres) hat international große Beachtung gefunden und wird dazu beitragen, die magnetischen Speicher gegenüber den bisher verwendeten Halbleiterspeichern konkurrenzfähig zu machen. Und auch beim Nachweis von Qubits (s. Titelbild) sind gute Fortschritte erzielt worden.

Für die im Frühjahr 2004 fertiggestellte europäische Messgeräte-richtlinie endet die Übergangsfrist im Herbst 2006. Die Abteilung hat rechtzeitig die notwendigen Schritte unternommen, um dann auch im europäischen Wettbewerb bestehen zu können. Im Rahmen des EU-Projekts iMERA sollen Modelle für eine verstärkte Zusammenarbeit der nationalen Metrologie-Institute entwickelt und erprobt werden. Auch hier ist die Abteilung stark eingebunden.

Nachfolgend werden die wichtigsten Entwicklungen aus den sechs Fachbereichen der Abteilung vorgestellt.

Titelbild

Dem Qubit auf der Spur: Gradiometeranordnung in Niobtechnologie zum Nachweis von Ladungs-Phasen-Qubits (I Steuerelektrode, II Blochtransistor, III Resonanzkreis, IV supraleitende Schleife)

Gleichstrom und Niederfrequenz

Während der Wechsel-Gleich-Transfer für Wechselspannungen in einem weiten Spannungs- und Frequenzbereich gut entwickelt und bereits durch mehrere Schlüsselvergleiche abgedeckt ist, besteht beim Wechsel-Gleich-Transfer für Wechselstromstärken noch Handlungsbedarf, insbesondere bei hohen Stromstärken (bis zu 100 A) und Frequenzen (bis zu 100 kHz). Bedingt durch die Zunahme der in den Strommesswiderständen (Shunts) erzeugten Jouleschen Wärme ändert sich deren Frequenzverhalten bei hohen Stromstärken. Mit einem neu entwickelten Messverfahren konnte jetzt erstmals die Stromstärke- und Frequenzabhängigkeit von Hochstrom-Shunts bestimmt werden. Dies hat zu einer Verringerung der Messunsicherheit beim Wechsel-Gleich-Transfer für hohe Wechselstromstärken um einen Faktor drei bis vier geführt. In einem gerade angelaufenen Schlüsselvergleich unter Beteiligung der PTB werden die Messmöglichkeiten der teilnehmenden Institute beim Wechsel-Gleich-Stromstärketransfer erstmalig miteinander verglichen.

Aktuelle Forschungsprojekte im Fachbereich *Temperatur* der PTB sowie in anderen ausländischen Staatsinstituten befassen sich mit der Neudefinition des Kelvin und einer Verbesserung der Fixpunkte der Internationalen Temperaturskala von 1990 (ITS-90). Eine Grundvoraussetzung für diese Projekte ist eine Verringerung der Unsicherheiten bei der Widerstandsthermometrie. Derzeit lassen sich Widerstandsverhältnisse mit Temperaturmessbrücken mit Unsicherheiten von einigen 10^{-7} bestimmen, in Zukunft sind weniger als $5 \cdot 10^{-8}$ erforderlich, was einem Temperaturäquivalent von etwa $10 \mu\text{K}$ am Tripelpunkt des Wassers entspricht. Im Rahmen einer abteilungsübergreifenden Zusammenarbeit wurde dafür ein Brückennormal entwickelt, aufgebaut und „in-sich“ kalibriert. Um die Messabweichung mit Unsicherheiten von

wenigen 10^{-8} ermitteln zu können, mussten die Korrekturen des Brückennormals mit Unsicherheiten von einigen 10^{-9} bestimmt werden. Mit dem neu entwickelten Normal können jetzt Wechselspannungs-Temperaturmessbrücken mit der geforderten Unsicherheit rückführbar kalibriert werden (Bild 1).

Im Dienstleistungsbereich ist die Abteilung bemüht, den Personaleinsparungen durch eine verstärkte Automatisierung von Messverfahren zu begegnen. Zurzeit werden Induktivitätsnormale noch mit hohem zeitlichen Aufwand in einer handbetriebenen Maxwell-Wien-Brücke kalibriert. Um diesen Aufwand zu reduzieren, wurde in Zusammenarbeit mit der *Universität Gliwice*, Polen, ein Induktivitätskomparator entwickelt, mit dem die Kalibrierung zukünftig automatisiert erfolgen soll. Voraussetzung für dieses Verfahren ist allerdings eine hohe zeitliche Stabilität der Induktivitätsnormale, die bedingt durch den hohen Temperaturkoeffizienten dieser Normale eine Thermostatisierung voraussetzt. Dafür wurden kompakte Thermostate entwickelt, die die Temperatur im Inneren auf etwa 20 mK konstant und die temperaturbedingten Änderungen in der Größenordnung von $0,6 \cdot 10^{-6}$ halten.

Hochfrequenz und Felder

Einhergehend mit dem Wechsel in der Leitung des Fachbereichs 2.2 erfolgte eine Umstrukturierung, die der neuen Schwerpunktsetzung des Fachbereichs Rechnung trägt. In Zukunft wird sich die Entwicklung stärker auf den Ausbau zu höheren Frequenzen und die Antennenmesstechnik konzentrieren. Dazu wurde eine neue Arbeitsgruppe *Antennenmesstechnik* eingerichtet, die gleichzeitig für die Planung und Errichtung der neuen Frei-

feldmesseinrichtung zuständig ist. Damit wird der bereits vor einiger Zeit eingeschlagene Weg in der Entwicklung des Fachbereichs 2.2 konsequent fortgesetzt.

Die am *Braunschweiger Forschungsflughafen* ansässige Firma *Flight Calibration Service (FCS) GmbH* führt im Auftrag der *Deutschen Flugsicherung GmbH* die Flugvermessung aller Ortungs- und Navigationsanlagen der Luftfahrt durch. Voraussetzung dafür ist, dass die Richtdiagramme der am Messflugzeug angebrachten Antennen bekannt sind. Dies kann mit Hilfe von numerischer Simulation erfolgen, die allerdings anschließend durch Messungen kontrolliert werden muss. Mit Hilfe eines in der PTB entwickelten Messverfahrens wurde durch eine Bodenmessung ein von der Fa. EADS in Bremen generiertes Rechenmodell für Flugzeugantennen in-situ validiert (Bild 2).

Das „Diskussionsforum Antennen“ wurde in diesem Jahr zum zweiten Male mit internationaler Beteiligung durchgeführt. Einen Schwerpunkt bildete die rückgeführte Kalibrierung von Messantennen, wie sie zur Bestimmung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von technischen Geräten verwendet werden. Die Bundes- und Ländermessstellen der Bundesrepublik Deutschland, die sich mit Messungen gepulster Signale im Rahmen des Arbeits- und Immissions-schutzes bei elektromagnetischen Feldern beschäftigen, haben im Frühjahr an einem in der PTB organisierten Workshop teilgenommen, der der Wissensvermittlung sowie dem Erfahrungsaustausch diente. Im Herbst folgte der praktische, messtechnische Teil an der *Universität der Bundeswehr* in München. Diese Art von Signalen wird zum Beispiel von Radar- und UMTS-Antennen ausgesandt.



Bild1:
Kalibrierung einer Wechselspannungs-Temperaturmessbrücke mit dem neuen PTB-Brückennormal (links im Bild ist der Referenzteiler zu sehen, mit dem das Brückennormal „in-sich“ kalibriert wird)

Im Bereich des Personenschutzes wie auch im EMV-Bereich sind kleine tragbare Feldstärkemessgeräte, sog. Strahlungsmonitore, weit verbreitet, die ohne Frequenzabstimmung und Ausrichtung im Feld arbeiten müssen. Da sich beide Forderungen nicht vollkommen erfüllen lassen, müssen die Eigenschaften dieser Geräte (Frequenzgang, Nichtlinearität, Anisotropie) durch Kalibrierung bestimmt werden. Der Frequenzbereich dieses Kalibrierverfahrens wurde 2005 auf 18 GHz erweitert. Daneben ist es mit einer speziellen Parallelplattenleitung gelungen, Hochfrequenz-Magnetfelder bis zu Frequenzen von 1 GHz zu erzeugen, die auf die elektrische Feldstärke rückgeführt sind. Damit lassen sich Transfersensoren kalibrieren, auf die sich anschließend handelsübliche Messgeräte für hochfrequente magnetische Felder rückführen lassen.

Energiemesstechnik

Durch eine verbesserte Effektivwertbestimmung konnte die Messunsicherheit bei dem auf synchroner Signalabtastung beruhenden Primärnormal für die elektrische Wechselleistung halbiert werden ($3 \cdot 10^{-6}$ für $k = 2$, Bild 3). Der Effektivwert wird jetzt nicht aus den Abtastwerten berechnet, sondern mit einem Vielfach-Thermokonverter gemessen, wobei durch geschicktes synchrones Schalten Transienten am Ausgang des Thermokonverters vermieden werden, so dass eine genaue und gleichzeitig schnelle Effektivwertmessung

ermöglicht wird. Das Primärnormal der PTB erlaubt darüber hinaus auch eine Messung von Kenngrößen für die Netzqualität wie Flicker, Spannungsschwankungen, harmonische Oberschwingungen, Zwischenharmonische und schwankende Harmonische mit kleinsten Messunsicherheiten.

Für den Besitz von derzeit stark in der öffentlichen Diskussion stehenden Elektroimpulsgeräten, sog. Elektroschocker oder Taser, gilt bis zum 31. März 2006 eine Ausnahmegenehmigung des *Bundeskriminalamtes* (BKA). Die Beendigung dieser Übergangsregelung wird vom BKA vom Vorliegen geeigneter Prüfvorschriften in der Beschussgesetzverordnung und einem neu eingerichteten Zulassungsverfahren der PTB abhängig gemacht. Dafür wurde in der Arbeitsgruppe *Hochspannung* eine geeignete Messeinrichtung entwickelt, mit der sich die Impulsparameter dieser Geräte bestimmen lassen. Die Weiterentwicklung der Regelung erfolgt in Zusammenarbeit zwischen den Hochspannungsfachleuten und Waffenrecht-Experten der PTB sowie dem *Bundesinnenministerium*.

Im Rahmen des internationalen Forschungsvorhabens KATRIN (*KARlsruhe TRItium Neutrinoexperiment*) zur experimentellen Bestimmung der Neutrinomasse wurde von der PTB in Zusammenarbeit mit dem *Institut für Kernphysik* der *Universität Münster* ein Hochspannungsteiler für Spannungen bis 35 kV konstruiert, aufgebaut und eingemes-



Bild 2:
Messtechnische Validierung der Antennendiagramme an einem Messflugzeug

sen. Aufgabe dieses Spannungsteilers ist die genaue Messung der Analysierspannung für die untersuchten Tritium- β -Elektronen, wobei der Endpunktbereich von 18 keV des β -Spektrums mit sub-eV-Genauigkeit bestimmt werden musste. Aufgrund der hohen Anforderungen an Messgenauigkeit und Stabilität wurde der Spannungsteiler in Anlehnung an den vor einigen Jahren in der PTB für Gleichspannungen bis 100 kV entwickelten Normalspannungsteiler konstruiert. Die im Rahmen von KATRIN geforderte relative Unsicherheit von $3 \cdot 10^{-6}$ bis zu Messspannungen von 32 kV konnte dabei mit dem Teiler sogar noch unterschritten werden.

Die „Europäische Messgeräte Richtlinie“ (MID) muss spätestens bis zum Herbst 2006 in deutsches Recht umgesetzt werden. Für Messgeräte im geschäftlichen Verkehr und damit auch für Messgeräte für elektrische Energie sieht diese Richtlinie ein aus Modulen bestehendes Konformitätsbewertungsverfahren vor. In der Abteilung laufen schon jetzt Vorbereitungen, um den Herstellern von Elektrizitätszählern, Zusatzeinrichtungen und Messwandlern die vorgesehenen Module so früh wie möglich anbieten zu können, damit gemäß MID neu zugelassene Geräte rechtzeitig zum 31.10.2006 in Verkehr gebracht werden können. Für Elektrizitätsmessgeräte, bei de-

ren Bauartzulassung auf die PTB-Anforderungen PTB-A 50.7 Bezug genommen wird, stellt CONFER eine von der PTB zusammen mit einem Consultingunternehmen realisierte und in der PTB evaluierte Software dar, die der Transparenzpflicht bei der Zuordnung von Lastgangdaten und Tarifen genügt. Das Programm wird vom *Verband der Netzbetreiber* (VDN) im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung mit der PTB vertrieben.

Quantenelektronik

Ein gezielt manipulierbares Zweizustands-Quantensystem wird als Quantenbit (Qubit) bezeichnet und erlaubt neben der Untersuchung makroskopischer Quanteneffekte auch den Bau von Quantencomputern. Die Schaltung zum Nachweis von Ladungs-Phasen-Qubits (s. Titelbild) besteht aus einer supraleitenden Schleife, die durch zwei Josephson-Kontakte mit einer dazwischen liegenden kleinen Insel, dem so genannten Bloch-Transistor, unterbrochen wird. Mit Hilfe einer Steuerelektrode kann die Ladung der Insel manipuliert werden, und durch ein äußeres Magnetfeld lässt sich die Phase der quantenmechanischen Wellenfunktion beeinflussen. Vervollständigt wird das Ganze durch einen an die genannte Schleife induktiv angekopplten HF-Resonanzkreis für die Auslesung des Quantenzustands. Zur Unterdrückung

magnetischer Störfelder wird die supraleitende Schleife in Form eines Gradiometers ausgeführt. An dieser Schaltung wurden systematische Untersuchungen zum Grundzustand des Ladungs-Phasen-Quantenbits für verschiedene Verhältnisse der Josephson-Kopplungsenergie zur Coulomb-Ladeenergie durchgeführt.

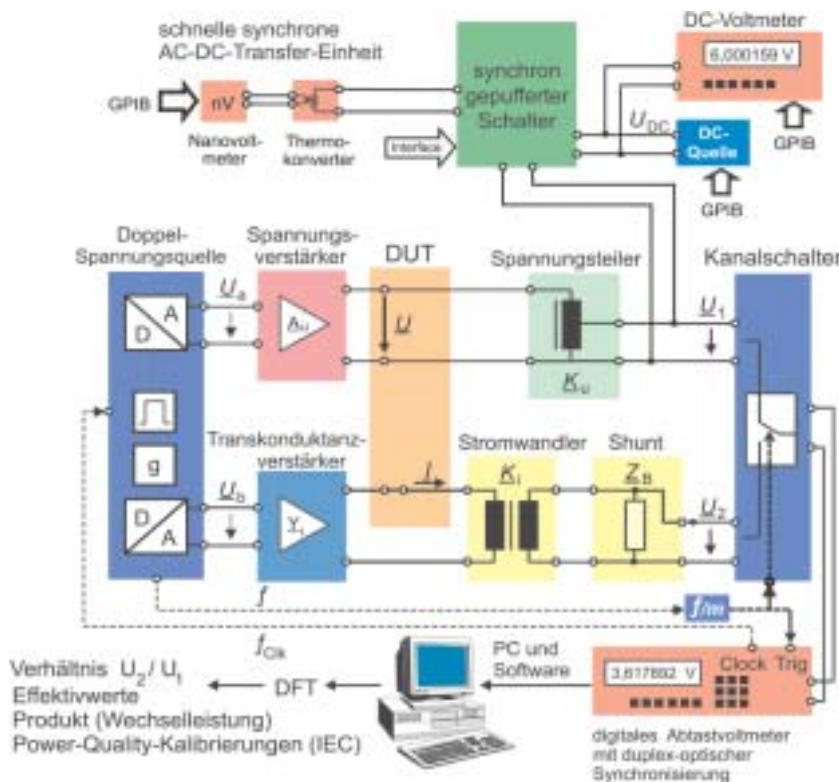


Bild 3: Blockdiagramm des Primärnormals für elektrische Leistung, bestehend aus dem digitalen Abtastsystem und einer synchronen AC/DC-Transfermesseinrichtung mit Thermokonverter

Die Rapid-Single-Flux-Quantum(RSFQ)-Logik wird als vielversprechendes Interface zu Josephson-Schaltungen zur Quanten-Informationsverarbeitung mit Qubits angesehen. Als größtes Problem gekoppelter RSFQ- und Qubit-Schaltungen werden Stromfluktuationen gesehen, die von den Shunts der aktiven RSFQ-Schaltelemente erzeugt werden und die selbst im supraleitenden Zustand der Josephson-elemente zu signifikanter Dekohärenz der Qubits beitragen. Zur Reduzierung dieser Fluktuationen wurden technologische Verfahren entwickelt, mit denen Supraleiter-Isolator-Normalleiter(SIN)-Tunnelkontakte als neuartige, nicht-lineare frequenzabhängige Shunt-elemente realisiert wurden. Die Parameter der produzierten Proben unterstreichen ihre Eignung für RSFQ-Qubit-Anwendungen.

Josephson-Arbitrary-Waveform-Synthesizer (JAWS) ermöglichen die Erzeugung hochgenauer Wechselspannungen sowie Spannungen beliebiger Kurvenform. Sie basieren auf überdämpften Josephson-Kontakten, die mit einer Pulsfolge betrieben werden. Die Ausgangsspannung ergibt sich aus der zeitlichen Folge der einzelnen Pulse. Um die Ausgangsspannung zu erhöhen, muss die Anzahl der Josephson-Kontakte erhöht werden. Hierzu konzentrieren sich die Arbeiten gegenwärtig auf die Entwicklung von Schaltungen aus Supraleiter-Normalleiter-Supraleiter-Kontakten, da sich in diesen Schaltungen mehr Kontakte in der zur Verfügung stehenden Leitungslänge unterbringen lassen (Bild 4). Erste SNS-Schaltungen sind bereits im Pulsbetrieb getestet worden. Für den Aufbau eines inte-

grierten Josephson-Arbitrary-Waveform-Synthesizers für beliebige Wellenformen wurden Spannungstreiber in supraleitender RSFQ-Logik zur Erleichterung der Ankopplung eines RSFQ-Patterngenerators an Halbleiterverstärker optimiert. Die Nutzung der Rapid-Single-Flux-Quantum-Logik für messtechnische Anwendungen erfordert die Realisierung von Schnittstellen, die einen sehr schnellen Datentransfer von der Supraleiterelektronik zur Halbleiterelektronik im GHz-Frequenzbereich ermöglichen.

In einem Verbundvorhaben wurden unter Beteiligung der PTB organische Dünnschicht-Laserdioden untersucht. Die Verwendung von organischen Materialien für die Herstellung von Dünnschicht-Laserdioden bietet zwei wesentliche Vorteile: Der erste ist die Durchstimmbarkeit der Wellenlänge über den gesamten sichtbaren Spektralbereich. Der zweite Vorteil liegt darin, dass die verwendeten Technologien es ermöglichen, große Flächen und flexible Substrate kostengünstig zu beschichten. Die in dem Verbundvorhaben zusammengeführten Arbeitsgruppen aus Chemie, Physik und Elektrotechnik untersuchten alle Teilaspekte auf dem Weg zur organischen Dünnschicht-Laserdiode. In der PTB wurden die Resonatorstrukturen für die Laser gefertigt. Dazu wurden Gitter durch Elektronenstrahlolithographie und Trockenätzverfahren in SiO₂-Schichten übertragen. Die Gitterparameter weisen Periodizitäten zwischen 100 nm und 480 nm auf. An der *TU Braunschweig* konnte mit einem in der PTB gefertigten Resonator erstmals die volle

Funktion eines optisch gepumpten organischen Lasers demonstriert werden. Die Wellenlänge kann über etwa 18 Nanometer zwischen 377,7 nm und 395 nm abgestimmt werden.

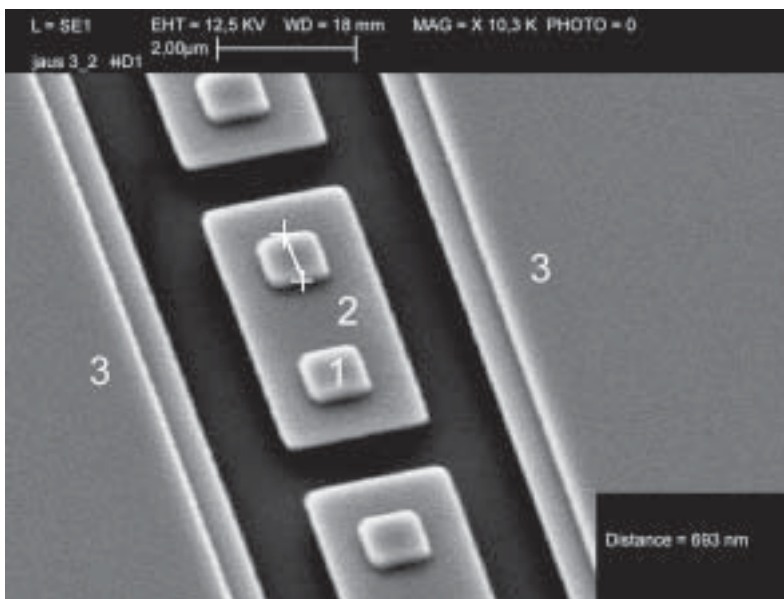


Bild 4:
REM-Aufnahme einzelner SNS-Kontakte (noch ohne Verdrahtung)
1 Gegenelektrode
2 Basiselektrode
3 Masse der Koplanarleitung

Halbleiterphysik und Magnetismus

Basierend auf einer im Jahre 2004 durchgeführten Kundenbefragung wurde der Bereich *Magnetismus* neu strukturiert. Die beiden bisherigen Arbeitsgruppen *Magnetische Größen* und *Speichertechnik* wurden zu einer neuen Arbeitsgruppe *Magnetische Messtechnik* zusammengefasst. Schwerpunkte dieser neuen Arbeitsgruppe werden die magnetische Feldmesstechnik und die Entwicklung magnetischer Messverfahren für kleinste Strukturen sein. Die Messungen magnetischer Kenngrößen von Materialien werden im bestehenden Rahmen aufrechterhalten, während die Zertifizierung von Referenzmaterialien für magnetische Datenträger mittelfristig eingestellt wird, da hierfür in Zukunft kein Bedarf mehr besteht und ein Vertrag mit der ISO über die Bereitstellung solcher Referenzmaterialien im Jahre 2008 ausläuft.

Auf dem Gebiet der magnetischen Messtechnik wird eine Vielzahl von Dienstleistungen zur hohen Zufriedenheit externer Kunden erbracht. Häufig sind dazu neue Messeinrichtungen zu entwickeln, so zum Beispiel eine Messanlage, mit der die Drift eines Sättigungskern-Magnetometers in der Größe von 1 nT bei einem zu messenden Feld von 1000 μT über einen längeren Zeitraum ermittelt werden kann. Die Anlage beruht im Wesentlichen auf einem Kernresonanz-Magnetometer, das mit einer Auflösung von 0,02 nT zeitlich stabile Referenzwerte liefert. Ein weiteres Beispiel ist eine Messeinrichtung zur genauen Positionsbestimmung von magneti-

schen Sensoren. In Getrieben, Motoren und Bremssystemen (ABS) moderner Kraftfahrzeuge, aber auch in Werkzeugmaschinen und Elektromotoren werden in zunehmendem Maße magnetische Multipolräder als Signalgeber verwendet, wobei als Signaldetektoren magneto-resistive oder Hall-Sensoren benutzt werden. Auf Anfrage eines Herstellers solcher Systeme wurde in der PTB eine Messprozedur konzipiert, mit der sich der Abstand zwischen Sensorgehäuse und aktivem Sensorelement mit einer Unsicherheit $< 10 \mu\text{m}$ ermitteln lässt.

Durch die zunehmende Miniaturisierung magnetischer Systeme und Bauelemente entsteht derzeit ein wachsendes Interesse an geeigneten magnetischen Messtechniken für kleinste Strukturen. Für die detaillierte Charakterisierung von magnetischen Materialien mit Sub-Mikrometer-Strukturen muss eine Auflösung im Nanometerbereich erreicht werden. Andererseits erlaubt nur ein großer Abbildungsbereich Aussagen über Ensembles von Strukturen, z. B. zur Charakterisierung der Homogenität der Ensembles und der zugrunde liegenden Fertigungstoleranzen. Weiterhin erfordert ein detaillierter Vergleich von Proben die quantitative Messung von Streufeldern und Magnetisierung. Um alle diese Anforderungen zu erfüllen, wurde in Zusammenarbeit mit der *Universität Göttingen* ein Verfahren entwickelt, das auf einer Kombination von magneto-optischer (MO)- und Magnetkraftmikroskopie (MFM) basiert (Bild 5). Ein in der PTB entwickeltes neues

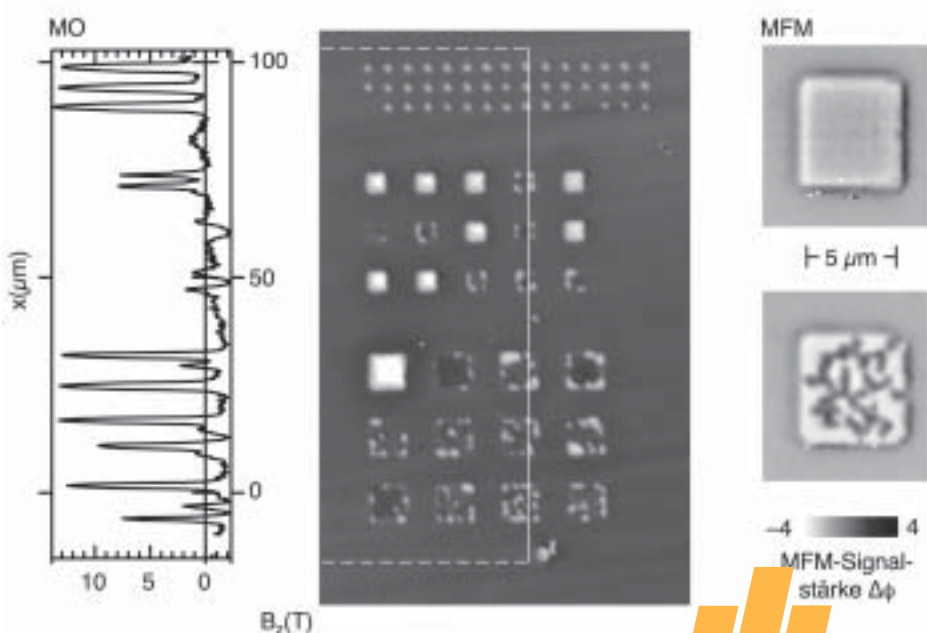


Bild 5: Magneto-optische Abbildung von magnetischen Teststrukturen (der Graph zeigt den Verlauf der senkrechten Feldkomponente entlang der Linie). Die magnetkraftmikroskopische Detailaufnahme zweier Quadrate zeigt unterschiedliche Magnetisierungszustände.

Verfahren zur Adressierung magnetischer Speicher erlaubt Taktraten, die genauso schnell wie die der schnellsten herkömmlichen digitalen Speicherbauteile sind (s. a. „Nachrichten des Jahres“).

Die PTB hat erstmals Anstiegszeiten eines Sampling-Oszilloskops mit einer Bandbreite von 70 GHz gemessen. Angesichts der rasanten Entwicklung der Hochfrequenztechnik zu immer höheren Frequenzen – Gbit-Datenraten in der Kommunikationstechnologie, 77-GHz-Abstandsradar in der Automobilindustrie – leistet die PTB damit einen wichtigen Beitrag, um die Kalibrierung der zur Messung benötigten ultraschnellen Oszilloskope sicherzustellen. Das Kalibrierverfahren nutzt elektrische Testpulse von nur wenigen Pikosekunden Dauer, die mit Hilfe eines Femtosekunden-Lasersystems auf einem koplanaren Wellenleiter optoelektronisch erzeugt werden. Die Messunsicherheit der Anstiegszeit beträgt nur 1,2 ps.

Für die Charakterisierung von Höchsthochfrequenzkomponenten ist es wünschenswert, ultrakurze Strompulse zu erzeugen, deren zeitliche Form beliebig variiert werden kann. Bisherige Methoden zur Generation von wenigen 100 fs langen Strompulsen basieren auf einer Mischung von elektronischen und optischen Verfahren und lassen diese Möglichkeit nicht zu. In der PTB ist es nun erstmals gelungen, ultrakurze Stromimpulse mit Hilfe rein optischer Methoden zu erzeugen. Mit diesem Verfahren ist eine Variation der Form dieser Strompulse prinzipiell möglich. Die Besonderheit dieses Verfahrens besteht darin, dass kein elektrisches Feld benötigt wird, in dem Ladungsträger beschleunigt werden. Im übertragenen Sinn entspricht dies einem Stromfluss ohne Spannungsquelle.

Der Einzel-Elektronen-Transport durch einen Nano-Kanal mit Hilfe akusto-elektrischer Wellen wurde in den letzten Jahren intensiv untersucht mit dem Ziel, ihn als Quantennormal für die Reproduzierung der Stromstärke nutzbar zu machen. Als Kernproblem auf dem Weg dorthin wurde die zu hohe Temperatur sowohl des Kristallgitters, in dem die Elektronen sich bewegen, als auch des Elektronenensembles selbst erkannt. Jetzt konnte erstmals nachgewiesen werden, dass auch bei kleinen akustischen Leistungen ein

quantisierter Elektronentransport möglich ist, wenn ein fast offener Kanal benutzt wird. Da bei diesem nahe am thermodynamischen Gleichgewicht stattfindenden Transport die zugeführte akusto-elektrische Leistung gering ist, kann durch Einsatz entsprechender Kryosysteme die Temperatur des Kristallgitters deutlich verringert und damit auch das andere genannte Problem vermieden werden. Die Experimente zum Einzel-Elektronen-Transport erlangen auch im Hinblick auf eine mögliche neue Definition des Ampere auf der Grundlage der Elementarladung eine besondere Bedeutung.

Elektrische Einheiten

Zum ersten Mal ist mit Hilfe einer neu entwickelten Messbrücke die präzise Messung des AC-Längswiderstands auf beiden Seiten einer Quanten-Hall-Probe gelungen. Dadurch können jetzt ähnlich wie auch bei Gleichstrom alle Größen, welche die Qualität eines Quanten-Hall-Bauelements bestimmen, mit Wechselstrom gemessen werden. Die Arbeiten sind so weit vorangeschritten, dass jetzt AC-Quanten-Hall-Widerstände zur Verfügung stehen, die bei geeigneter Beschaltung der Probe innerhalb einer relativen Unsicherheit von etwa $6 \cdot 10^{-8}$ ($k = 2$) frequenz- und stromunabhängig sind und mit dem DC-Quanten-Hall-Widerstand übereinstimmen.

Mit binär unterteilten Josephson-Reihenschaltungen lassen sich präzise D/A-Umsetzer aufbauen, mit denen sehr präzise Sinusschwingungen erzeugt werden können. Schon jetzt ist das Verfahren bei Netzfrequenz mit einer relativen Unsicherheit von etwa 10^{-7} den thermischen Verfahren überlegen. Daher ist ein zweiter, synchronisierter Josephson D/A-Umsetzer aufgebaut worden, um die beiden Quellen als Grundlage für ein neues Wechselleistungs-Normal nutzen zu können. Um den vielfältigen Fragen wie Berechnung der Messunsicherheit und Wahl eines optimalen Messaufbaus nachgehen zu können, besteht eine enge Kooperation mit den europäischen Metrologieinstituten in Großbritannien, Frankreich, Schweden, Finnland und der Schweiz. Diese soll in Form eines Joint-Research-Projekts organisiert werden, um erste Erfahrungen mit diesem neuen Projekttyp sammeln zu können, der im Rahmen von iMERA zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Verringerte Messunsicherheit für Wechselspannungs-Temperaturmessbrücken mit neuem PTB-Brückennormal

Aktuelle Forschungsprojekte im Fachbereich *Temperatur* der PTB sowie in anderen ausländischen Staatsinstituten befassen sich mit der Neudefinition des Kelvin und einer Verbesserung der Fixpunkte der Internationalen Temperaturskala von 1990 (ITS-90). Eine Grundvoraussetzung für diese Projekte ist eine Verringerung der Unsicherheiten bei der Widerstandsthermometrie. Derzeit lassen sich Widerstandsverhältnisse mit Unsicherheiten von einigen 10^{-7} bestimmen, in Zukunft sind weniger als $5 \cdot 10^{-8}$ erforderlich, was einem Temperaturäquivalent von etwa $10 \mu\text{K}$ am Tripelpunkt des Wassers entspricht. Im Rahmen einer abteilungsübergreifenden Zusammenarbeit wurde dafür in der Arbeitsgruppe *Verhältnismessungen* ein Brückennormal entwickelt, aufgebaut und in-sich kalibriert. Mit diesem Normal können Wechselspannungs-Temperaturmessbrücken zukünftig mit der geforderten Unsicherheit rückführbar kalibriert werden.

(G. Ramm, FB 2.1, guenther.ramm@ptb.de)

Hochspannungsteiler für das internationale Neutrinoexperiment KATRIN

In Zusammenarbeit mit dem *Institut für Kernphysik* der *Universität Münster* wurde ein Hochspannungsteiler entwickelt, der für das Experiment zur Bestimmung der Neutrinomasse eingesetzt werden soll. Die für den Hochspannungsmessaufbau notwendige relative Unsicherheit von 3 mV/V bis zu einer Messspannung von 32 kV wurde unterschritten. (R. Marx, FB 2.3, rainer.marx@ptb.de)

Die Bewahrung und Weitergabe der Einheit der elektrischen Wechselleistung erfolgt jetzt durch ein Analog-Digitales Primärnormal

Es wurde ein hybrides Primärnormal für die elektrische Wechselleistung entwickelt, bei dem die Effektivwertbestimmung aus AC-DC-Transfermessungen mit Thermokonvertern erfolgt. Durch geschicktes synchrones Schalten werden Transienten am Ausgang des Thermokonverters vermieden, so dass eine

genaue und schnelle Effektivwertmessung möglich wird. (W. G. K. Ihlenfeld, FB 2.3, guilherme.ihlenfeld@ptb.de)

Optimierung von RSFQ-Spannungstreiber-schaltungen für Hochfrequenzanwendungen

Die Nutzung der Rapid Single Flux Quantum (RSFQ)-Logik für messtechnische Anwendungen erfordert die Realisierung von Schnittstellen, die einen sehr schnellen Datentransfer von der Supraleiterelektronik zur Halbleiterelektronik im GHz-Frequenzbereich ermöglichen. Für den Aufbau eines integrierten Quanten-Synthesizers für beliebige AC-Wellenformen wurden Spannungstreiber in supraleitender RSFQ-Logik zur Erleichterung der Ankopplung eines RSFQ-Patterngenerators an Halbleiterverstärker optimiert.

(F.-I. Buchholz, FB 2.4, friedrich-im.buchholz@ptb.de, marat.khabipov@ptb.de)

Verbesserte Schaltungen für den Josephson-Synthesizer

Die in den vergangenen Jahren entwickelten Josephson-Reihenschaltungen aus SINIS-Kontakten werden in der PTB und europäischen Partnerinstituten im Pulsbetrieb detailliert untersucht. In einem neu entwickelten Prozess werden mit Elektronenstrahl-Lithographie und Chemisch-Mechanisch-Polieren (CMP) Schaltungen aus SNS-Kontakten hergestellt, die eine Erhöhung der Ausgangsspannung ermöglichen. (J. Kohlmann, FB2.1, johannes.kohlmann@ptb.de)

Erfolgreicher Abschluss eines BMBF-Verbundprojekts zur Erforschung organischer Festkörperlaser

Das Ziel dieses Verbundvorhabens war die Erforschung und erstmalige Demonstration von organischen Dünnschichtlaserdioden. In dem jetzt abgeschlossenen Projekt wurden optisch gepumpte Laser gefertigt, die den gesamten sichtbaren Spektralbereich abdecken. Die Laufzeit des Projekts wurde um zwei Jahre verlängert, um erstmals elektrisch gepumpte organische Laser zu demonstrieren. (T. Weimann, FB 2.4, thomas.weimann@ptb.de)

Ladungs-Phasen-Quantenbit in Niob-Technologie

Ein supraleitendes Ladungs-Phasen-Qubit, potentieller Baustein eines zukünftigen Quantencomputers, wurde erstmals in Niob-Technologie gefertigt und erfolgreich getestet. (R. Dolata, FB 2.4, ralf.dolata@ptb.de)

Messungen am Ladungs-Phasen-Quantenbit in Niob-Technologie

Es wurde eine systematische Untersuchung des Grundzustands des Ladungs-Phasen-Quantenbits für verschiedene Verhältnisse der Josephson-Kopplungsenergie zur Coulomb-Ladeenergie durchgeführt. Dies ermöglicht die vollständige Bestimmung der Probenparameter sowie des kritischen Stroms, der in der Größenordnung weniger nA liegt. (J. Könemann, FB 2.4, jens.koenemann@ptb.de)

Fabrikationstechnologie von S-I-N-Kontakten

Die Rapid-Single-Flux-Quantum(RSFQ)-Logik wird als vielversprechender Bestandteil von Josephson-Schaltungen zur Quanteninformationsverarbeitung mit Qubits angesehen. Als größtes Problem gekoppelter RSFQ- und Qubit-Schaltungen werden Stromfluktuationen gesehen, die von den Shunts der aktiven RSFQ-Schaltelemente erzeugt werden und die selbst im supraleitenden Zustand der Josephsonelemente zu signifikanter Dekohärenz des Qubits beitragen. Zur Reduzierung dieser Fluktuationen wurden technologische Verfahren entwickelt, mit denen Supraleiter-Isolator-Normalleiter(SIN)-Tunnelkontakte als neuartige, nicht-lineare frequenzabhängige Shuntelemente realisiert wurden. Die Parameter der produzierten Proben eignen sich gut für RSFQ-Qubit-Anwendungen. (A. Zorin, FB 2.4, alexander.zorin@ptb.de, friedrich-im.buchholz@ptb.de)

Kombinierte magneto-optische und Magnetkraftmikroskopie: quantitative Magnetfeldmessung an millimetergroßen Proben mit Nanometerauflösung

Die Kombination von magneto-optischer Mikroskopie und Magnetkraftmikroskopie soll die quantitative Messung von Magnetfeldern über millimetergroßen Flächen mit Nanometerauflösung ermöglichen. (S. Sievers, FB 2.5, sibylle.sievers@ptb.de)

Einzel-Elektronen-Transport am thermodynamischen Gleichgewicht

Die PTB hat erstmals gezeigt, dass quantisierter Einzel-Elektronen-Transport durch fast offene Halbleiterkanäle nahe am thermodynamischen Gleichgewicht mit Hilfe von akustoelektrischen Wellen kleiner Leistung realisiert werden kann. (F.-J. Ahlers, FB 2.5, franz-josef.ahlers@ptb.de)

Erzeugung von Terahertz-Strompulsen durch rein optische Anregung

In der PTB ist es gelungen, durch rein optische Anregung in Halbleiterstrukturen ultrakurze elektrische Strompulse zu erzeugen, deren Frequenzspektrum sich bis in den Terahertzbereich erstreckt. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

AC-Messungen des Quanten-Hall-Widerstands

Es wurden Messbrücken entwickelt, die zum ersten Mal die präzise Messung des AC-Längswiderstandes auf beiden Seiten einer Quanten-Hall-Probe erlauben. Dadurch können jetzt alle Größen mit Wechselstrom gemessen werden, die auch im Gleichstromfall gemessen werden, um die Qualität eines Quanten-Hall-Bauelements zu beurteilen. Die Arbeiten sind so weit vorangeschritten, dass jetzt ein AC-Quanten-Hall-Widerstand zur Verfügung steht, der bei geeigneter Schaltung der Probe innerhalb einer Unsicherheit von etwa $6 \cdot 10^{-8}$ ($k = 2$) frequenz- und stromunabhängig ist und mit dem DC-Quanten-Hall-Widerstand übereinstimmt. (J. Schurr, FB 2.6, juergen.schurr@ptb.de)

Verbesserungen der Technologie und Optimierung des Designs für programmierbare 10-V-SINIS-Josephson-Schaltungen

Durch das vollständige Trockenätzen des Al/AlOx/Al/AlOx/Al-Barriersystems mit einem neutralisierten Ar-Ionenstrahl und unter Verwendung einer SiO₂-Opferschicht ist eine beträchtliche Verbesserung der Ausbeute bei der Herstellung von SINIS-Arrays gelungen. Mit Hilfe von 1-V-Schaltungen wurden entscheidende Designparameter für ein optimales 10-V-Design, das ca. 70 000 Josephson-Kontakte enthält, getestet. (F. Müller, FB 2.4, franz.mueller@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Neue Thermostate für Induktivitätsnormale

Für Induktivitätsnormale wurde ein kompaktes Thermostatsystem entwickelt, mit dem der Einfluss des Temperaturkoeffizienten der Normale unterdrückt werden kann. Damit sind schnellere Induktivitätskalibrierungen bei verringerter Unsicherheit möglich.
(R. Hanke, FB 2.1, ruediger.hanke@ptb.de)

Erweiterte Kalibriermöglichkeiten bei Wechselstromstärken bis 100 A und 100 kHz

Mit planaren Vielfachthermokomverttern und neuen Hochstrom-Shunts wurden die Messbereiche für Wechselstrom-Gleichstromstärke-Transfer und Wechselstromstärke im Frequenzbereich von 10 Hz bis 100 kHz auf 30 A, 50 A, 80 A und 100 A erweitert. Die bei hohen Stromstärken auftretende Stromabhängigkeit der Transferdifferenzen der Shunts wurden mit Stromwandlern ermittelt und bei der Einmessung im Aufbauverfahren berücksichtigt.
(T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

Fehlerfortpflanzung bei der LRL- oder TRL-Kalibrierung eines vektoriellen Vierstellen-Netzwerkanalysators

Die Messabweichungen von Streuparametern aufgrund nichtidealer Kalibrierelemente in LRL- oder TRL-Kalibrierverfahren vektorieller Netzwerkanalysatoren wurden in einer umfangreichen theoretischen und experimentellen Studie als Funktion der Abweichungen der S-Parameter der Kalibrierelemente von ihren Idealwerten bestimmt.
(U. Stumper, FB 2.2, ulrich.stumper@ptb.de)

Längenmessungen an magnetischen Sensoren

Es wurde eine Apparatur entwickelt, die es erlaubt, die Position von Magnetsensoren in ihrem Gehäuse zu bestimmen.
(K. Weyand, FB 2.5, kurt.weyand@ptb.de)

Bestimmung der Langzeitstabilität von Magnetometern

Die PTB hat eine Messanlage konzipiert, mit der eine mögliche Drift von 0,001 μT eines Magnetometers in einem Feld mit der Flussdichte von ca. 1000 μT über einen Zeitraum von fünf Tagen ermittelt werden kann.
(K. Weyand, FB 2.5, kurt.weyand@ptb.de)

Temporekord bei magnetischen Speicherchips

Ein in der PTB entwickeltes Verfahren macht magnetische Speicherchips (MRAM) jetzt genauso schnell wie die schnellsten herkömmlichen digitalen Speicherbauteile.
(H. W. Schumacher, FB 2.5, hans.w.schumacher@ptb.de)

Anstiegszeit eines 70-GHz-Oszilloskops erstmals kalibriert

Die PTB hat ihren optoelektronischen Messplatz für die Anstiegszeit von Oszilloskopen so erweitert, dass Geräte mit einer Bandbreite von bis zu 70 GHz kalibriert werden können.
(S. Seitz, FB 2.5, steffen.seitz@ptb.de)

Erste Schritte zu einem Josephson-Leistungsnormale

Nachdem anhand von Vergleichsmessungen mit einem herkömmlichen Thermokonverter im AC-DC-Transferverfahren erfolgreich nachgewiesen wurde, dass mit dem Josephson-D/A-Umsetzer sehr präzise Sinusschwingungen erzeugt werden können, wird jetzt ein Normal für Leistung aufgebaut.
(R. Behr, FB 2.6, ralf.behr@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Kalibrierung von Feldstärkemessgeräten jetzt bis 18 GHz möglich

Die Kalibriermöglichkeiten von Messgeräten für elektrische HF-Feldstärken mit Anwendung in Personenschutz und Elektromagnetischer Verträglichkeit wurden auf 18 GHz erweitert.
(R. Pape, FB 2.2, reiner.pape@ptb.de)

Darstellung eines Hochfrequenz-Magnetfelds

Ebenfalls für die Anwendung in Personenschutz und Elektromagnetischer Verträglichkeit lassen sich nun in einer dafür optimierten Versuchsanlage geeignete Transfersensoren für magnetische HF-Feldstärken bis 1 GHz rückführbar kalibrieren.
(K. Münter, FB 2.2, klaus.muenter@ptb.de)

Kalibrierung von Flugzeugmessantennen für aeronautische Ortung und Navigation

Für die am Braunschweiger Flughafen ansässige Firma *Flight Calibration Service GmbH* und deren Messflugzeug für aeronautische Ortung und Navigation wurden numerisch bestimmte Antennenricht-

diagramme durch die PTB messtechnisch validiert. (T. Schrader, FB 2.2, thorsten.schrader@ptb.de)

EMF-Workshop und Ringmessung Radar- und UMTS-Messtechnik

Messungen gepulster elektromagnetischer Felder, wie sie z. B. bei Radar- und UMTS-Signalen auftreten, erfordern eine spezifische Messtechnik und umfangreiche Erfahrungen bei den Bundes- und Ländermessstellen, die in einem Workshop und in einem Praxisseminar vermittelt wurden. (T. Schrader, FB 2.2, thorsten.schrader@ptb.de)

Antennendiskussionsforum 2005

Eine internationale Expertengruppe diskutierte auf dem zweiten Diskussionsforum Antennen die Rückführung von Antennenfaktoren, wie sie z. B. im Bereich der Elektromagnetischen Verträglichkeit benötigt werden. (T. Schrader, FB 2.2, thorsten.schrader@ptb.de)

Hochspannungsfachleute der PTB untersuchen Kenngrößen so genannter Elektroshockgeräte („Taser“)

Für Elektroimpulsgeräte, die sog. Elektroschocker oder Elektroschockgeräte („Taser“), gilt eine zeitlich befristete Ausnahmegenehmigung des Bundeskriminalamtes. Die Beendigung der Übergangsregelung hängt u. a. von einem neuen Zulassungsverfahren ab. Im Hochspannungslabor der PTB wurde eine dafür geeignete Messeinrichtung vorgeschlagen und erprobt. (W. Lucas, FB 2.3, wolfgang.lucas@ptb.de)

PTB bietet jetzt auch die Rückführung von Netzqualitätskenngrößen auf ein nationales Normal an

Spezielle Messverfahren für das digitale Primärnormal für die elektrische Wechselleistung der PTB erlauben die genaue Messung von Netzqualitätskenngrößen. Das Normal arbeitet als ein hochgenauer Abtast-Signalanalysator und Spektrumanalysator mit einer relativen Amplituden- und Phasen-Auflösung unter 10^{-6} . Somit können Netzqualitätskenngrößen wie Flicker, Spannungsschwankungen, harmonische Oberwellen, Zwischenharmonische und schwankende Harmonische mit kleinsten Messunsicherheiten gemessen werden. (W. G. Kürten Ihlenfeld, FB 2.3, guilherme.ihlenfeld@ptb.de)

Verband der Netzbetreiber und PTB stellen gemeinsam die Software CONFER zur vertrauenswürdigen Nachtarifierung von Lastgangdaten zur Verfügung

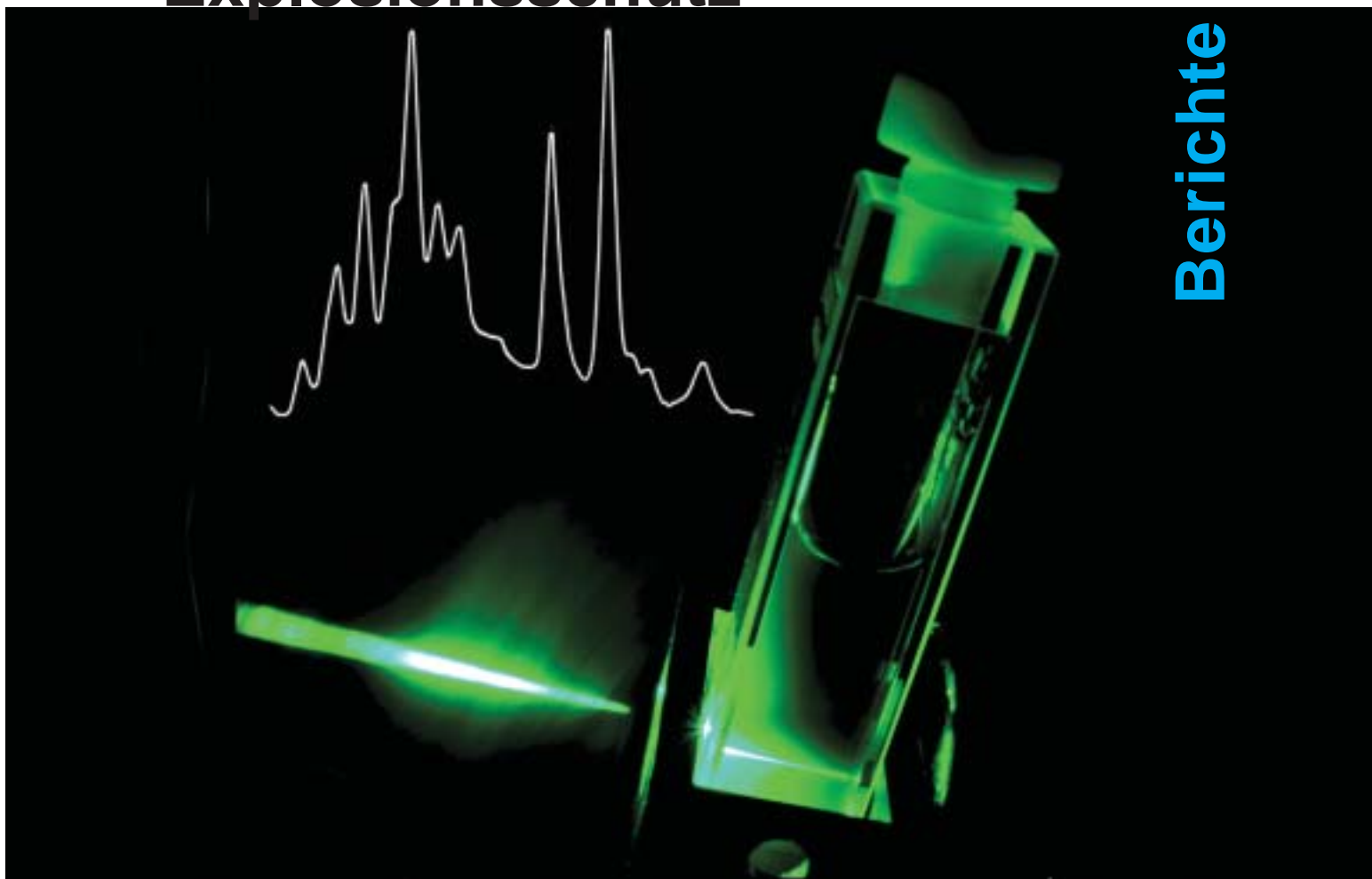
Für Elektrizitätsmessgeräte, in deren Bauartzulassung auf die PTB-Anforderungen PTB-A 50.7, 3.1.1.3 B) Bezug genommen wird, stellt CONFER ein von der PTB evaluiertes Mittel dar, welches der Transparenzpflicht bei der Zuordnung von Lastgangdaten und Tarifen genügt. Das Programm wird vom *Verband der Netzbetreiber* (VDN) im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung mit der PTB in eigener Regie vertrieben. (M. Kahmann, FB 2.3, martin.kahmann@ptb.de)

Elektrizitätsmessgeräte-Fachleute bereiten sich auf die neuen Konformitätsbewertungsverfahren nach der Messgeräte-Richtlinie vor

Die Europäische Messgeräterichtlinie wird im Jahr 2006 in deutsches Recht umgesetzt werden. Für Messgeräte, mit denen die elektrische Energie oder Leistung bestimmt wird, wird eine aus Modulen bestehende Konformitätsbewertung eingeführt werden. Die PTB wird den Herstellern von Elektrizitätszählern, Zusatzeinrichtungen und Messwandlern die Module rechtzeitig anbieten, damit diese Geräte ab dem 31. 10. 2006 wahlweise nach dem neuen Verfahren in Verkehr gebracht werden können. (H.-G. Latzel, FB 2.3, hans-georg.latzel@ptb.de)

Chemische Physik und Explosionsschutz

Berichte der Abteilungen



Abteilung

3

Chemische Explosions

Analytische Messtechnik und chemisch-physikalische Stoffeigenschaften – Präzisionsmessungen für Industrie, Wissenschaft und Umweltschutz

Die genaue Bestimmung von Stoffeigenschaften und die Entwicklung praxisgerechter Messverfahren sind sowohl für industrielle als auch für wissenschaftlich-metrologische Anwendungen unverzichtbar. Sie sind auch Voraussetzung für regelsetzende staatliche Maßnahmen wie die Festlegung von Grenzwerten für den Atemalkoholgehalt oder von Schadstoffgrenzwerten von Automobilabgasen.

Ein besonders für die Energiewirtschaft wichtiges Arbeitsgebiet ist die Gas-Metrologie. Aktuelle Entwicklungen in der Gaswirtschaft, die ein volkswirtschaftlich wichtiger Wachstumsbereich ist (jährliches Wachstum ca. 5 %), führen zu neuen Anforderungen an die metrologische Basiskompetenz der PTB sowie an Dienstleistungen durch PTB und Kalibrierdienste. Dies umfasst sowohl die Darstellung von nationalen Normalen und die Entwicklung von Referenzverfahren mit geringerer Messunsicherheit als auch die präzise Bestimmung der Eigenschaften von Gasgemischen mit „ungewöhnlicher“ Zusammensetzung, die in wenigen Jahren größere Bedeutung erlangen werden (Biogas, Wasserstoff). Betroffen sind dabei auch das gesetzli-

che Messwesen, Kalibrierungen und Referenzmaterialien sowie Forschungsvorhaben zur Verbesserung und Neuentwicklung von Messverfahren. Die interessierenden Größen sind Feuchte, Viskosität, Gaszusammensetzung, Brennwert und Dichte, letztere in weiten Druck- und Temperaturbereichen.

Bei Flüssigkeiten liegt das metrologische Interesse hauptsächlich in der Messung von Dichte und Viskosität, während Untersuchungen an Festkörpern auf die Realisierung hochgenauer Volumen- und Dichtenormale konzentriert sind.

Referenzkalorimeter für Erdgas

In Deutschland wird derzeit etwa ein Viertel des Primärenergiebedarfs durch Erdgas gedeckt, die Tendenz ist steigend. Bei einem Jahresverbrauch von mehr als 100 Mrd. m³ kommt der Unsicherheit der Brennwertbestimmung eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung zu. Es gibt weltweit nur wenige Institute, die absolute Brennwertbestimmungen mit einer Unsicherheit von $\leq 0,2\%$ durchführen können. Für die Verwendung als nationales Normal wird daher ein isoperiboles (konstante Umgebungstemperatur) Präzisionskalorimeter entwickelt, für das eine Messunsicherheit von 0,05 % angestrebt wird.

Im Kalorimeter werden durch Verbrennung einer durch Wägung (Bild 1) bestimmten Erdgasmenge während einer Versuchsdauer von 900 s etwa 3 kg Wasser um 3 K erwärmt. Für die Kalibrierung des Kalorimeters (Bild 2) mit einem elektrischen Heizer ergaben erste Messungen eine Standardabweichung von 0,02 %.

Ein weitgehend identisches Gerät (Bild 3) wurde im Rahmen einer internationalen Kooperation mit mehreren europäischen

Titelbild

Raman-Streuexperiment mit Kreatinin, adsorbiert an kolloidalen Silber-Nanopartikeln
Durch Ausnutzung der oberflächenverstärkten Ramanstreuung lässt sich die Raman-Streuintensität von Molekülen um mehrere Größenordnungen steigern. In Kombination mit isotonen markierten internen Standards konnte ein neues primäres Verhältnisverfahren für die Metrologie in der Chemie realisiert werden.

Physik und Schutz

Gasversorgern und dem französischen Staatsinstitut (LNE) aufgebaut, es soll als Referenzgerät für die europäische Gasindustrie eingesetzt werden.

Brennwertsensor zur Durchführung eichpflichtiger Messungen

Falls Brennwertmessungen im geschäftlichen Verkehr Verwendung finden, unterliegen sie in Deutschland auch nach Inkrafttreten der MID den Bestimmungen der Eichordnung, in der eine Eichfehlergrenze von 0,8 % festgelegt ist. Da die in Deutschland verwendeten Erdgase aufgrund ihrer Herkunft unterschiedliche Zusammensetzungen und damit unterschiedliche Brennwerte aufweisen, sind eine Vielzahl kosten- und zeitintensiver Brennwertbestimmungen, z. B. durch gaschromatographische Analyse, durchzuführen.

In Zusammenarbeit mit der *TU Bergakademie Freiberg* wurde in einem von der *Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF)* geförderten Projekt ein kalorimetrischer Sensor zur Brennwertbestimmung von Erdgasen entwickelt.

Hauptaufgabe der PTB war dabei die Entwicklung einer miniaturisierten Gasmengenmessung und -regelung, die im Prototyp auf der Basis eines thermischen Massestromsensors in Siliziumtechnologie realisiert wurde. Das Gesamtgerät soll als preiswertes (Kosten unter 5000 EUR) und leicht transportables Messgerät zur Bestimmung der Gasqualität sowohl für Abrechnungszwecke als auch zur Prozessüberwachung eingesetzt werden. Ein Vorteil dieses Messgeräts liegt darin, dass nicht nur reine Erdgase erfasst werden können, sondern dass auch der Brennwert von Biogasen und von Brenngasen mit dominierendem Wasserstoff- und Propananteil gemessen werden kann.

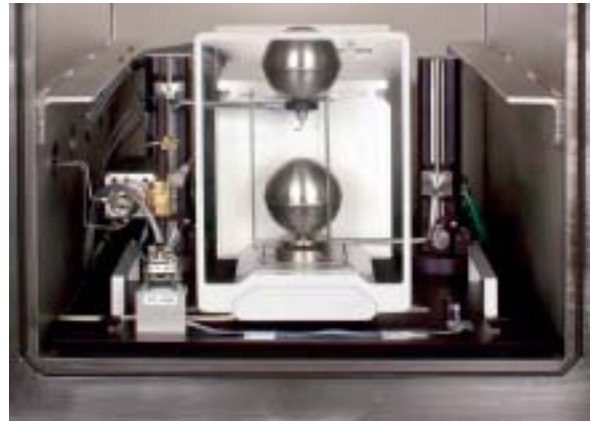


Bild 1: Wägeeinrichtung zur Bestimmung der Gasmasse für die Brennwertmessung mit Hilfe eines isoperibolen Präzisionskalorimeters (Detail)



Bild 2: Isoperiboles Präzisionskalorimeter zur Brennwertbestimmung von Erdgasen (Gesamtansicht)



Bild 3: Dieses isoperibole Präzisionskalorimeter zur Brennwertbestimmung von Erdgasen soll als Referenzgerät für die europäische Gasindustrie eingesetzt werden.

Untersuchung von TransfERNormalen für die Gasanalytik

Der Bestimmung der Zusammensetzung von Gasen kommt insbesondere im Umwelt- und Erdgassektor eine große Bedeutung zu. Rückgeführte Kalibriergase stellen die Voraussetzung für präzise Messungen in diesen Bereichen dar. In Deutschland erfolgt der Anschluss an die nationalen Normale der Gasanalytik bisher ausschließlich mit Hilfe von durch Wägung hergestellter Gasgemische in Druckgasbehältern, die jedoch für kleine und mittelständische Unternehmen häufig zu teuer sind.

Eine mögliche Lösung dieses Problems ist die zusätzliche Verwendung dynamischer Verfahren zur Herstellung von Kalibriergasgemischen. Eine aus wirtschaftlicher Sicht günstige Variante ist die Verwendung von Gasmischpumpen zur dynamisch-volumetrischen Herstellung von Gasgemischen. Gasmischpumpen bestehen aus zwei oder mehr pneumatisch getrennten, in ihrer Geometrie genau bekannten Kolben-Zylinder-Systemen, die gemeinsam angetrieben werden. Diese Geräte sind sehr stabil, robust und können mit verschiedensten Gasen betrieben werden.

In Zusammenarbeit mit der *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung* (BAM) und der Firma *Wösthoff Messtechnik GmbH* wurde untersucht, inwieweit diese Pumpen den Ansprüchen von TransfERNormalen für die Praxis gerecht werden. Es konnte festgestellt wer-

den, dass aus der Geometrie der Pumpen im Rahmen der Unsicherheit direkt auf die Gaszusammensetzung geschlossen werden kann. Die in der PTB durchgeführten Praxistests mit üblicher Laborausstattung zeigten Ergebnisse mit relativen Unsicherheiten der Gemischzusammensetzung von $\leq 0,5\%$. Bei Untersuchungen in der BAM zeigte sich, dass mit höherem Aufwand relative Unsicherheiten der Gemischzusammensetzung von $\leq 0,2\%$ erreicht werden können. Die Gasmischpumpen sind somit auch metrologisch als TransfERNormale geeignet.

Kooperation PTB – Deutscher Wetterdienst im Bereich der Spurenwasserdampf-Messung

Wasserdampf ist das dominante Treibhausgas in der Erdatmosphäre und hat mit etwa 60 % vom totalen Treibhauseffekt aller Treibhausgase (CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 u. a.) den größten Anteil. Deshalb ist der Schwerpunkt der meteorologischen Forschung der führenden Wetterdienste auf die präzisere Messung und langfristige Beobachtung des Wasserdampfs gerichtet. Die messtechnischen Voraussetzungen für die genaue routinemäßige Messung des Wasserdampfs insbesondere der oberen Erdatmosphäre sind aber bisher noch nicht gegeben. Der Wasserdampf-Klimatologie fehlen präzise langjährige Messreihen. Um die messtechnischen Forderungen erfüllen zu können, sollen möglichst schnell und mit hoher Priorität eine Reihe grundsätzlicher Fragen gelöst werden.



Bild 4: Feuchtegenerator im Bereich von -20 °C bis $+60\text{ °C}$ Taupunkt zur Rückführung von Feuchtemessgeräten

Zu diesem Zweck wurde u. a. im Juni 2005 eine Kooperations-Vereinbarung zwischen der PTB und dem *Deutschen Wetterdienst* (DWD) abgeschlossen. Arbeitsziele sind u. a. die Erarbeitung wissenschaftlicher Grundlagen für Spurenfeuchte-Messung und Dampfdruckgleichungen im Temperaturbereich von -30 °C bis 90 °C , der Einsatz und die Charakterisierung vorhandener Messgeräte und Sensoren und die Rückführung der Messtechnik auf die SI-Einheiten (Bild 4).

Als erstes hat die PTB dem DWD einen neu entwickelten Spurenfeuchte-Generator auf Permeationsbasis (Bild 5) zur Kalibrierung und Rückführung der beim DWD vorhandenen Messtechnik zur Verfügung gestellt.

Neue Regelungen für die Bestimmung der Getreidefeuchte

In Deutschland werden jährlich ca. 40 Mio. t bis 50 Mio. t Getreide gehandelt. Für die verschiedenen Verwendungszwecke (Backen, Brauen, Fütterung) und auch für die Lagerung sind die quantitativen Anteile der verschiedenen Inhaltsstoffe von ausschlaggebender Bedeutung. Deshalb erfolgt im Getreide-

handel die Preisbildung vornehmlich in Abhängigkeit der relevanten Inhaltsstoffe wie Feuchte, Protein oder Öle. Unter das Eichgesetz fallen zurzeit nur die Messgeräte zur Schnellbestimmung des Parameters Feuchte (Getreidefeuchtemessgeräte), eine Ausweitung der Eichpflicht auf die Messgröße Proteingehalt von Gerste und Weizen ist in den letzten Jahren von verschiedenen Verbänden aus dem Getreidesektor nachdrücklich gefordert worden und wird deshalb in Zusammenarbeit von Eichbehörden und PTB vorbereitet.

2005 wurde zwischen der PTB und der *Bundesforschungsanstalt für Ernährung und Lebensmittel* (BFEL) eine Verwaltungsvereinbarung getroffen, die eine Zusammenarbeit im Bereich der analytischen Metrologie bei der Feuchte von Getreide regelt. Die BFEL übernimmt für die PTB die Aufgabe, für Getreidefeuchtemessgeräte, die der Eichpflicht unterliegen, das nationale Referenzverfahren zu betreiben. Zur Gewährleistung der einheitlichen Anwendung des Referenzverfahrens im nationalen Rahmen (PTB, Eichbehörden etc.) wird die BFEL zudem regelmäßige Vergleichsbestimmungen organisieren.

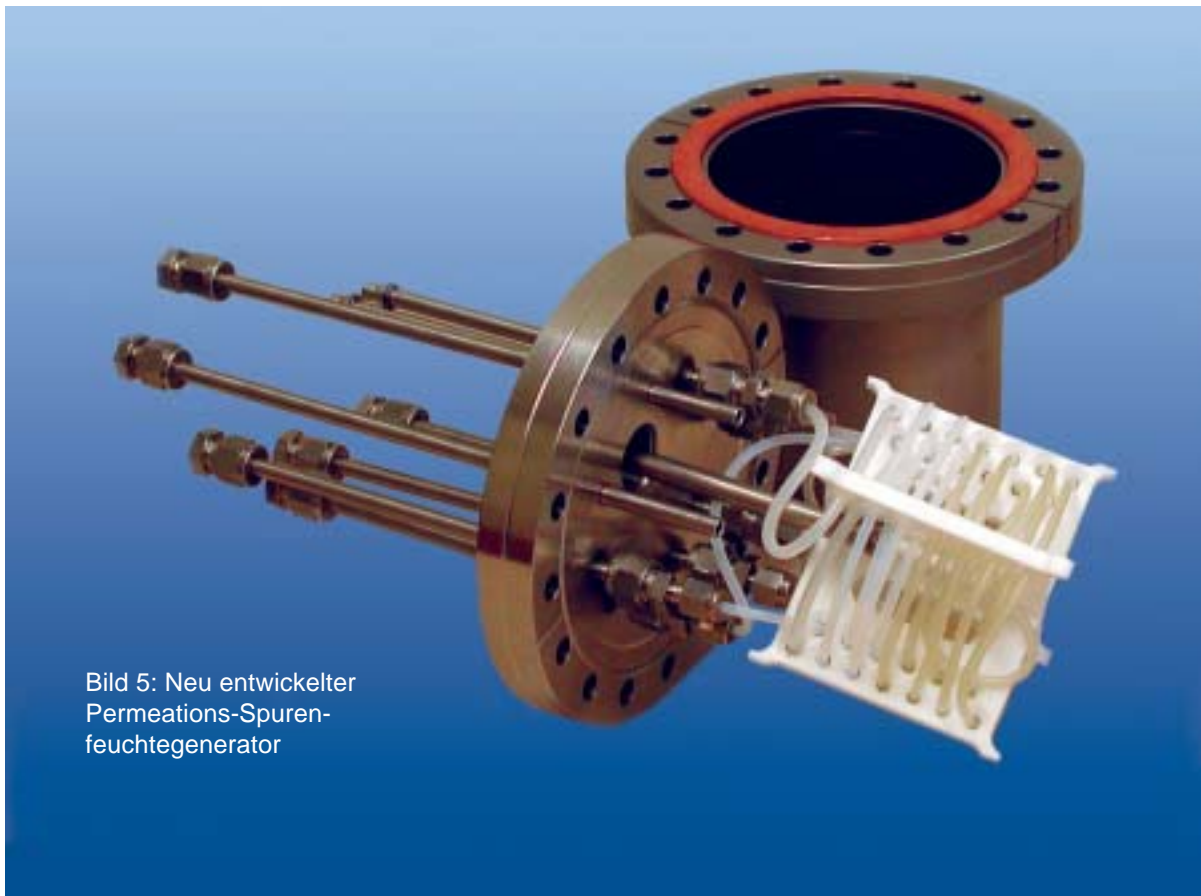


Bild 5: Neu entwickelter Permeations-Spurenfeuchtegenerator

PTB/DAM Workshop „Kfz-Abgasmessgeräte“ für Eichbehörden

Im April 2005 fand in der PTB ein zweitägiger Workshop „Kfz-Abgasmessgeräte“ in Zusammenarbeit mit der *Deutschen Akademie für Metrologie* (DAM) statt. Mit dieser Veranstaltung hat die PTB einen speziellen Workshop angeboten, bei dem die Arbeit am Gerät im Mittelpunkt stand. Der Workshop richtete sich ausschließlich an Eichbeamte, die mit der Eichung von Kfz-Abgasmessgeräten beauftragt sind.

Die grundsätzlichen chemisch-physikalischen Verfahren der Abgasmessung haben sich seit vielen Jahren nicht verändert. Auf Grund von gesetzlichen Änderungen im Bereich der Fahrzeugdiagnose werden jedoch verstärkt technische Änderungen an den Geräten vorgenommen. Der allgemeine Trend geht vom Abgasmessgerät hin zu komplexen Messsystemen. Dies stellt die Eichbeamten bei der Eichung oft vor besondere Anforderungen. Ziel des Workshops war es, Probleme bei der Handhabung der Geräte durch Übung am Gerät zu beseitigen, Kenntnisse zur Eichung zu vertiefen und Rückschlüsse aus den Erkenntnissen der Eichung zum Zulassungsverfahren zu gewinnen.

Die PTB wählte ca. 40 Geräte von zehn Herstellern aus und organisierte die Arbeit an diesen Geräten. Insgesamt nahmen am Workshop 30 Eichbeamte sowie neun Vertreter von Herstellerfirmen teil. Bei der Arbeit an den Messgeräten, die vorher als Prüfstationen eingerichtet wurden, stellten die Hersteller die wesentlichen Vorgehensweisen vor, bevor die Teilnehmer an den Geräten arbeiten konnten und Probleme diskutiert sowie Fragen beantwortet wurden.

Der Workshop hat den Erfahrungsaustausch zwischen Eichbeamten, PTB und Herstellern angeregt. Die Ergebnisse werden bei künftigen Eichungen zur Erleichterung beitragen sowie bei der Zulassungstätigkeit Berücksichtigung finden.

Viskosität von Autolack und Schmierölfilmen

Eine wichtige Stoffgröße zur Charakterisierung von Beschichtungsstoffen, wie z. B. Autolacken, ist neben der Viskosität die Fließgrenze (kleinste Schubspannung, oberhalb derer sich ein plastischer Stoff wie eine Flüssigkeit verhält). Sie bestimmt u. a. wesentlich die Nassschichtdicke, die Verlauf- und Ablaufeigenschaften, die Lagerstabilität und die Ausrichtung von Effektpigmenten im Lack. Zur Bestimmung der Fließgrenze müssen für jede Substanzklasse (z. B. Wasserbasislacke, Dispersionen) detaillierte Verfahrensvorgaben für den Messablauf erarbeitet werden. Besondere Bedeutung kommt dabei der Überprüfung des Verfahrens mit Referenzflüssigkeiten zu. In einem vom DIN-Arbeitskreis „Rheologie“ (NPF/NAB-AK 21.1) durchgeführten Ringversuch zum Vergleich verschiedener Messverfahren zur Fließgrenzenbestimmung hat sich eine in der PTB entwickelte zertifizierte Referenzflüssigkeit mit Fließgrenze (Bild 6) als besonders geeignet erwiesen.

Schmierstoffe, überwiegend als Motoren- und Getriebeöle eingesetzt, werden bezüglich ihrer rheologischen Eigenschaften durch die Druck- und Temperaturabhängigkeit der Viskosität (Bereiche typisch bis 100 MPa und 150 °C) sowie der Viskosität bei hohen Schergeschwindigkeiten ($> 10^6 \text{ s}^{-1}$) charakterisiert. Darüber hinaus sind die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit wichtige Stoffgrößen. Da fast alle herkömmlichen Schmierstoffe umweltgefährdend sind (toxisch, Wasser gefährdend), wurden im Rahmen eines vom BMWA geförderten Forschungsprojekts zur Entwicklung neuer Schmierkonzepte in Kooperation mit der *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung* und mehreren Industriepartnern aus dem Automobilbereich umweltfreundliche Schmierstoffformulierungen (biologisch schnell abbaubar, untoxisch, nicht Wasser gefährdend) auf ihre Eignung als Motoröle untersucht. Die meisten von ihnen basieren auf Estern, Mischungen von Estern und Kohlenwasserstoffen oder Polyalkylenglykolen. Aus Messungen der Druckabhängigkeit der Viskosität mit einem Kugelfallviskosimeter (bis 100 MPa) wurde die Schmierfilmdicke relativ zu einem polymerhaltigen Referenzöl auf Kohlenwasser-

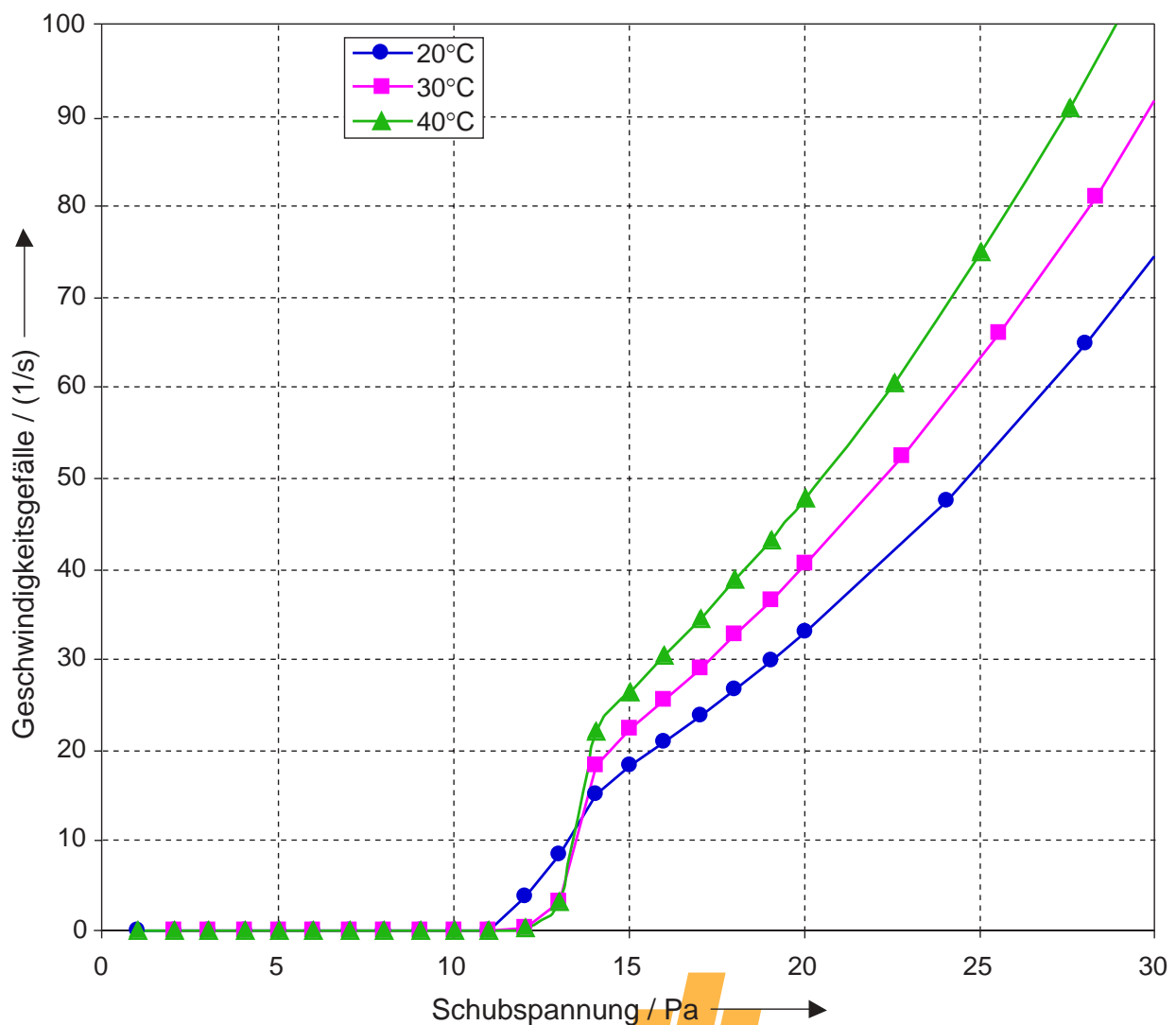
stoff-Basis bestimmt. Die Schmierfilmdicke ist eine wichtige Kenngröße für den Motorenverschleiß. Es zeigte sich, dass polymerfreie alternative Motoröle nahezu die Schmierfilmdicke polymerhaltiger Motoröle auf Kohlenwasserstoff-Basis erreichen. Im Blick auf die Motorkühlung sind sie den konventionellen Ölen sogar meist überlegen.

Messung kleinster Dichteunterschiede in Silizium-Einkristallen

Für das internationale Projekt zur Neubestimmung der Avogadro-Konstante soll die Homogenität eines Einkristalls aus hoch angereichertem Silizium-28 durch Messung der Dichteunterschiede von Proben aus diesem Kristall untersucht werden. Hierzu ist es erforderlich, dass das für diese Messungen eingesetzte Verfahren der Druckflotation (Bild 7) soweit verbessert wird, dass eine relative Messunsicherheit von $\leq 1 \cdot 10^{-8}$ (bezogen auf die Dichte von Silizium) erreicht wird. Durch die verbesserte Neubestimmung der Kompressibili-

tät der in der Druckflotation verwendeten Auftriebsflüssigkeit konnte der hierdurch bedingte Unsicherheitsbeitrag auf ein Viertel gesenkt werden. Da der Hauptbeitrag zur Messunsicherheit durch Temperaturschwankungen bedingt ist, wurde ein Temperaturregler entwickelt, mit dem Temperaturschwankungen während einer mehrere Stunden dauernden Dichtevergleichsmessung kleiner als $10 \mu\text{K}$ (Standardabweichung) gehalten werden können. Erste Tests des Reglers ergaben eine Standardabweichung von $20 \mu\text{K}$, was eine Gesamtmessunsicherheit für den Dichtevergleich von $2 \cdot 10^{-8}$ ergibt. Es ist zu erwarten, dass durch die Verwendung besonders rauscharmer Bauteile die Regelschwankungen auf den angestrebten Wert von $10 \mu\text{K}$ reduziert werden können.

Bild 6: Fließkurven bei verschiedenen Temperaturen für eine nicht-newtonsche Referenzflüssigkeit mit viskoplastischem Verhalten (Fließgrenze)



Internationales Seminar zur Präzisionsdichtemessung von Festkörpern und Flüssigkeiten

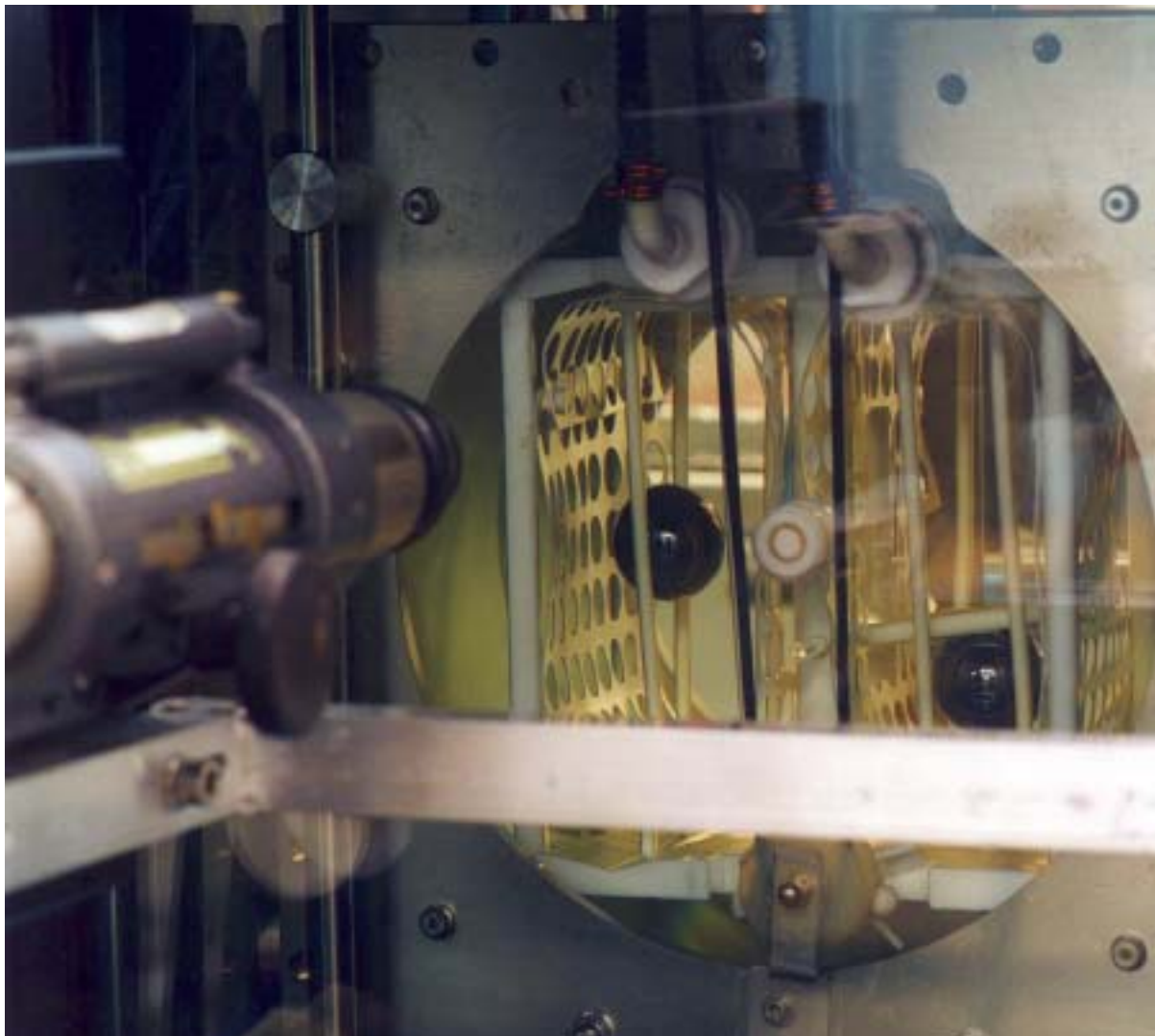
Neue messtechnische Entwicklungen im Bereich der Präzisions-Dichtemessung haben in den letzten Jahren zu einer erheblichen Verringerung der Messunsicherheit geführt. Mit beeinflusst durch die Arbeiten zur Neubestimmung der Avogadro-Konstante wurden neue Verfahren zur Realisierung von Dichtenormalen entwickelt, anwendungsorientierte Verfahren wurden verbessert.

In einem dreitägigen internationalen PTB-Seminar (Bild 8) wurde vom 24. bis 26. Oktober 2005 der neueste Stand der Dichtemess-technik in 14 Fachvorträgen präsentiert. Dabei wurde besonders auch in der Diskussion ein Schwerpunkt auf Fragen der Messunsicherheit gelegt. Die Themen umfassten die Kalibrierung von Dichtenormalen durch interferometrische Verfahren, Dichtevergleiche mit

den Methoden der hydrostatischen Wägung, der magnetischen Flotation und der Druckflotation. Weiterentwicklungen anwendungsorientierter Verfahren, wie Schwingungsverfahren, der Einsatz von Magnetschwebekuppungen bei der hydrostatischen Wägung wurden ebenso vorgestellt wie neueste Messergebnisse zur Dichte von Wasser und Quecksilber als metrologische Bezugsgrößen.

Die große Zahl von 55 Teilnehmern aus Metrologieinstituten, Kalibrierlaboratorien, Forschungsinstituten, Eichbehörden und von Geräteherstellern weltweit (20 Länder) verdeutlicht die Bedeutung von Dichtemessungen. Die Beiträge werden in der Zeitschrift „Measurement Science and Technology“ veröffentlicht.

Bild 7: Dichtevergleich von zwei Silizium-Kugeln mit der Methode der Druckflotation



Finite-Elemente-Untersuchungen zum Verformungskoeffizienten bei Hochdrucknormalen

Präzise Hochdruckmessungen bis zu 1 GPa stellen eine wesentliche Voraussetzung für mehrere technische Spezialverfahren dar, z. B. beim Wasserstrahlschneiden oder beim Kaltstrecken von Kraftstoffeinspritzsystemen für Kraftfahrzeuge. Entsprechend hohe Drücke werden mit Hilfe von Kolbenmanometern realisiert. Dabei kommt es zu elastischen Verformungen der verwendeten Bauteile. Die Unsicherheit der Realisierung des Drucks hängt deshalb maßgeblich vom Druckverformungskoeffizienten (λ) dieser Kolbenmanometer ab. Das von der PTB koordinierte EUROMET-Projekt 463 mit sechs Teilnehmern wurde mit dem Ziel durchgeführt, Untersuchungen mittels Finite-Elemente-Methoden (FEM) für die λ -Bestimmung auf den Druckbereich bis 1 GPa auszudehnen, dimensionelle Eigenschaften von Kolben und Zylindern in die Modelle zu integrieren und Unsicherheitsanalysen auf Basis einer breiten theoretischen und experimentellen Untersuchung der für die Analysen relevanten Größen durchzuführen. Zwei 1-GPa-Kolben-Zylinder-Systeme, eines von der PTB und eines vom französischen BNM-LNE, wurden für die Untersuchung gewählt.

Es zeigte sich, dass FEM ein hilfreiches Werkzeug zur Voraussage des Druckverformungskoeffizienten darstellt. Weitere Untersuchungen sind jedoch erforderlich, um die Verlässlichkeit der mittels FEM berechneten Unsicherheiten zu prüfen.

Bild 8: 210. PTB-Seminar „Precision Density Measurements of Solids and Liquids“



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) neuer Partner im Netzwerk für die Metrologie in der Chemie in Deutschland

Im März wurde eine Verwaltungsvereinbarung mit dem BVL für eine Kooperation im Bereich der Lebensmittelanalytik unterzeichnet. Erstmals wird damit ein Partner aus dem Bereich der Lebensmittelanalytik in das Netzwerk für die Metrologie in der Chemie integriert.

(B. Güttler, FB 3.1, bernd.guettler@ptb.de)

Neues primäres Messverfahren für die Metrologie in der Chemie auf Basis der Raman-Spektroskopie

Mit Hilfe isotope-markierter Standards ist es erstmals gelungen, die hochempfindliche und zugleich molekulspezifische oberflächenverstärkte Ramanstreuung als quantitatives Messverfahren zu betreiben und zur Konzentrationsbestimmung klinischer Analyte im Blutserum einzusetzen. (B. Güttler, R. Stosch, FB 3.1, rainer.stosch@ptb.de)

Rückführung von klinisch-chemischen Messungen in Schweden auf die primären Normale der PTB

Durch Bestimmung der Messgrößen Glucose und Cholesterol mit den in der PTB verwendeten massenspektrometrischen Primärverfahren wurden Referenzwerte für zwei Serum-pools ermittelt, die für Vergleichsmessungen schwedischer Routinelaboratorien in der klinischen Chemie dienen. Hiermit ist die Grundlage für eine Rückführung der entsprechenden Messungen auf das SI gegeben.

(A. Henrion, FB 3.1, andre.henrion@ptb.de)

Erstes Kalibrierlaboratorium für elementanalytische Messungen in der klinischen Chemie fachlich begutachtet

Auf Basis der Begutachtung des *Referenzmesslaboratoriums II* an der *Medizinischen Hochschule Hannover* konnte die Akkreditierungsstelle des DKD bei der PTB erstmals ein klinisch-chemisches Kalibrierlaboratorium für die Messung einer anorganisch-chemischen Messgröße akkreditieren.

(D. Schiel, FB 3.1, detlef.schiel@ptb.de)

EUROMET-Projekte zur Darstellung der Gasfeuchte

Die Messung von Gasfeuchten wurde in zwei EUROMET-Projekten sowohl in einem Ringvergleich zwischen 24 Staatsinstituten unter Beteiligung der PTB als auch in einem bilateralen Vergleich zwischen Deutschland und Österreich für Taupunkte in einem Bereich von -20 °C bis $+60\text{ °C}$ untersucht. In beiden Projekten konnten sehr gute Übereinstimmungen zwischen den Teilnehmern erzielt werden.

(N. Böse, FB 3.2, norbert.boese@ptb.de)

Internationaler Schlüssel-Vergleich für Druckmessungen

Im Druckbereich von 10 MPa bis 100 MPa wurde der Schlüsselvergleich CCM.P-K7 mit insgesamt neun Staatsinstituten weltweit unter Beteiligung der PTB durchgeführt. Die PTB wurde darüber hinaus gebeten, im gleichen Druckbereich an regionalen Vergleichen in COOMET und APMP teilzunehmen. Die guten Resultate der PTB schaffen eine verlässliche Basis für die Verknüpfung der regionalen mit den weltweiten Ringvergleichen.

(W. Sabuga, FB 3.2, wladimir.sabuga@ptb.de)

Massenvergleichs-Apparatur zur Kontrolle der Reinigung von Silizium-Dichtnormalen

Siliziumkugeln können in der PTB als Dichtnormale mit einer Unsicherheit von 0,1 ppm kalibriert werden. Dabei muss sichergestellt sein, dass die vor der Messung erforderliche Reinigung der Kugeln keinen Einfluss auf deren Masse hat. Hierfür wurde eine Massenvergleichs-Apparatur aufgebaut, die es erlaubt, einen Massenvergleich zwischen zwei 1-kg-Silizium-Kugeln mit einer Standardabweichung von $1\text{ }\mu\text{g}$ durchzuführen.

(H. Bettin, M. Vogtmann, FB 3.3, horst.bettin@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Erdgasabrechnung durch Gasbeschaffenheitsmessgeräte

Aufgrund der Änderung der Beschaffenheit der in Deutschland gehandelten Erdgase wurde ein neues Volumenumwertungsverfahren eingeführt. Bei diesem Verfahren ist die Gasanalyse Eingangsgröße. Die eingesetz-

ten Analysengeräte, sog. Gasbeschaffenheitsmessgeräte, wurden damit eichpflichtig, deren Bauartzulassung stellt eine neue anspruchsvolle Aufgabe dar. Derzeit wird ein Referenzverfahren zur Zertifizierung der notwendigen Prüfgase entwickelt. (B. Anders, FB 3.3, bert.anders@ptb.de)

Explosionsfähige Atmosphäre in Benzinabscheidern an Tankstellen

In einem Forschungsvorhaben wurde das Auftreten explosionsfähiger Atmosphäre in Leichtflüssigkeitsabscheidern an Tankstellen untersucht. Durch Gaskonzentrationsmessungen wurde ermittelt, unter welchen Bedingungen Ottokraftstoffe in die Abscheider gelangen können, ob sich in diesen Fällen eine explosionsfähige Atmosphäre bildet und wie lange diese im Abscheider vorhanden sein kann. Dies sind wichtige Informationen für die Betreiber von Tankstellen zur Festlegung von explosionsgefährdeten Bereichen (Zonen) in den Leichtflüssigkeitsabscheidern. (D.-H. Frobese, J. Hübner, FB 3.4, dirk-hans.frobese@ptb.de)

Untersuchung von elektrostatisch bedingten Explosionen und Bränden

Durch Missachtung von Zündgefahren oder Betriebsvorschriften kommt es zu Explosionen und Folgebränden. Aus der Untersuchung von Ursachen und Folgen realer, durch elektrostatische Entladungen verursachter Unfälle werden neue Empfehlungen für den sicheren Betrieb hergeleitet. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Primäres Verfahren zur direkten „in-line Kalibrierung“ von Messzellen für die Leitfähigkeitsmessung im Reinstwasserbereich erfolgreich erprobt

Mit einem neuartigen Verfahren ist es möglich, im Reinstwasserbereich eingesetzte Leitfähigkeitsmesszellen direkt an eine primäre Messzelle anzuschließen und mit vor Ort aufbereitetem Reinstwasser in-line, im Wasserkreislauf zuverlässig zu kalibrieren. (P. Spitzer, FB 3.1, petra.spitzer@ptb.de)

Ringvergleich für den Taupunkt im Messbereich von -20 °C bis $+60\text{ °C}$

Im Rahmen eines Ringvergleichs zwischen der PTB und sieben DKD-Kalibrierlabora-

torien wurden Taupunkte in einem Bereich von -20 °C bis $+60\text{ °C}$ gemessen. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung, lediglich in einem Fall mussten Korrekturmaßnahmen eingeleitet werden, um eine gute Übereinstimmung mit der PTB zu erreichen. (N. Böse, FB 3.2, norbert.boese@ptb.de)

Ringvergleich für den Druck im Messbereich 0,3 MPa absolut

Ein Ringvergleich zwischen der PTB und zehn DKD-Kalibrierlaboratorien zu Druckmessungen im Absolutdruckbereich von 0 MPa bis 0,3 MPa zeigte eine gute Übereinstimmung. Die beteiligten Kalibrierlaboratorien sind in der Lage, Kalibrierungen auf einer verlässlichen Grundlage durchzuführen. (W. Schultz, FB 3.2, wilfried.schultz@ptb.de)

Explosionsbereiche und Zündtemperaturen bei erhöhten Ausgangsdrücken

Durch experimentelle Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich mit steigendem Druck der Explosionsbereich für Dampf/Luft-Gemische deutlich aufweitet. Die für die Zündtemperatur bei diesen Drücken notwendige Brennstoffkonzentration liegt nahe der jeweiligen oberen Explosionsgrenze. (E. Brandes, FB 3.4, elisabeth.brandes@ptb.de)

Update der Datenbank CHEMSAFE ermöglicht Berechnung der Normspaltweite von Gemischen

Die Inhouse-Version der Datenbank CHEMSAFE bietet in der aktuellen Version ein weiteres Berechnungsverfahren an. Es ist möglich, die Normspaltweite von Gemischen zu berechnen, wenn in der Datenbank die Normspaltweiten für die Gemischkomponenten gefunden werden. Voraussetzung für dieses Verfahren ist eine eindeutig definierbare Stöchiometrie. Da sich deshalb nicht alle brennbaren Stoffe nach dieser Methode korrekt berechnen lassen, ist in der Datenbank CHEMSAFE die Berechnung auf die Stoffe beschränkt, deren Verbrennungsprodukte zweifelsfrei bekannt sind.

Mit dem Update 2005 wurden 44 reine Flüssigkeiten sowie zehn Gemische brennbarer Flüssigkeiten neu in die Datenbank aufgenommen. (W. Möller, FB 3.4, wolfgang.moeller@ptb.de)

Flammen löschen mit porösen Werkstoffen

Im Rahmen eines von der AiF geförderten Kooperationsprojekts werden die grundlegenden Anforderungen an gesinterte Faserstrukturen für deren Einsatz in explosionsgeschützten Geräten und Schutzsystemen untersucht.

(D. Markus, FB 3.5, detlef.markus@ptb.de)

Ein neuartiges eigensicheres Energieversorgungskonzept

Mit dem Energieversorgungssystem DART („Dynamic Arc Recognition Technology“) steht ein besonders für den Feldbereich geeignetes leistungsstarkes eigensicheres Energieversorgungskonzept zur Verfügung, mit dem es gelingt, den entscheidenden Nachteil der Eigensicherheit, den geringen Leistungsumsatz, zu beseitigen. DART ermöglicht die Zulassung eigensicherer Betriebsmittel im Sinne der ATEX-Richtlinie von bis zu 10 W auch bei Leitungslängen bis zu 1000 m. Das Konzept beruht auf der schnellen Erkennung und Auswertung anlaufender zündfähiger Zustände im Feld mit erforderlichenfalls sofortiger Abschaltung. Dazu ist eine ganzheitliche sicherheitstechnische Betrachtung aller im System integrierter Komponenten notwendig.

(U. Gerlach, FB 3.6, udo.gerlach@ptb.de)

Verfahren zur Zündgefahrenbewertung von explosionsgeschützten mechanischen Geräten

In mehreren PTB-Workshops wurde unter Mitwirkung von Herstellern explosionsgeschützter Geräte eine systematische Vorgehensweise und ein Berichtsschema zur Zündgefahrenbewertung diskutiert und den Bedürfnissen des Anwenderkreises angepasst. Das Verfahren soll in die harmonisierten Normen zur Richtlinie 94/9/EG einfließen.

(M. Beyer, FB 3.7, michael.beyer@ptb.de)

Zündfähigkeit von mechanischen Funken in explosionsfähigen Atmosphären

Im Rahmen des EU-Projekts MECHEX (Mechanical Ignition Hazards in Potentially Explosive Gas and Dust Atmospheres; EU-Vertrag GRD2-CT-2001-30553) wurden in der PTB Zündvorgänge durch einzelne, künstlich erzeugte heiße Partikel in explosionsfähigen Gas- und Staubatmosphären sowie Staubschichten untersucht.

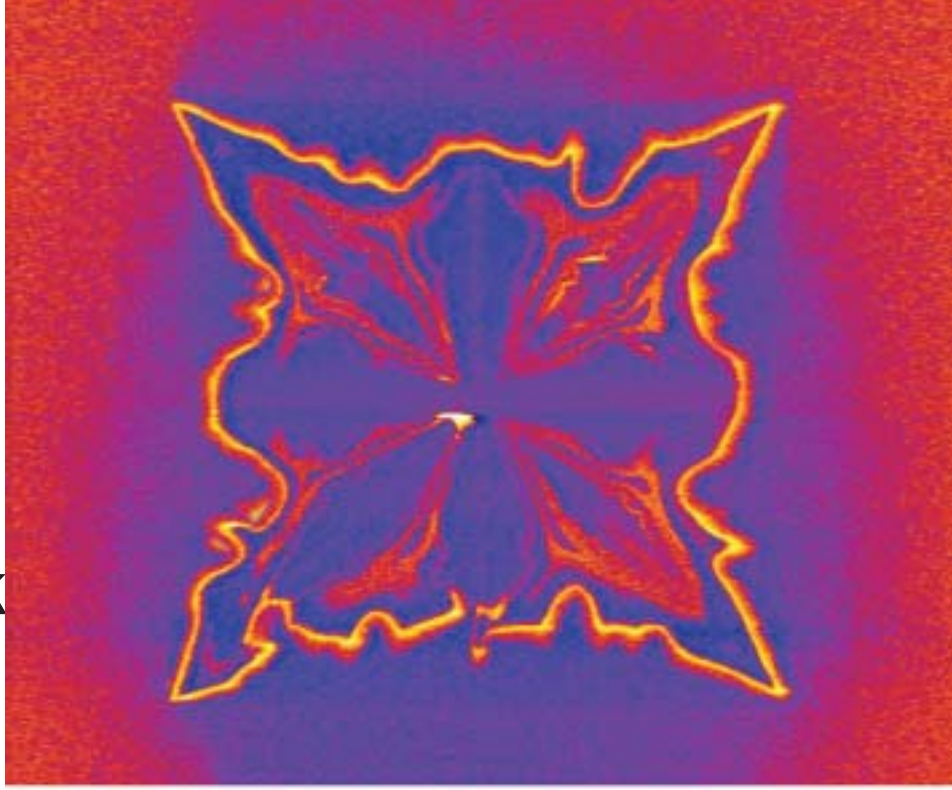
(M. Beyer, FB 3.7, michael.beyer@ptb.de)

„Erhöhte Sicherheit“ – jetzt auch bei umrichtergespeisten Antrieben ohne Festlegung des Umrichtertyps möglich

Als Ergebnis eines Forschungsvorhabens gelang es, den Prüfaufwand für umrichtergespeiste Antriebe der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“ deutlich zu reduzieren und auch die Umrüstung bestehender, netzgespeister Antriebe auf Umrichterbetrieb mit vertretbarem Aufwand zu ermöglichen. Oberstes Ziel war es, das bisherige Sicherheitsniveau keinesfalls abzusenken.

(C. Lehrmann, FB 3.7, christian.lehrmann@ptb.de)

Optik



Berichte der Abteilungen

Abteilung

4

Optik

Die Arbeitsgebiete der Abteilung *Optik* erstrecken sich über alle vier Geschäftsfelder der PTB, die Grundlagen der Metrologie, die Metrologie für die Wirtschaft, die Metrologie für die Gesellschaft und die Internationalen Angelegenheiten. Die Abteilung *Optik* organisiert ihre Arbeit in fünf Fachbereichen, in denen optische Messmethoden für die bestmögliche Darstellung von Einheiten und der zuverlässigen und kostengünstigen Weitergabe der Einheiten in einem weltweit einheitlichen Messwesen eingesetzt werden. Daneben werden neuartige optische Verfahren für die Präzisionsmesstechnik und für optische Zukunftsgebiete entwickelt. Ein Schwerpunkt liegt in der Beratung und Unterstützung nationaler und internationaler Kunden aus Industrie, Forschung und Gesellschaft bei besonderen optischen Messaufgaben.

Der Fachbereich *Photometrie und angewandte Radiometrie* realisiert optische Einheiten und Messgrößen der verschiedenen untereinander verknüpften radiometrischen und photometrischen Einheiten im Wellenlängenbereich oberhalb von 200 nm und gibt sie mit angemessen kleiner Messunsicherheit weiter.

Im Fachbereich *Bild- und Wellenoptik* werden Schwerpunkte bei der optischen Formmessung und der quantitativen und höchstauflösenden Mikroskopie bearbeitet. Dazu wer-

den Grundlagenuntersuchungen zur Entwicklung von Messverfahren und industrienahen Umsetzungen insbesondere dort durchgeführt, wo eine rasche Weitergabe der neuen Entwicklungen erforderlich oder wo eine Rückführung auf das internationale Einheitensystem wichtig ist.

Längeneinheit und Quantenoptik ist der Name des Fachbereichs, in dem u. a. Wellenlängen vom optischen bis in den röntgenoptischen Bereich als mikroskopische Maßstäbe für die einfache, aber genaue Weitergabe der Längeneinheit benutzt werden. Für die höchstgenauen Messungen im sichtbaren Spektralbereich werden dazu in Forschung und Entwicklung modernste Methoden der Quantenoptik eingesetzt, die z. B. auf rauschärmsten Lasern, Femtosekundenkammgeneratoren, mikrostrukturierten Fasern oder ultrakalten Atomen basieren.

Zeit und Frequenz nehmen unter den Einheiten eine besondere Stellung ein, da sie sowohl die genauesten Messungen mit stetig zunehmender Präzision erlauben als auch mit geringen Kosten breit verfügbar sind. Der Fachbereich gleichen Namens entwickelt und betreibt daher die genauesten Atomuhren und stellt die gesetzliche Zeit in Deutschland dar, verbreitet sie über ganz Europa und trägt zur internationalen Weltzeit an prominenter Stelle bei.

Im Fachbereich *Optische Technologien* werden genaue Transmissions- und Reflexionsmessungen für Industrie, Verbände und andere Kunden durchgeführt und neuartige optische Messmethoden mit den zukünftigen Schwerpunkten Messtechnik für die Mikro- und integrierte Optik entwickelt.

Einige der wichtigsten Entwicklungen und Arbeiten in der Abteilung *Optik*, bei denen im Jahr 2005 besondere Fortschritte erzielt wurden, werden im Folgenden – nach Schwerpunkten gegliedert – dargestellt.

Titelbild

Falschfarbendarstellung des Bildes einer mit dem Rasterelektronenmikroskop aufgenommenen Maskenstruktur (Chrom auf Quarz), wobei im normalen Hochvakuummodus starke Verzerrungen des Bildes durch Aufladungseffekte auftreten (oben), die durch höheren Gasdruck vermieden werden (unten).

Lichtmessung – ein Zukunftsfeld

Neuartige Lichtquellen für die ressourcenschonende Erzeugung von Licht, als Werkzeug mit besonderen Möglichkeiten für die Mikro- und Makrotechnik oder in der Beleuchtung werden in den nächsten Jahren klassische Lichtquellen in immer stärkerem Maße verdrängen. Damit entstehen neue Herausforderungen bei der quantitativen Bewertung von Licht unter besonderer Berücksichtigung der Empfindlichkeit des menschlichen Auges, da z. B. das von den neuen Lichtquellen ausgestrahlte Licht ungewöhnliche spektrale und räumliche Eigenschaften besitzt, für die eine neuartige Messtechnik benötigt wird. Die PTB hat in den letzten Jahren die dazu erforderliche Instrumentierung und geeignete Verfahren neu entwickelt. So wurde z. B. in diesem Jahr im Albert-Einstein-Bau der PTB nach mehrjähriger Entwicklungszeit ein neues Roboter-goniophotometer aufgebaut, das gegenwärtig erprobt wird (Bild 1).

Ein Roboterarm richtet dabei die zu untersuchende Strahlungsquelle aus, die bis zu 2,5 m lang sein darf, und positioniert sie im Zentrum des Goniophotometers. Dank der großen zulässigen Abmessungen können auch zukünftige Anforderungen von Spezialleuchten, Clusterlichtquellen oder ganzen „Lichttapeten“ erfüllt werden. Zwei weitere Roboter richten die Messköpfe zum Zentrum aus und führen sie auf Bahnen mit Radien bis zu 3,0 m um die Strahlungsquelle herum. Mit diesem neuartigen Konzept lässt sich die Strahlungsleistung der Strahlungsquelle in jeder Raumrichtung und zusätzlich in variabler Entfernung messen. Mit dem neuen Messgerät können nach der gegenwärtig durchgeführten Validierung neben Kalibrieraufgaben auch bisher nicht mögliche Forschungsprogramme bearbeitet werden. Ein Beispiel stellt die Entwicklung von Verfahren dar, um aus der im Nahfeld gemessenen Strahlungsverteilung unterschiedlichster großflächiger Quellen auch deren Verteilung im Fernfeld bestimmen zu können, was insbesondere für die rationale Charakterisierung neuartiger Quellen immer wichtiger wird.

Von den besonderen Eigenschaften der Laserstrahlung sind einige, wie die hohe Leistung und schmale Bandbreite, für bestimmte Messungen in der Photometrie hervorragend

geeignet, andere, wie die hohe zeitliche und räumliche Kohärenz, Polarisation oder die gerichtete Strahlcharakteristik, sind für die in Photometrie und Colorimetrie verwendeten Messköpfe oftmals nachteilig. Um dennoch die Vorteile für genauere Messungen und schnellere Kalibrierungen zu nutzen, wurde jetzt in der PTB ein Messplatz für die Photometrie mit durchstimmbaren Lasern (TUNEABLE Lasers In Photometry: TULIP) entwickelt. Gegenwärtig kann durch TULIP der gesamte sichtbare Spektralbereich abgedeckt werden; eine Erweiterung in den ultravioletten und infraroten Spektralbereich ist im Aufbau. In einem Vergleich mit dem *National Institute of Standards and Technology*, NIST, USA, wurden Photometer mit integralen und spektralen Messungen unter Einsatz von teilkohärenter und inkohärenter Strahlung miteinander verglichen und ergaben gute Übereinstimmung (s. Schlagzeilen aus der Abteilung). Da TULIP und das Roboter-goniophotometer in Europa einzigartige Messplätze darstellen, öffnet die PTB sie auch der europäischen Metrologie für Forschungs- und Entwicklungsaufgaben.

Genauere Zeit für alle

2005 jährte sich zum 50. Mal die erste Inbetriebnahme einer Cäsium-Atomuhr, mit der die seit 1967 gültige Definition der Zeiteinheit realisiert wird. In dieser Zeit konnte die Genauigkeit der besten Atomuhren im Mittel etwa alle zehn Jahre um eine Größenordnung verbessert werden, was neben den Fortschritten in der Forschung auch neuartige Anwendungen mit vorher ungeahnter Verbreitung wie die Satellitennavigation oder Funkuhren erlaubte. Die primäre Cäsiumatomuhr mit der gegenwärtig kleinsten relativen Unsicherheit von etwa 10^{-15} in der PTB ist die Cäsiumfontänenuhr (CSF1), die eine um etwa eine Größenordnung kleinere Unsicherheit hat als die mit thermischen Cäsiumatomstrahlen betriebenen anderen primären Uhren der PTB. Um mittelfristig die von der PTB erzeugte Zeitskala UTC(PTB) vollständig durch Fontänenuhren realisieren zu können, baut die PTB gegenwärtig eine zweite Fontänenuhr (CSF2) auf (Bild 2).

Für den Vergleich der Frequenzen dieser Atomuhren mit denen, die in anderen Zeitlaboratorien betrieben werden, und den damit erzeugten Zeitskalen stellen Zweiweg-Zeit-



vergleiche über geostationäre Kommunikationssatelliten das gegenwärtig genaueste Verfahren dar. Schon seit längerem gibt es regelmäßige Zweiweg-Zeitvergleiche über den Atlantik mit US-amerikanischen Instituten, die auf die PTB bezogen ausgewertet werden. Zur erstrebten Verbesserung der koordinierten Weltzeitskala ist es erforderlich, langfristig Zeit- und Frequenzvergleiche auch in östlicher Richtung mit dem und über das im Aufbau befindliche asiatisch-pazifische Netzwerk durchführen zu können. Nachdem im letzten Jahr (s. Jahresbericht 2004) zeitweilig eine erste Verbindung zwischen der PTB und dem taiwanesischen Zeitinstitut betrieben worden war, wurde im Jahr 2005 eine Verbindung für Zweiweg-Satelliten-Zeit- und Frequenzvergleiche mit dem japanischen *Institut für Kommunikationstechnologie* (NICT) hergestellt, deren Betrieb jetzt auch für mehrere Jahre gesichert ist (Bild 3).

Wie jedes Satellitennavigationssystem ist auch das geplante europäische System Galileo zugleich ein System zur Zeitverbreitung. Die PTB ist daher in mehreren Projekten an der Definition und dem Aufbau des Zeitsystems für Galileo beteiligt. So hatte die PTB zunächst den Auftrag erhalten, die Anforderungen an den so genannten „Galileo Time Service Provider“ zu erarbeiten, der von *Galileo Joint Undertaking*, Brüssel, aufgebaut wird. Neben Verpflichtungen in anderen Projekten ist die PTB ab 2005 Teil des Teams, das den „Galileo Time Service Provider“ für die Phase der so genannten In-Orbit-Validation realisiert, wo bis Ende 2007 die ersten vier Satelliten in die Umlaufbahn geschickt werden sollen und eine erste Ausbaustufe des Bodensegments entsteht (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Bild 1: Neues Roboter-
goniophotometer der PTB
(links oben)

Bild 2: Cäsium-Atomfontänen-
uhren der PTB (links unten)

Bild 3: Zweiweg-Zeitvergleich-Bodenstation an der Ostseite des PTB-Geländes, mit der die Satellitenverbindung zwischen Europa und Asien hergestellt wird (rechtes Bild)

Optische Atomuhren – die Atomuhren der Zukunft

Im Gegensatz zu den Uhren, die wie die Cäsiumatomuhren im Mikrowellenbereich arbeiten, steigt bei Frequenznormalen und Uhren im optischen Frequenzbereich die erreichbare Genauigkeit gegenwärtig um fast zwei Größenordnungen pro Jahrzehnt. Solche optischen Atomuhren nutzen Laser, deren optische Strahlung auf einen Übergang in Atomen oder einzelnen Ionen stabilisiert werden.

Der Nobelpreis für Physik des Jahres 2005 ging zur Hälfte gemeinsam an Theodor Hänsch, der der PTB seit langem als Kurator eng verbunden ist, und an John Hall. Die beiden haben über Jahrzehnte die Pionierarbeit geleistet, die diese optischen Uhren erst möglich machen. Dazu gehörten verschiedene Stabilisierungsverfahren, die aus Lasern mit hohem Frequenzrauschen Oszillatoren so hoher Frequenzreinheit machen können, dass sie jedem Oszillator im Mikrowellenbereich überlegen sind. Der Durchbruch wurde allerdings mit der Entwicklung des optischen Frequenzkammgenerators erreicht. Mit ihm ist jetzt die routinemäßige Messung beliebiger optischer Frequenzen möglich, im Gegensatz zu den früheren Frequenzketten, die so aufwendig waren, dass sie nur an einer Handvoll Institute, darunter der PTB, betrieben wurden. Ein Frequenzkammgenerator stellt das „Uhrwerk“ einer optischen Uhr dar, in dem aus der hohen Frequenz des Lasers eine Mikrowellenfrequenz und daraus Sekundenimpulse erzeugt werden können. Die PTB ist seit längerem stark bei der Entwicklung und Weiterentwicklung optischer Frequenzkammgeneratoren engagiert. So konnte im vergangenen Jahr in der PTB erstmals experimentell gezeigt werden, dass zwei unterschiedliche Frequenzkammgeneratoren, die auf einfachen, wartungsarmen, kompakten und preisgünstigen Faserlasern basieren, mit einer relativen Messunsicherheit von weniger als 10^{-16} übereinstimmen (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Da abzusehen ist, dass in Zukunft die optischen Uhren die „besseren“ Atomuhren sein werden, hat das *Internationale Komitee für Maße und Gewichte* eine Arbeitsgruppe eingerichtet, die vor allem optische Übergänge in Atomen und Ionen vorschlagen soll, die als

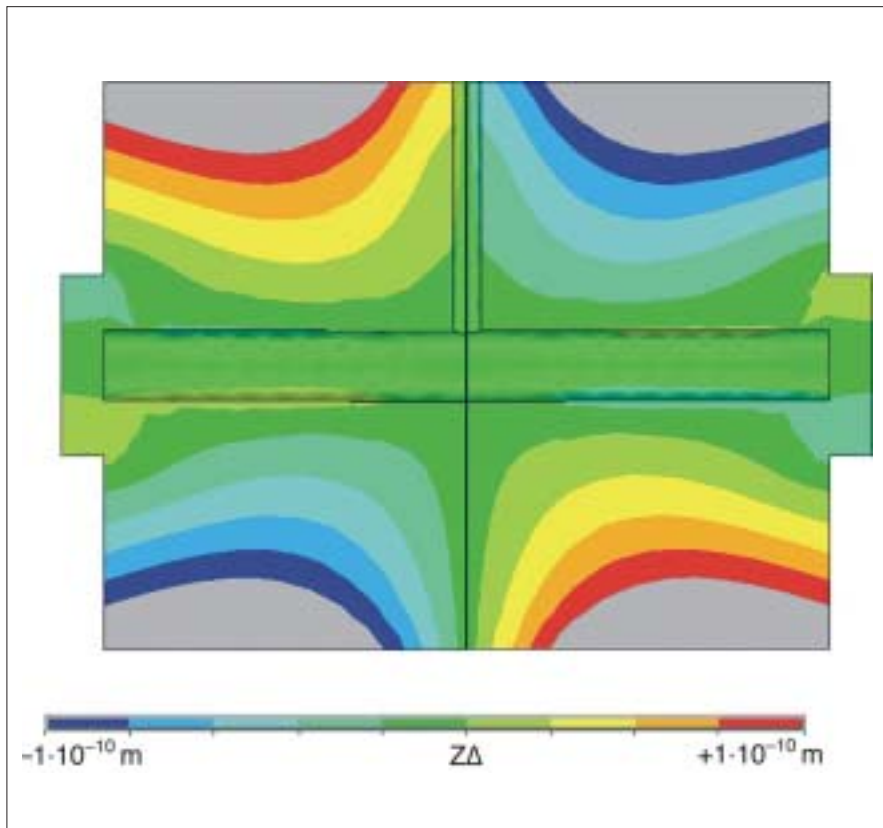


Bild 4: Falschfarbendarstellung einer Finite-Elemente-Rechnung, mit der die optimale Position der vier Lagerpunkte für das neue Auflagekonzept für optische Resonatoren in optischen Uhren bestimmt wurde. Die Darstellung zeigt die Verformung bei der optimalen Lage auf Grund einer vertikalen Beschleunigung des Resonatorkörpers durch Schwingungen. Auf der Achse ist die Längenänderung durch die Kompression der oberen Hälfte durch die inverse Deformation in der unteren Hälfte kompensiert.

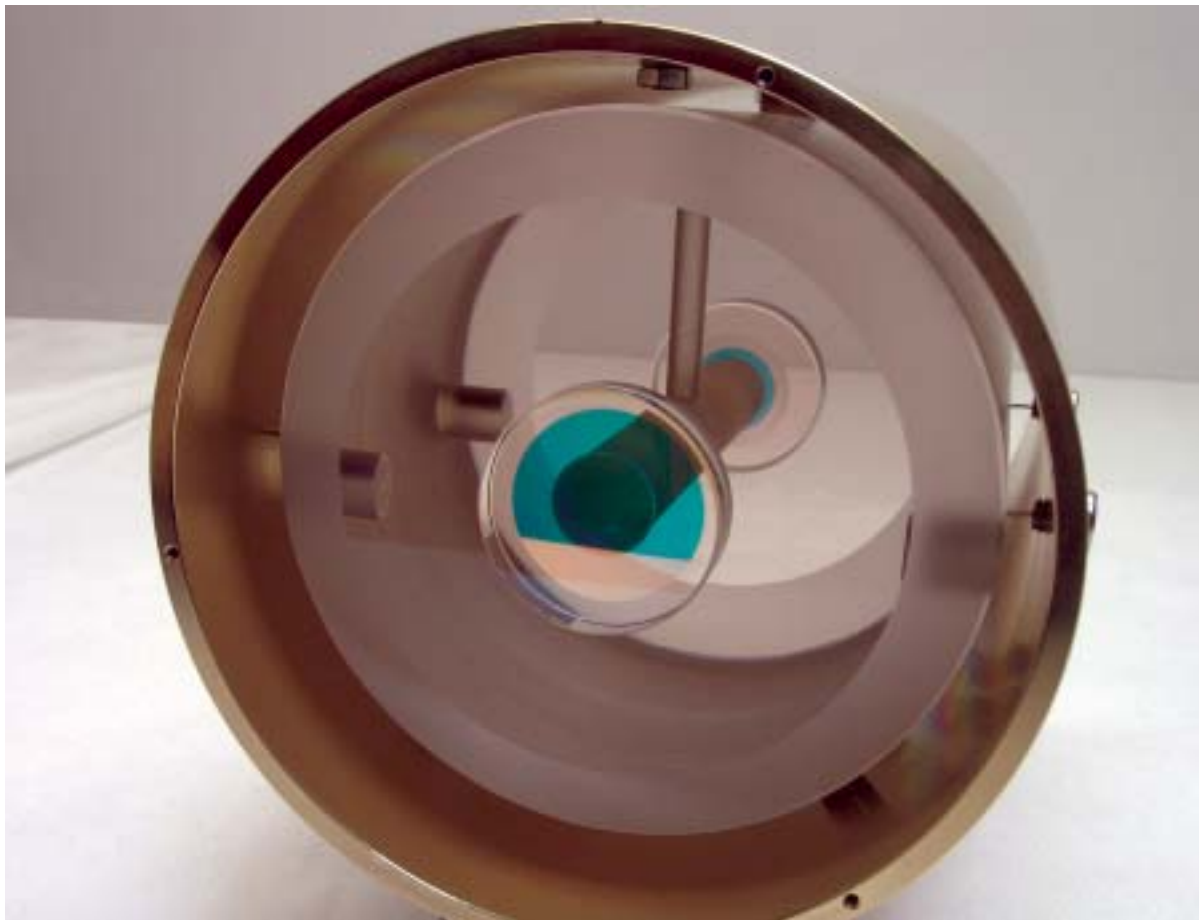


Bild 5: Störungsunempfindlicher optischer Resonator für zukünftige optische Uhren

„sekundäre Darstellungen der Sekunde“ geeignet sind. Zwar bleibt damit die Definition der Zeiteinheit immer noch auf den Mikrowellenübergang im Cäsium 133 bezogen, und keine dieser sekundären Darstellungen kann eine Sekunde mit höherer Genauigkeit erzeugen. Allerdings könnte eine dieser sekundären Darstellungen später einmal als Basis einer Neudefinition der Zeiteinheit dienen. In diesem Jahr hat die Arbeitsgruppe erstmals drei optische Kandidaten empfohlen.

Zu diesen drei sekundären Darstellungen der Sekunde gehört auch der in der PTB entwickelte Laser, der auf einen Übergang eines einzelnen, in einer Ionenfalle gespeicherten Ytterbium-Ions stabilisiert ist und der in diesem Jahr entscheidend verbessert werden konnte. So wurde die Frequenz im Vergleich zur Cäsiumfontänenuhr der PTB bis auf eine relative Unsicherheit von $3 \cdot 10^{-15}$ bestimmt. Dabei konnte insbesondere der Einfluss des größten Störeffekts quantifiziert werden, die sogenannte Quadrupolverschiebung, die durch die Wechselwirkung des atomaren Quadrupolmoments des gespeicherten Ions mit einem örtlich nichthomogenen elektrischen Streufeld in der Ionenfalle entsteht. Gleichzeitig wurde gezeigt, dass die Frequenzen zweier solcher Frequenznormale im Rahmen einer Messunsicherheit von $6 \cdot 10^{-16}$ übereinstimmen.

Quantenoptik

Für die weitere Verbesserung optischer Uhren kommen in immer stärkeren Maße neuartige Methoden und Techniken der Quantenoptik zum Tragen. So erhofft man sich insbesondere durch Nutzung eines großen Ensembles von Neutralatomen ein gegenüber einem einzelnen Ion wesentlich erhöhtes Signal-zu-Rausch-Verhältnis und damit eine wesentlich erhöhte Kurzzeitstabilität darauf basierender optischer Atomuhren und Atominterferometer. In der PTB werden daher Untersuchungen durchgeführt, inwieweit die prinzipielle, durch die Quantenmechanik vorgegebene Grenze, die u. a. von der Anzahl der Atome abhängt, mit Neutralatomen auch technisch erreicht werden kann. Zwei unterschiedliche Ansätze werden dabei verfolgt. Zuerst werden in beiden Fällen Wolken von mehreren Millionen Atomen mit Lasern bis auf wenige millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt gekühlt. Danach steht zum

einen diese Wolke etwa eine Millisekunde für die Abfrage zur Verfügung, bevor die Atome durch ihre restliche Geschwindigkeit und unter dem Einfluss der Schwerkraft die Wechselwirkungszone verlassen. Diese Wechselwirkungszeit kann mit einem neuartigen Ansatz wesentlich verlängert werden, wenn zum andern diese Atome in einem optischen Gitter aus Licht gespeichert werden, dessen „magische“ Wellenlänge so gewählt ist, dass keine Verschiebung des Uhrenübergangs auftritt.

Um das volle Potential solcher „Gitteruhren“ ausnutzen zu können und dabei die prinzipielle Quantengrenze zu erreichen, werden Anforderungen an die Frequenzstabilität gestellt, die mit den heutzutage stabilsten Lasern noch nicht erreicht werden. Die Eigenfrequenzen dieser Laser werden üblicherweise auf geeignet gewählte Frequenzen eines optischen Resonators stabilisiert. Allerdings führen dabei selbst geringste Vibrationen durch Gebäudeschwingungen oder akustische Störungen zu Längenänderungen des Resonators, die ihrerseits zu Schwankungen der Frequenz des stabilisierten Lasers führen. In der PTB wurde nun eine konzeptionell neuartige Lagerung für optische Resonatoren entwickelt (Bild 4), bei denen der Einfluss externer Störungen größtenteils eliminiert werden kann. Bei einem Prototypen (Bild 5), der zukünftig in den optischen Uhren Verwendung finden wird, konnten diese Störungen um etwa zwei Größenordnungen unterdrückt werden (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Von den Basiseinheiten zur Weitergabe

Eine permanente Herausforderung in der Arbeit der PTB besteht darin, die im Labor mit bestmöglicher Genauigkeit dargestellten Einheiten mit angemessener Unsicherheit und vertretbarem Aufwand auf die bei den Kunden benötigten Messgrößen und -methoden zu übertragen. So ist für viele Anwendungen in der Biologie, Mikrotechnik oder bei hochintegrierten Techniken noch immer die Messung mit sichtbarer Strahlung das geeignete Messverfahren, um an den immer kleiner werdenden Proben und Strukturen schnelle, zerstörungsfreie und doch genaue Messungen durchzuführen. Dazu gehören Messungen der Radien optischer Kalibrierkörper, die scannende Formmessung auch an asphärischen

Flächen oder die Messung kleinster Oberflächenstrukturen in ein oder zwei Dimensionen (s. Nachrichten aus der Abteilung). Bei der Messung der Linienbreiten von Masken oder an Kalibrierstrukturen für die Halbleiterlithographie, die voraussichtlich ab 2007 mit der 65-nm-Technologie gefertigt werden, sind die erforderlichen Auflösungen von etwa 130 nm mit Licht nur noch mit besonderen Anstrengungen zu erreichen. In der PTB wurde dazu in den letzten Jahren ein neuartiges optisches Dunkelfeldmikroskopieverfahren für quantitative Linienbreitemessungen entwickelt, das auf der wechselseitigen Beleuchtung der beiden Kanten der Stegstruktur beruht, um die durch die Beugung entstehende Überlagerung des an den Kanten reflektierten Lichts zu vermeiden. Routinemäßig benutzt die PTB jetzt rigorose Simulationsmodelle, die die Maxwell-Gleichungen mit den vorgegebenen Randbedingungen und Materialkonstanten je nach Anwendungsfall mit einer „Rigorosen Analyse mit gekoppelten Wellen“ oder einer „Finiten-Elemente-Methode“ lösen. Im Bild 6 erkennt man beispielsweise, dass das höchste Signal nicht direkt an der Kante lokalisiert ist, so dass die genaue Lokalisierung dieser Kanten mit Licht nur dann möglich ist, wenn die gemessenen Strukturen mit Simulationsrechnungen verglichen werden.

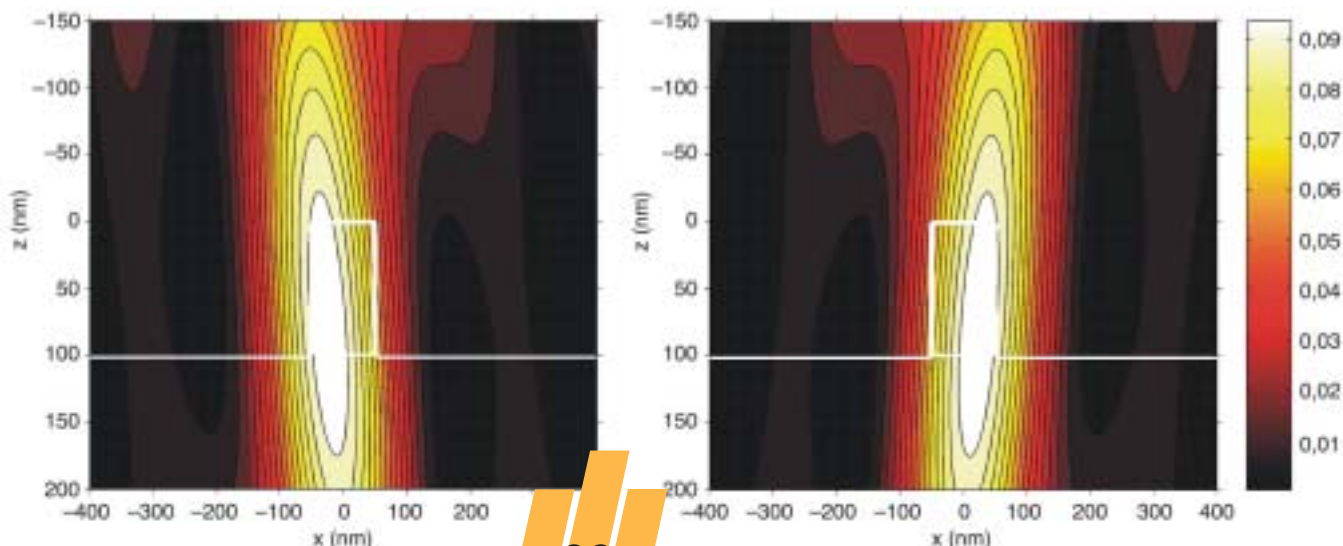
Ein in der Zukunft noch deutlicher heraus tretender Schwerpunkt der Abteilung wird darin bestehen, dass die in der PTB und anderswo geschaffenen neueren Messmöglichkeiten zügig auch Wissenschaftlern und Ingenieuren in relevanten Schlüsselindustrien zugänglich gemacht werden. So wird die PTB im Bereich der Photometrie und Radiometrie

ihre in den Jahren 2004 und 2005 erstmals durchgeführten Photometrieseminare auf Grund der hohen Resonanz und der ständig steigenden Anfragen in Zukunft regelmäßig durchführen.

Technologieentwicklung und -transfer

Bei der Durchführung der Forschungs- und Entwicklungsaufgaben, die zur optimalen Wahrnehmung der Mission der PTB, z. B. bei der Darstellung und Weitergabe der Einheiten, erforderlich ist, werden immer wieder neuartige Technologien, Konzepte oder Verfahren entwickelt, die direkt bei der Industrie, bei anderen Kunden, für neuartige Messverfahren oder in benachbarten Forschungsfeldern vorteilhaft eingesetzt werden können. Im Folgenden sollen einige dieser neuen Technologien vorgestellt werden.

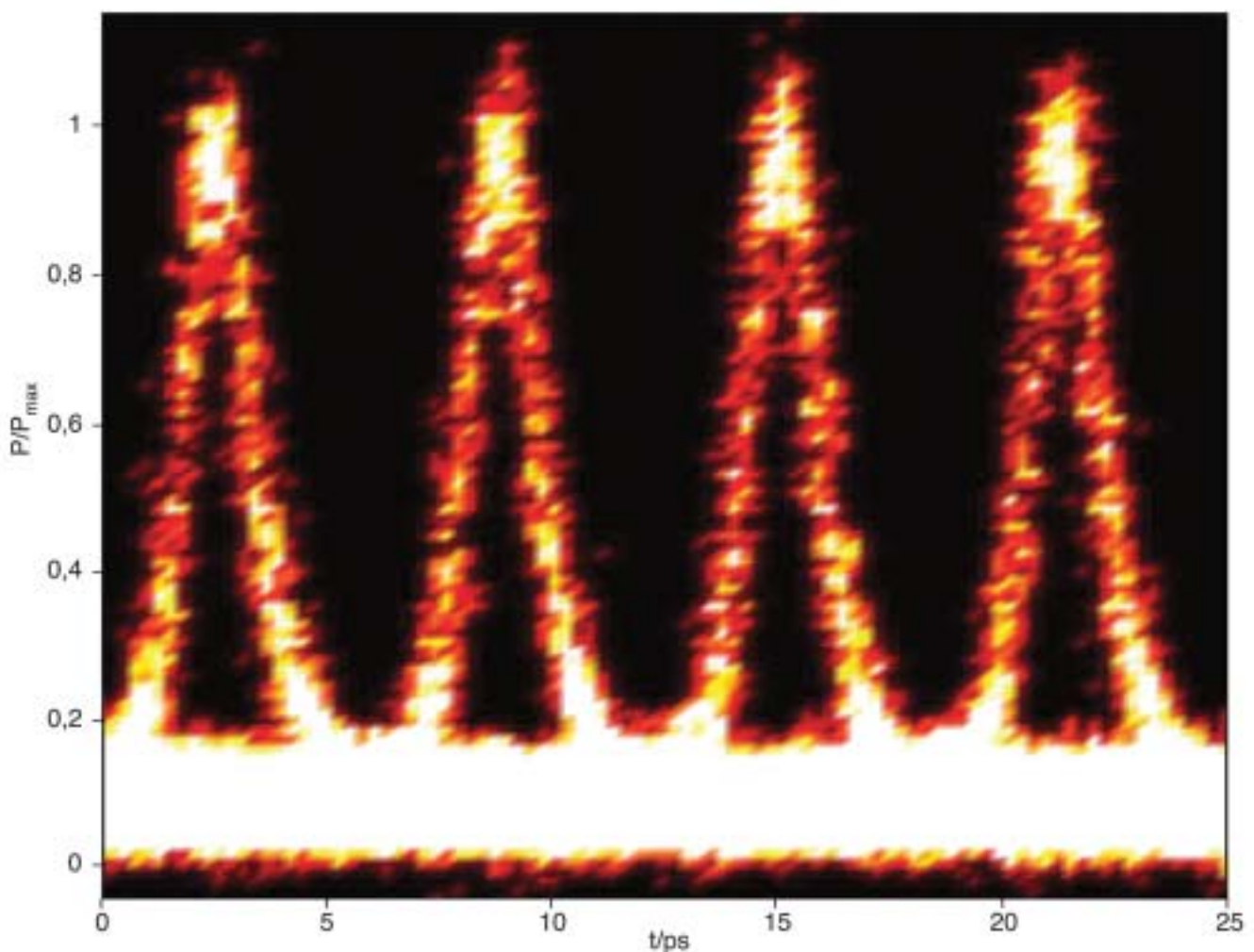
Bild 6: Die Simulation des elektromagnetischen Feldes in einer modellbasierten Analyse mit für eine Chrom-Linienstruktur der Breite von 100 nm mit Beleuchtung bei 375 nm von links und rechts zeigt, dass nur eine modellbasierte Auswertung die Lage der Kanten (senkrechte weiße Linie) exakt festlegen kann.



So werden beispielsweise im internationalen Avogadro-Projekt, an dem die PTB in mehreren Teilprojekten beteiligt ist, die Grenzen der technologischen Machbarkeit stetig weiter in bisher unbekannte Bereiche ausgeweitet. Dazu gehört die Herstellung eines mehrere hundert Gramm schweren isotonen Einkristalls des Siliziumisotops mit der Ordnungszahl 28 oder die bessere Beherrschung der Zuchtbedingungen für ideale Einkristalle aus natürlichem Silizium. Die gleichen röntgenmetrologischen Verfahren, die in diesem Projekt für die höchstgenaue Bestimmung des Gitterparameters entwickelt und benutzt werden, werden gegenwärtig in einem Projekt mit verschiedenen Industriepartnern dahingehend untersucht, inwieweit z. B. die Verspannung von Silizium-Sensorchips in ihrer Verkapselung nach ihrer Montage zerstörungsfrei bestimmt werden kann.

Ein anderes Beispiel für den Einsatz neuer Technologien in neuen Bereichen stellen Femtosekundenlaser dar, die in der Abteilung *Optik* z. B. als Uhrwerke für optische Atomuhren untersucht, optimiert und routinemäßig eingesetzt werden. Die dabei angewendeten Technologien der höchstpräzisen Stabilisierung der Phase einer optischen Lichtwelle werden einerseits für die Entwicklung einer neuartigen chemischen Bildgebung und andererseits zur Abtastung höchstbitratiger Datenströme (Bild 7) für die Laser in zukünftigen Telekommunikationsanwendungen genutzt.

Bild 7: Augendiagramm eines 160-Gbit/s-„return-to-zero“-Datenstroms. Die „Öffnung des Auges“, d. h. die freie Fläche unter den Linien, ist bestimmt durch das Rauschen der Amplitude und den Zeitjitter des gemessenen Datenstroms und ist damit ein Maß für die Bitfehlerrate bei der Datenübertragung.



Im Rahmen der Vorbereitung von Messungen im Rahmen internationaler Schlüsselvergleiche sind verschiedene Strahlersysteme entstanden, die entweder besonders robust, stabil oder einfach zu betreiben sind. In mehreren Fällen konnten die in der PTB entwickelten Prototypen zur Kleinserienproduktion in mittelständische Unternehmen übergeben werden (Bild 8).

Bild 8: Drei in der PTB entwickelte Strahlersysteme, die jetzt von Firmen zum Einsatz als Normale vertrieben werden: Kalibrierstrahler für Feldeinsätze (rechts), Deuteriumlampensystem für UV-Messungen (links unten) und Leuchtdioden-Transfornormal für photometrische Größen (links oben)



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Eine neue Messeinrichtung für die Lichtstärkeeinheit

Zur Realisierung der Lichtstärkeeinheit und der daraus abgeleiteten photometrischen Größen wurde im Rahmen des Umzugs in den Albert-Einstein-Bau ein neues Photometerbanksystem entwickelt. Unter Verwendung des Netzwerks von Lampen und Photometern, die die nationale Einheit der Lichtstärke bewahren, konnten deren photometrische Eigenschaften im Rahmen der Standardmessunsicherheit von 0,03 % voll bestätigt werden. Zusätzlich wird jetzt die Kalibrierung neuartiger Lichtquellen mit ihren besonderen und messtechnisch herausfordernden Eigenschaften mit zukünftig kleineren Messunsicherheiten und kürzerer Messzeit möglich.

(D. Lindner, FB 4.1, detlef.lindner@ptb.de)

Vereinfachung der radiometrischen Kalibrierkette für Laserleistungsmessgeräte

Mittels durchstimmbarer Diodenlaser (1270 nm bis 1380 nm, 1440 nm bis 1640 nm) können Indium-Gallium-Arsenid- und Germanium-Empfänger direkt gegen ein Kryoradiometer kalibriert werden. Dies führt zu einer Vereinfachung der radiometrischen Kalibrierkette für Laserleistung in der optischen Nachrichtentechnik. Eine genauere Beschreibung, Charakterisierung und Modellierung von Halbleiterdioden z. B. bzgl. ihrer Materialeigenschaften wird damit erleichtert.

(S. Kück, FB 4.1, stefan.kueck@ptb.de)

Vergleich zweier unterschiedlicher Kalibrierverfahren für Laserleistung bei 157 nm

Zwischen Arbeitsgruppen in den Abteilungen *Optik* und *Temperatur und Synchrotronstrahlung* wurde ein Vergleich der spektralen Empfindlichkeit eines Laserleistungsmessgeräts für 157-nm-Strahlung eines F2-Lasers durchgeführt. Dabei wird einmal von Primärnormalen bei hoher Leistung im sichtbaren Spektralbereich und einmal von Primärnormalen bei kleiner Leistung bei 157 nm ausgegangen. Die beiden Methoden stimmen im Rahmen der kombinierten Standardmessunsicherheit überein.

(S. Kück, FB 4.1, stefan.kueck@ptb.de)

Durchstimmbare Laser in der Photometrie

Eine neuartige lasergestützte Messapparatur zur Bestimmung der Empfindlichkeit großflächiger Empfänger wurde entwickelt und hat in einem ersten internationalen Vergleich zwischen dem NIST und der PTB ihre Leistungsfähigkeit unter Beweis gestellt.

(A. Sperling, FB 4.1, armin.sperling@ptb.de)

Frequenzsynthese und fasergestützte Weitergabe hochstabiler optischer Frequenzen

Mit Hilfe eines Frequenzkamms wurde die Frequenzstabilität eines hochstabilen Spektroskopielasers bei 871 nm auf einen Erbium-dotierten Faserlaser im optischen Telekommunikationsfenster um 1550 nm übertragen und mit einem zweiten Frequenzkamm gemessen. Die erstmals erreichte Stabilität (wenige 10^{-17} bei Mittelungszeiten von 10^4 s) ist ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zur fasergestützten Übertragung hochstabiler optischer Frequenzen über Standard-Telekommunikationsfasern.

(G. Grosche, H. Schnatz, B. Lipphardt, Chr. Tamm, FB 4.3, gesine.grosche@ptb.de)

Langzeitvergleich: Frequenzmessungen mit zwei Kurzpulsfaserlasern stimmen auf mHz überein

Die Einflüsse technischer Begrenzungen bei der Messung optischer Frequenzen mit faserbasierten Femtosekundenpulslasern wurde durch einen Langzeitvergleich zwischen zwei unabhängigen Faserfrequenzkamm-Systemen untersucht. Frequenzvergleiche bei einer Wellenlänge von 871 nm sowie im optischen Telekommunikationsfenster bei 1543 nm zeigten über einen breiten spektralen Bereich Übereinstimmungen von wenigen Milli-Hertz. Die entsprechende relative Unsicherheit von unter 10^{-16} erlaubt den Einsatz von Kurzpulsfaserlasern als einfachere und kostengünstigere „Uhrwerke“ für optische Uhren.

(H. Schnatz, G. Grosche, B. Lipphardt, FB 4.3, gesine.grosche@ptb.de)

Verbesserte Kurzzeitreferenz für optische Uhren

Zur Frequenzstabilisierung von Laseroszillatoren für optische Atomuhren ist unter anderem ein hochstabiler Resonator hoher Finesse notwendig. Durch die Entwicklung

einer neuartigen Halterung ist es gelungen, die Empfindlichkeit des Resonators gegenüber Vibrationen um zwei Größenordnungen zu reduzieren. Damit werden Laseroszillatoren mit Sub-Hertz-Linienbreiten möglich. (U. Sterr, FB 4.3, uwe.sterr@ptb.de)

Wie perfekt ist ein Silizium-Einkristall?

Im Laufe der letzten Jahre wurden im Rahmen des internationalen Avogadroprojekts immer wieder bei der Dichtebestimmung von Siliziumkristallen relative Abweichungen bis zu einigen 10^{-6} festgestellt. Züchtungsversuche mit wasserstoff- und stickstoffdotierten Proben zeigten, dass die beobachteten großen Abweichungen der Kristalldichten nicht durch intrinsische Kristalldefekte wie Löcher oder Hohlräume verursacht werden. Bei Anwendung üblicher Wachstumsbedingungen können sich die Dichten der für die Halbleiterindustrie gefertigten Si-Einkristalle höchstens im Bereich 10^{-8} unterscheiden. (P. Becker, U. Kuetgens, H. Bettin, FB 4.3, peter.becker@ptb.de)

Der Einfluss von Majorana-Übergängen bei der Cäsium-Fontäne CSF1

Ende 2004 traten bei der primären Cäsium-Fontänenuhr CSF1 Frequenzschwankungen auf einer Skala von Stunden auf, die deutlich größer waren als die abgeschätzte Unsicherheit dieser Uhr. Ausführliche Untersuchungen ergaben, dass diese Frequenzschwankungen durch so genannte Majorana-Übergänge verursacht waren, welche die Cäsiumatome in der Nähe von Magnetfeldnullstellen erfassen können. Obwohl bei der Konstruktion magnetische Nullstellen sorgfältig vermieden wurden, entstand im Laufe der Zeit eine solche Nullstelle durch Materialspannungen. Die Untersuchungen konnten die Frequenzverschiebungen beseitigen und ergaben ein vertieftes Verständnis über die Auswirkungen von Majorana-Übergängen in Fontänenuhren. (Stefan Weyers, FB 4.4, stefan.weyers@ptb.de)

Frequenzvergleiche mit 10^{-15} relativer Unsicherheit

Ein ausgedehnter Frequenzvergleich von Wasserstoff-Masern, an dem die europäischen Zeitinstitute und das NIST/Boulder teilnahmen, zeigt erstmals, dass Vergleichsgenauig-

keiten mit relativen Abweichungen von 10^{-15} an einem Tag mit GPS-Empfängern, die die Trägerphase ausnutzen, und mit 2-Weg-Satelliten-Zeitvergleichen erreichbar sind. Dies ist für Vergleiche der genauesten Uhren, der Cäsium-Fontänen, erforderlich.

(A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

Galileo auf dem Weg

Die Aufbauphase für das europäische Satelliten-Navigationssystem hat begonnen. Die PTB berät die *Europäische Raumfahrtagentur* bei der Galileo-Systemzeit-Realisierung und beim Entwurf für die Zeitstationen. Die PTB erarbeitet die Anforderungen an den Galileo Time Service Provider (GSTP), welche die Galileo-Systemzeit mit der koordinierten Weltzeit in Übereinstimmung halten wird. Von 2005 an ist die PTB Teil des Teams, welches den GSTP für die „in orbit validation“-Phase realisiert. (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

Wie spät ist es in Japan?

Seit Juli 2005 ist eine 2-Weg-Satelliten-Zeitvergleichsverbindung zwischen der PTB und dem *Nationalen Institut für Informations- und Kommunikationstechnologie* (NICT) Tokio in Betrieb. Die PTB ist bereits seit längerem im Zentrum des Europa-USA-Zeitnetzes. Gegenwärtig wird im asiatischen Raum unter Federführung Japans ein Zeitnetz aufgebaut. Mit der neuen Verbindung können die Zeiten in diesen Regionen mit der Genauigkeit der Primärnormale synchronisiert werden.

(A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

Vergleich zwischen zwei optischen $^{171}\text{Yb}^+$ -Frequenznormalen mit sub-Hertz-Genauigkeit

Durch direkten Frequenzvergleich von zwei optischen Frequenznormalen basierend auf ^{171}Yb -Einzelionen konnte einer der größten Beiträge zur relativen Unsicherheit, die Quadrupol-Frequenzverschiebung, mit $6 \cdot 10^{-16}$ abgeschätzt werden. Die mittlere relative Differenz der Frequenzen der beiden Normale betrug $3,8 \cdot 10^{-16}$. Diese Messgenauigkeit wurde in nur 15 Minuten Messzeit erreicht. Diese Ergebnisse liegen im Bereich der besten Reproduzierbarkeiten atomarer Frequenznormale.

(Chr. Tamm, FB 4.4, christian.tamm@ptb.de)

Analyse der Anforderungen an Schweißer- und Infrarotschutzfilter im langwelligen Spektralbereich

Infrarot-Strahlung des Wellenlängenbereichs oberhalb von 780 nm kann in ihrem Anteil bis 1400 nm sowohl netzhautgefährdend wirken als auch bei noch größeren Wellenlängen z. B. zur Entstehung des Grauen Stars (Katarakt) beitragen. Aus diesem Grund enthalten die Normen für Schweißer- und Infrarotschutzfilter spezielle Anforderungen an den spektralen Transmissionsgrad in diesem Wellenlängenbereich. Eine Analyse der charakteristischen Strahlungsquellen und ein Vergleich mit den aktuellen Grenzwerten zeigt einerseits die Möglichkeit der Verringerung der Anforderungen für den Bereich bis 1400 nm. Andererseits ergeben die Rechnungen, dass im Fall der Infrarot-Schutzfilter der betrachtete Wellenlängenbereich bis 3000 nm ausgedehnt und die Anforderungen verschärft werden müssen. (A. Schirmacher, FB 4.5, alfred.schirmacher@ptb.de)

Neues roboterbasiertes Gonioreflektometer

Es wurde ein neues roboterbasiertes Gonioreflektometer zur Messung der diffusen Reflexionseigenschaften von Materialien im Wellenlängenbereich 250 nm bis 1700 nm aufgebaut und validiert. Die relativen Messunsicherheiten liegen hierbei, abhängig vom Spektralbereich, zwischen 0,2 % und 3,5 % im UV. Das Gonioreflektometer erlaubt unter Einsatz eines 5-Achsen-Roboters winkel- und spektral aufgelöste Messungen der Reflexionscharakteristik für beliebige Einfallswinkel und Reflexionswinkel.

(A. Höpe, FB 4.5, Andreas.Hoepe@ptb.de)

Reflexionsmessungen an hochporösen Staubagglomeraten

Am neu entwickelten Gonioreflektometer der PTB wurden in Zusammenarbeit mit dem *Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik* der *TU Braunschweig* die Reflexionseigenschaften von hochporösen Staubagglomeraten aus Siliziumdioxidkugeln und Diamantstaub durchgeführt, die als Modellsysteme für die Materie im frühen Sonnensystem dienen. Die im Labor gemessenen Zusammenhänge zwischen den optischen Eigenschaften und dem Aufbau der Schichten sollen zukünftig für die Fernforschung präplanetarer Körper benutzt werden.

(A. Höpe, FB 4.5, Andreas.Hoepe@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Technologietransfer aus der PTB

Das Ergebnis und die Erfahrungen jahrelanger Entwicklungen auf dem Gebiet der Strahlernormale im Fachbereich *Photometrie und angewandte Radiometrie* konnte erfolgreich an mittelständische Unternehmen weitergegeben werden. Firmen aus Deutschland und Österreich produzieren jetzt unterschiedliche in der PTB entwickelte Strahlernormale, die sich sowohl im Messlabor als auch bei Feldeinsätzen und internationalen Vergleichen vielfach bewährt haben.

(P. Sperfeld, FB 4.1, peter.sperfeld@ptb.de)

Kalibrierung von Empfängern für die optische Nachrichtentechnik

Ein neuer Messplatz für die Kalibrierung von Empfängern für die optische Nachrichtentechnik wurde aufgebaut. Kalibrierungen von Kundengeräten sind in den Wellenlängenbereichen von 1270 nm bis 1380 nm sowie von 1440 nm bis 1640 nm sowohl im Freistrahl als auch fasergebunden möglich. Die erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) beträgt zurzeit im gesamten Wellenlängenbereich 0,6 %.

(S. Kück, FB 4.1, stefan.kueck@ptb.de)

Radienmessung mit deutlich verringerter Unsicherheit

Die Unsicherheit der Radienmessung an optischen Funktionsflächen konnte gegenüber klassischen (Ring-)Sphärometern um einen Faktor von mehr als 10 verringert werden. Eine erweiterte Messunsicherheit von wenigen Mikrometern ist für Radien bis zu 1000 mm erreichbar. Die Methode verwendet ein Längenmessinterferometer zur Messung des Wegs vom Krümmungsmittelpunkt der Fläche bis zur Oberfläche des Prüflings. Die Abweichung der Prüflingsoberfläche von der Kugelform kann gleichzeitig mit einer Unsicherheit von wenigen Nanometern interferometrisch erfasst werden.

(M. Schulz, FB 4.2, Michael.Schulz@ptb.de)

Neues spannendes Formmessverfahren an asphärischen Flächen erprobt und validiert

Ein gemeinsam mit dem Fachbereich *Mathematische Analyse und Datenanalyse* neu entwickeltes rückführbares Multi-Sensor-Verfahren zur spannenden Formmessung an asphärischen optischen Flächen wurde mit einem Demonstrator experimentell erprobt. Messvergleiche mit einer hochpräzisen Koordina-

tenmessmaschine ergaben eine Übereinstimmung innerhalb der Fehlergrenzen beider Verfahren mit relativen Topographiedifferenzen von $\pm 10^{-3}$ bei einer Topographiehöhe von 50 000 nm. Damit wurde der experimentelle Nachweis geführt, dass sich das Verfahren für hochgenaue Asphärenmessungen eignet.

(M. Schulz, FB 4.2, Michael.Schulz@ptb.de)

Erweiterung der mikroskopischen Strukturbreitenmessung auf zwei Dimensionen

Die optische Messung der lateralen Ausdehnung von Mikrostrukturen ist durch den Einsatz von digitalen Bildsensoren in einem Mikroskop auf zwei Dimensionen erweitert worden. Es wurde gezeigt, wie die Messtechnik mit der Kalibrierung der Pixelkoordinaten und der Kenntnis der Übertragungseigenschaften des Bildsensors speziell für die Kalibrierung von Maßverkörperungen, wie die Formabweichung von Kreisstrukturen, eingesetzt werden kann. (E. Buhr, W. Michaelis, D. Bergmann, FB 4.2, egbert.buhr@ptb.de)

Optisches UV-Dunkelfeldmikroskop misst Linienbreiten bis zu 100 nm

Mit einem in der PTB neu entwickelten Mikroskop-Prototyp, der auf einer wechselseitigen, streifenden Beleuchtung bei einer Wellenlänge von 374 nm basiert, können nun isolierte Linien bis zu 100 nm quantitativ bestimmt werden. Für die modellbasierte Auswertung werden unterschiedliche rigorose Modelle verwendet. Typische Anwendungen liegen z. B. im Bereich der quantitativen Messung von Masken, Wafern oder Siliziumstrukturen. (G. Ehret, B. Bodermann, W. Mirandé, FB 4.2, gerd.ehret@ptb.de)

Optische Münzprüfung anhand spektraler Reflexionseigenschaften

Es wurden Messungen zu den charakteristischen Reflexionsspektren von Münzlegierungen sowie Untersuchungen von Struktur-, Polarisations- und Geometrie-Effekten durchgeführt, die z. B. aus der Anordnung von Lichtquelle und Detektor resultieren. Das favorisierte Prinzip wurde zu einem Demonstrator weiter entwickelt und die Eignung und Fähigkeiten dieses Aufbaus durch Messungen an bewegten Münzen nachgewiesen.

(A. Höpe, FB 4.5, Andreas.Hoepe@ptb.de)

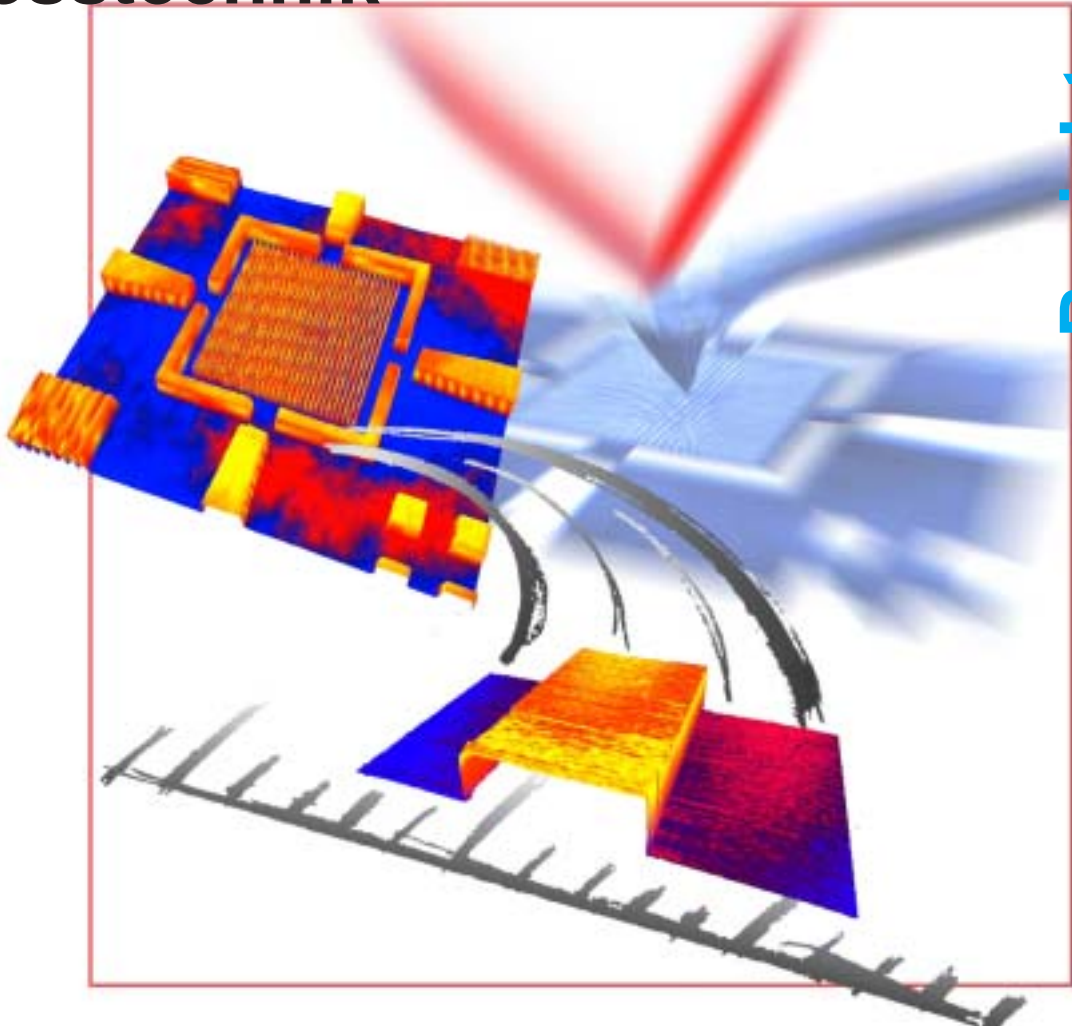
Synchrone optische Abtastung höchstbitratiger Datenströme

Ein neuartiges, synchrones Abtastverfahren zur Charakterisierung höchstbitratiger optischer Telekommunikationssignale wurde mit dem in der PTB entwickelten optischen Abtastoszilloskop implementiert. Augendigramme bei Bitraten von 320 Gbit/s wurden unter Einsatz des neuen Verfahrens demonstriert.

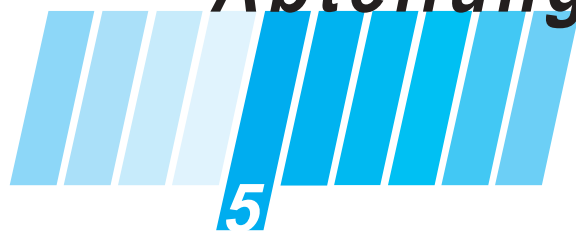
(E. Benkler, FB 4.5, erik.benkler@ptb.de)

Fertigungs- messtechnik

Berichte der Abteilungen



Abteilung



Fertigungs

Die Abteilung *Fertigungsmesstechnik* bearbeitet metrologische Fragestellungen moderner industrieller Fertigungs- und Qualitätssicherungssysteme und hierbei schwerpunktmäßig Aspekte der Rückführung dimensioneller Messergebnisse. Bei der Identifikation der durch die Abteilung zu bearbeitenden Forschungsthemen gilt es sowohl aktuelle Anforderungen der Kunden zu berücksichtigen, um deren Messergebnisse auf dem jeweils erforderlichen messtechnischen Niveau auf die Längeneinheit rückführen zu können, als auch insbesondere die künftig zu erwartende Nachfrage nach messtechnischen Dienstleistungen frühzeitig genug zu erkennen und aufzugreifen, um mit dem notwendigen Vorlauf entsprechende Entwicklungen zu beginnen. Insofern muss die Arbeit gleichzeitig gegenwarts- und zukunftsbezogen sein.

Der diesjährige Jahresbericht stellt zum einen Entwicklungen der Abteilung mit stärker grundlagenorientiertem, längerfristigem Charakter dar, die einen Leistungsstand erreicht haben, der jetzt von der fertigungstechnischen Industrie benötigt und nachgefragt wird. Beispielhaft für diese Entwicklungen sind im Folgenden die mit dem Nanometerkomparator kürzlich erzielten Messergebnisse an inkrementalen Längenteilungen, die mit dem Präzisions-Interferometer durchgeführten Untersuchungen zu relevanten Materialparametern an Hightech-Gläsern sowie Grundlagenuntersuchungen zur Modellierung der Wechselwirkung von Messsonde und Messobjekt bei hoch auflösenden mikroskopischen Messverfahren aufgeführt.

Titelbild

Symbolhafte Darstellung einiger Messobjekte und Messmethoden der Nanometrologie, stellvertretend für die in diesem Bereich festgestellte zunehmende Nachfrage nach Rückführung dimensioneller Messgrößen

Zum anderen wird auf Projekte Bezug genommen, die in der Regel auf einer kürzeren Zeitbasis mit dem Ziel realisiert werden konnten, die Anforderungen an die Rückführung relevanter Messergebnisse in industriellen Fertigungsprozessen durch die Entwicklung und Kalibrierung geeigneter Normale zu erfüllen. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass gerade die Arbeiten zur Entwicklung von Normalen in der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* durch die enge Kooperation sowohl mit der produzierenden als auch der messtechnischen Industrie in besonderer Weise anwendungsbezogen sind.

Das in der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* entwickelte Dienstleistungsangebot zur Kalibrierung von Normalen und Messgeräten deckt die dimensionellen Messgrößen vom makroskopischen Bereich bis in den Bereich der Nanometrologie ab. Hierbei ist in letzter Zeit zu beobachten, dass die Rückführung von Messergebnissen an nanoskaligen Messobjekten verstärkt nachgefragt wird. Diese Beachtung der Aspekte der Qualitätssicherung und messtechnischen Rückführung in der Nanotechnologie ist ein Indiz für deren zunehmende Relevanz für den Wirtschaftsstandort Deutschland. Ein weiteres Indiz hierfür ist die Aufnahme von Normungs- und Richtlinienarbeit in diesem Bereich, an dem sich die Abteilung auf nationaler und internationaler Ebene in erheblichem Umfang beteiligt.

Sub-nm Reproduzierbarkeit von Längenmessungen mit dem Nanometerkomparator

Die hohen Anforderungen an die messtechnische Leistungsfähigkeit der in der PTB zur Bearbeitung der Fachaufgaben einzusetzenden Messgeräte erfordert in der Regel die Entwicklung spezieller Aufbauten oder zumindest wichtiger Komponenten. Am Markt verfügbare Geräte erfüllen die Erfordernisse eines Metrologie-Instituts hinsicht-

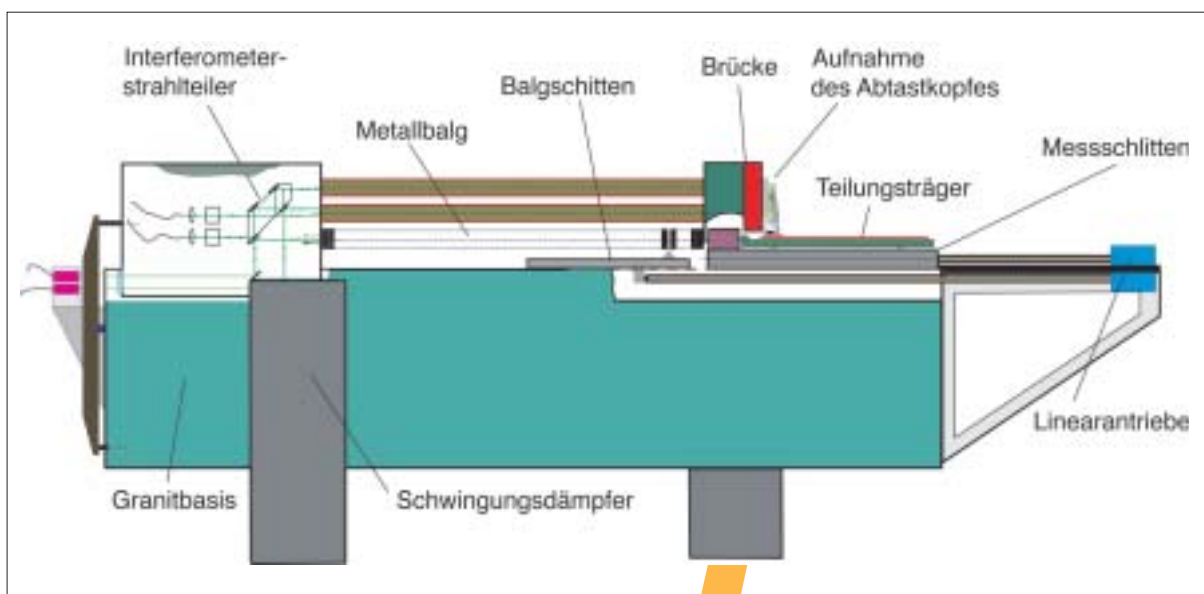
messtechnik

lich Stabilität, Flexibilität und Modellierbarkeit häufig nicht im benötigten Umfang. Außerdem ist eine möglichst vollständige und flexible Erfassung der metrologisch relevanten Messdaten der eingesetzten Messgeräte insbesondere vor dem Hintergrund der für die Unsicherheitsberechnung notwendigen Abschätzung des Einflusses von Parametervariationen unerlässlich.

Ein Beispiel für eine solche Geräteentwicklung stellt der Nanometerkomparator (Bild 1) dar, ein eindimensionaler Längenkomparator mit 610 mm Verschiebeweg und Messung der Verschiebung des Messobjekts mittels Vakuuminterferometrie, über dessen prinzipiellen Aufbau bereits früher berichtet wurde. Die Entwicklung dieses Komparators hatte unter anderem zum Ziel, Längenmessungen mit Unsicherheiten von nur wenigen Nanometern an eindimensionalen Längenteilungen wie Strichmaßstäben und inkrementalen Längenmesssystemen zu ermöglichen. Derart geringe Messunsicherheiten werden von Messsystemen gefordert, die in der Produktion von Halbleiter-Bauelementen, DVD-Mastern oder in der Ultrapräzisionsfertigung eingesetzt sind.

Im Berichtszeitraum wurde der Nanometerkomparator erstmals in einem internationalen Maßvergleich mit einem inkrementalen Längenmesssystem als Transfernormal eingesetzt (s. a. Nachricht des Jahres). An diesem Transfernormal konnte die Leistungsfähigkeit des Interferometrie-Konzeptes und der gesamten Geräte-Realisierung eindrucksvoll aufgezeigt werden. Nicht zuletzt auch bedingt durch die sehr sorgfältig durchgeführte Justage von Messkopf und Gitter-Teilungsträger zum Nanometerkomparator, wurden Reproduzierbarkeiten von weniger als einem Nanometer über die Messlänge von 280 mm erzielt. Eine erste Analyse der Ergebnisse des Maßvergleiches mit zwei anderen Vakuum-Längenkomparatoren hat eine – weltweit bislang einmalige – Übereinstimmung innerhalb von $2 \cdot 10^{-8}$ ergeben.

Bild 1: Grundaufbau des Nanometerkomparators



Materialuntersuchungen an Hightech-Gläsern

Temperaturbeständige Materialien, insbesondere solche, die bei Temperaturänderungen ihre Abmessungen nicht oder nur sehr wenig ändern, spielen heute eine große Rolle in der industriellen Produktion, aber traditionell auch in der Messtechnik selbst. Die weitaus höchsten Anforderungen an ausdehnungsarme Materialien werden allerdings in der zurzeit entwickelten EUV-Lithografie gestellt. Die hierbei für die Projektion der auf Silizium-Wafer abzubildenden Strukturen zu verwendenden Reflexionsspiegel und Masken müssen thermische Belastungen durch die 13-nm-EUV-Strahlung aufnehmen können, ohne selbst signifikant deformiert zu werden. An die Substratmaterialien der EUV-Masken sind Anforderungen hinsichtlich des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha < 5 \cdot 10^{-9}$ formuliert, die zur Fertigungsüberwachung notwendige Messtechnik muss dementsprechend noch präziser sein (Bild 2).

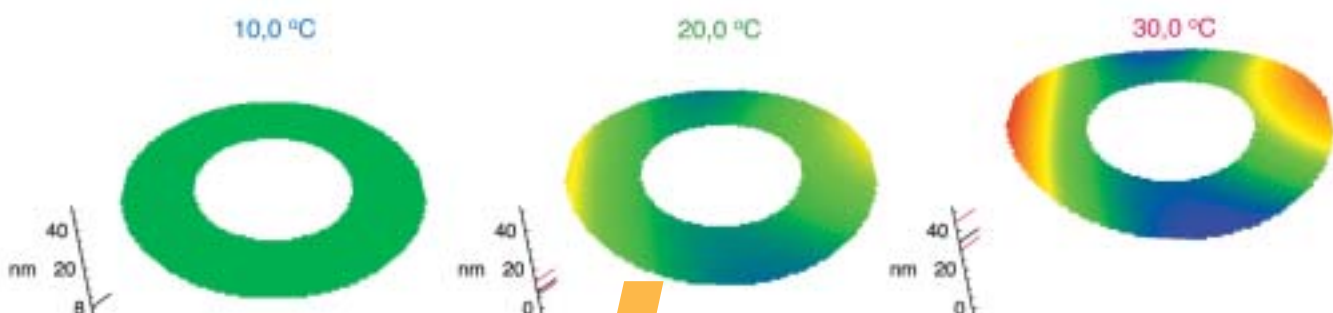
In der PTB sind bereits in früheren Jahren Untersuchungen zu Materialparametern und zur Langzeitstabilität ausdehnungsarmer Hightech-Glaskeramiken mit einem speziellen Vakuumkomparator für endmaßförmige Prüflinge durchgeführt worden. Darüber hinaus wurde er für Grundlagenuntersuchungen der interferentiellen Längenmessung angewandt. Dieser Komparator wurde in der jüngeren Vergangenheit zielgerichtet weiterentwickelt und hat nunmehr eine metrologische Leistungsfähigkeit erreicht, die ihn als Präzisions-Messgerät für Untersuchungen der Materialparameter an Komponenten für die EUV-Lithografie prädestiniert. Das Präzisions-Interferometer hat international keine Entsprechung und ist inzwischen vielfältig in Industriekooperationen eingebunden und stark ausgelastet. Aus diesem Grund wurde damit begonnen, ein zweites Messgerät aufzubauen.

Charakterisierung der Form von Tastspitzen in Rastersondenmikroskopen

Die Entwicklung von Modellen zur Beschreibung der Wechselwirkung von Messsonde und Messobjekt stellt einen Arbeitsschwerpunkt der Abteilung dar, insbesondere in der Rastersonden- und der Rasterelektronenmikroskopie. Nur ein tief greifendes Verständnis der jeweiligen Wechselwirkungsprozesse im Messprozess erlaubt deren Modellierung, welche wiederum einerseits für die Erreichung geringer Unsicherheiten, andererseits aber auch für deren Berechnung erforderlich ist. Dies ist insbesondere dann zwingend, wenn die Wechselwirkungsprozesse entscheidenden Anteil am Messunsicherheitsbudget aufweisen, wie dies z. B. bei der Strukturbreitenmessung an Mikro- und Nanostrukturen oder der Durchmesserbestimmung an kleinen kreisförmigen Strukturen der Fall ist.

Bei der Strukturantastung mittels Rastersondenmikroskopen ist die Kenntnis der Form der effektiv wirksamen Tastspitze entscheidend z. B. für die Bestimmung der Position einer Strukturkante wie auch für die vergleichende Messung von Rauheitsparametern. Zur Bestimmung der Tastspitzenform wurden verschiedene Methoden an unterschiedlichen Proben zur Tastspitzencharakterisierung miteinander verglichen. Bild 3 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer an Nano-Goldkugeln rekonstruierten Tastspitze (Kooperation mit *TU Ilmenau*).

Bild 2: Mit dem Präzisions-Interferometer bei Temperaturvariation an einem ausdehnungsarmen Probenmaterial gemessene Längenänderungen gegenüber 10 °C. Neben der mittleren Längenänderung (schwarzer Skalenstrich) ist eine Inhomogenität des Ausdehnungsverhaltens zu erkennen (rote Skalenstriche zeigen Maximum und Minimum).



Ein weiteres Beispiel für die in der Abteilung angewandten Methoden zur Simulation von Wechselwirkungen zwischen Messsonde und Messobjekt ist in Bild 4 gezeigt. Es handelt sich hierbei um die Visualisierung der Trajektorien von Elektronen, die in einem Rasterelektronenmikroskop durch die Wechselwirkung von 1-keV-Primärelektronen mit der Modellstruktur einer EUV-Reflexionsmaske mit Monte-Carlo-Methoden simuliert und berechnet wurden. Durch die durchgeführten Simulationen können die Abhängigkeiten des Kantensignals im REM von Parametervariationen der Modellstruktur analysiert werden. Dies ist für Industriepartner eine wichtige Voraussetzung für die Planung und Realisierung einer auf anwendungsrelevante Produktmerkmale bezogenen Qualitätskontrolle der zu fertigenden EUV-Masken.

Wie in der Einleitung erwähnt, ist die Entwicklung und Kalibrierung von Normalen für die fertigungstechnische Industrie ein wesentlicher Arbeitsschwerpunkt der Abteilung. Im Folgenden werden einige Beispiele für diesbezügliche, im Berichtszeitraum abgeschlossene Projekte dargestellt.

Entwicklung und Kalibrierung von Strukturbreiten-Maskennormalen

Der Strukturbreiten-Messtechnik kommt eine große Bedeutung bei der Kontrolle des Fertigungsprozesses integrierter Schaltkreise zu. Sowohl die Breiten der Strukturen auf den Silizium-Wafern als auch die der Absorberstrukturen auf der als Vorlagen im fotolithografischen Abbildungsprozess verwendeten Masken sind mit einer geforderten Konstanz im Bereich weniger Nanometer zu fertigen und dementsprechend auch messtechnisch präzise zu erfassen. Hierbei werden in der Industrie zur Messung der Strukturen verschiedene, hoch auflösende Messverfahren wie beispielsweise die optische UV-Mikroskopie ($\lambda = 365 \text{ nm}$) oder DUV-Mikroskopie ($\lambda = 248 \text{ nm}$), die Rasterelektronenmikroskopie (SEM) und die Rastersondenmikroskopie (SPM), oftmals auch nebeneinander, angewandt.

Im Rahmen eines vom *Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit* unterstützten Forschungsprojekts mit mehreren in der Maskenproduktion bzw. Maskenmesstechnik tätigen Industriepartnern aus Deutschland wurde ein

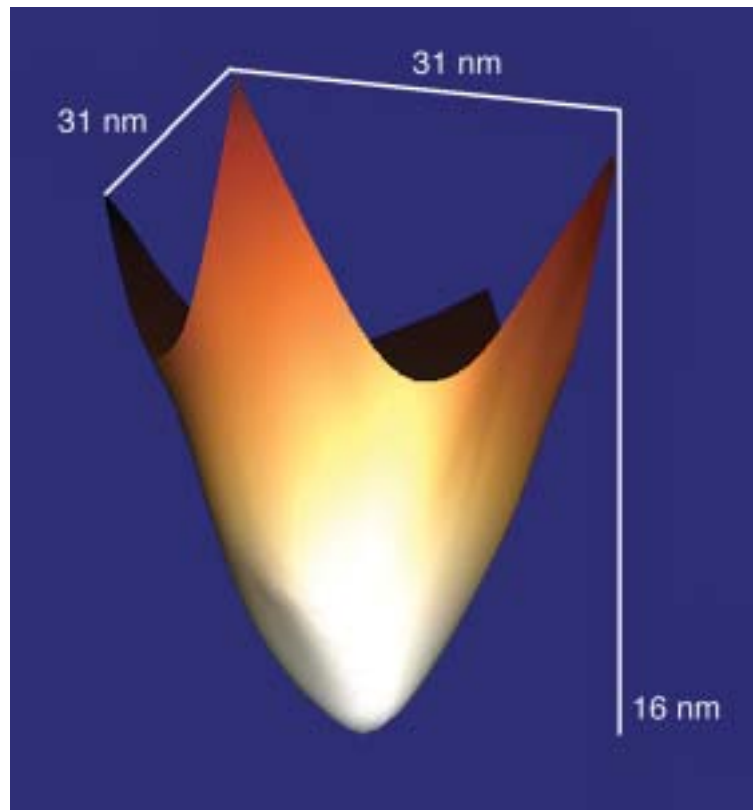


Bild 3: Ergebnis einer Tastspitzenrekonstruktion an Nano-Goldkugeln

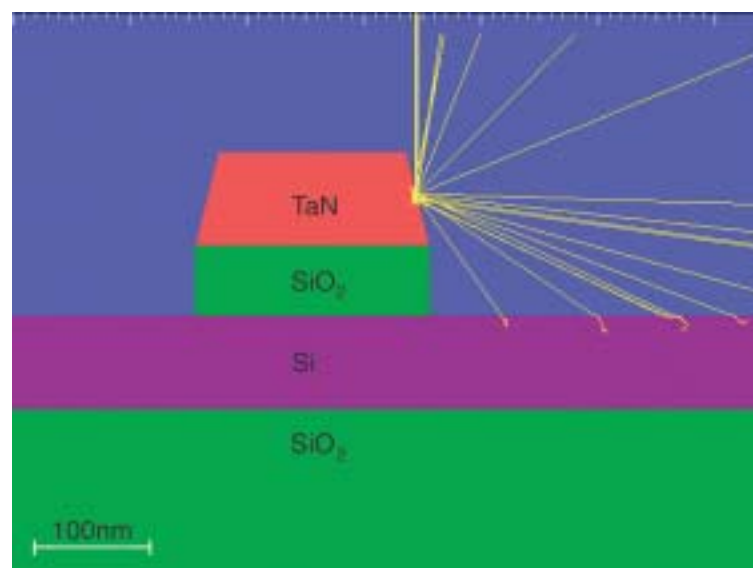


Bild 4: Monte-Carlo-Simulation der Trajektorien von Elektronen in einer Modellstruktur einer EUV-Reflexionsmaske

Layout von Kalibrierstrukturen für neue Linienbreiten-Maskennormale abgestimmt sowie die zur Herstellung und Messung der Normale verwendeten Verfahren weiterentwickelt und optimiert. Zum Abschluss des Projektes sollten die entwickelten Normale und Verfahren ihre Praxistauglichkeit in einer unter den Projektpartnern durchgeführten Vergleichsmessung dokumentieren. Es wurde hierbei eine Übereinstimmung der mit verschiedenen Messverfahren bestimmten Strukturbreiten an einem Vergleichs-Maskennormal innerhalb von 10 nm für Linienbreiten bis hinunter zu etwa 200 nm erzielt (Bild 5). Die neu entwickelten Maskennormale sind kommerziell verfügbar.

Maskennormal für optische Koordinatenmessgeräte

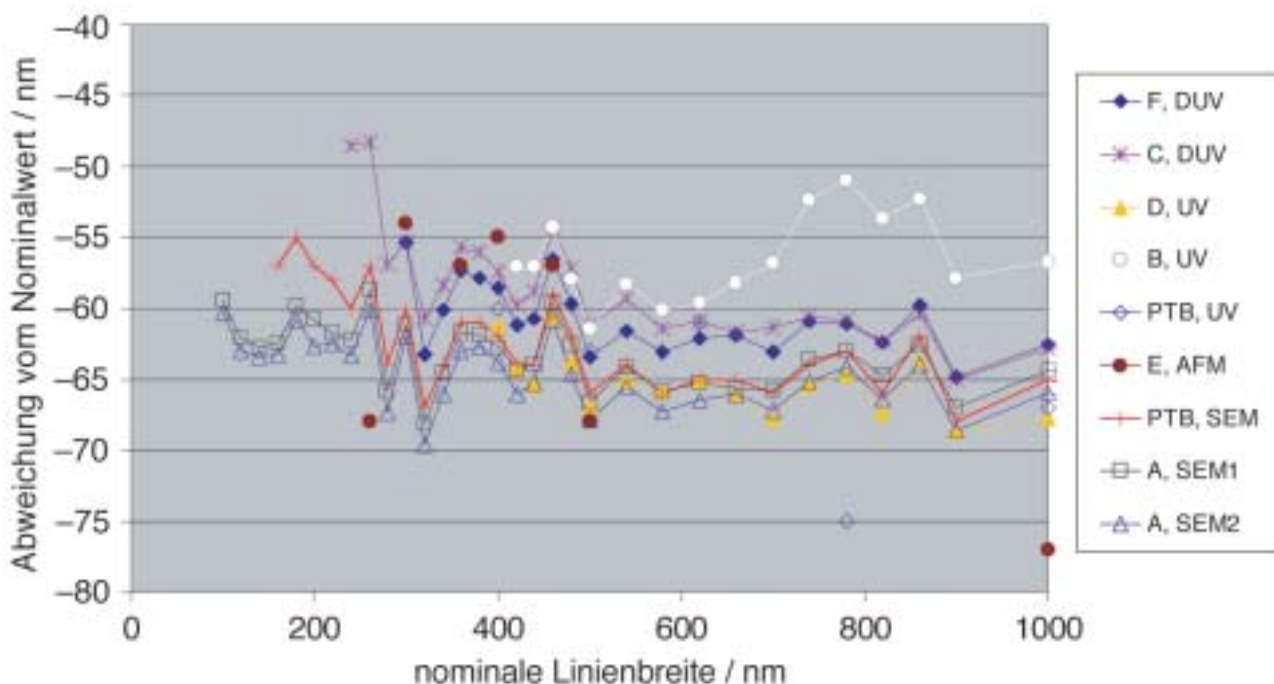
Optische Koordinaten-Messgeräte (KMG) werden in zunehmenden Maße in der industriellen Qualitätssicherung eingesetzt, nicht zuletzt aufgrund des Vorzugs einer höheren Messgeschwindigkeit im Vergleich zu den taktilen Messverfahren. Bedingt durch die stetige Weiterentwicklung der Gerätetechnologie sind inzwischen optische KMGs verfügbar, für die Messunsicherheiten von nur noch 0,3 µm für kleinere Messlängen spezifiziert werden. Hieraus folgt, dass zur Rückführung der Messergebnisse optischer KMGs mit den angestrebten geringen Messunsicherheiten auch entsprechende, qualitativ hochwertige Normale erforderlich sind.

Es wurde deshalb ein neues Kalibriernormal auf Basis einer Standard-152-mm-Quarz-Fotomaske mit einer 50 nm dicken Strukturierungsschicht aus Chrom entwickelt und extern gefertigt. Das Layout der Maske enthält alle relevanten Strukturtypen in beiden Tonwerten (transparent und opak), die sowohl für grundlegende, vergleichende Untersuchungen an optischen KMGs sowie auch für Referenz-Messungen mit Messverfahren der quantitativen Transmissions-Mikroskopie erforderlich sind. Die in der PTB mit verschiedenen Verfahren u. a. in der Abteilung *Optik* durchgeführten Messungen belegen die sehr gute Strukturqualität des neu entwickelten Normals (Bild 6).

Tiefen-Einstellnormal mit Rillentiefen bis 5 mm

Die in der Qualitätsprüfung von Produkten der feinmechanischen und mikrosystemtechnischen Industrie eingesetzten Topographie- und Oberflächenmessgeräte weisen vertikale

Bild 5: Ergebnisse der in einer Vergleichsmessung an einem Maskennormal bestimmten Strukturbreitenmesswerte (A-F: Ergebnisse der Projektpartner mit verschiedenen Mikroskopieverfahren; PTB-Messergebnisse: UV-Mikroskopie: AG 4.23; SEM: AG 5.22).



Messbereiche auf, die zunehmend bis in den Bereich von einigen Millimetern gehen. Die messtechnische Rückführung der in diesem vergrößerten z-Bereich erzielten Messergebnisse mit geforderten Messunsicherheiten bis hinunter zu $0,1 \mu\text{m}$ war bislang nur mit größerem Aufwand unter Verwendung mehrerer Normale realisierbar.

Durch konsequente Weiterentwicklung eines bereits zuvor in der Fachabteilung eingeführten Fertigungsverfahrens konnten nunmehr im Rahmen einer Industriekooperation diamantgedrehte Präzisions-Tiefen-Einstellnormale (Bild 7) hergestellt werden, die in jeweils einem Normal unterschiedliche Rillentiefen hoher Güte bis hin zu 5 mm verkörpern. Die Möglichkeiten des Einsatzes dieser Normale sowohl für taktile wie auch für optisch messende Topographiemessgeräte konnte durch vergleichende Untersuchungen mit einem Tastschnittgerät und einem Interferometer in der PTB aufgezeigt werden.

Profilwellennormal für Verzahnungen

In unterschiedlichen Technologiebereichen werden Verzahnungen zur Kraft- und Drehmomentübertragung eingesetzt. Zur Optimierung von Laufgeräuschen, Verschleiß und Wirkungsgrad der Funktionsflächen der Verzahnungen ist eine sichere messtechnische Bewertung der auf Produktionsteilen vorliegenden Oberflächenwelligkeiten notwendig. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein evolutionäres Profilwellennormal entwickelt, auf dessen Flankenoberflächen wellenförmige Strukturen funktionsgerecht aufgebracht sind. Im Zuge der Entwicklung des Normales wurden Verfahren für dessen Herstellung, Messung und Auswertung erarbeitet, so dass der Industrie ein schlüsselfertiges System angeboten werden kann.

Abschließend zum Themenbereich Normale sei zum einen darauf hingewiesen, dass deren Prototypen oftmals PTB-intern durch den *Wissenschaftlichen Gerätebau* gefertigt werden. Dies gilt nicht zuletzt in Bezug auf die dort neu aufgebauten Fertigungsmöglichkeiten im Bereich der Mikrobearbeitung.

Zum anderen sollte nicht unerwähnt bleiben, dass einige der in der PTB entwickelten Normale im Rahmen internationaler Vergleichsmessungen als Transfornormale verwendet

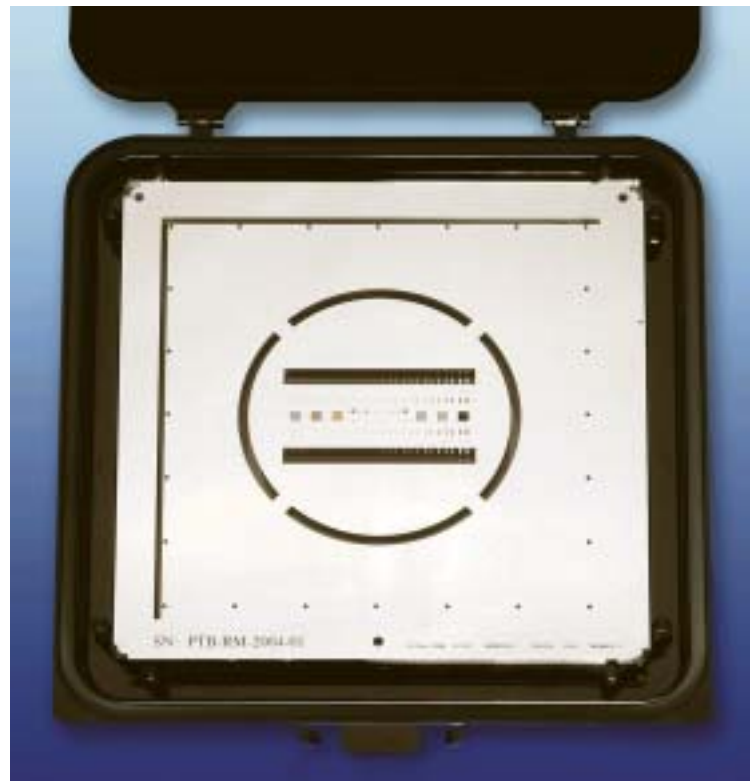


Bild 6: Maskennormal für optische Koordinatenmessgeräte

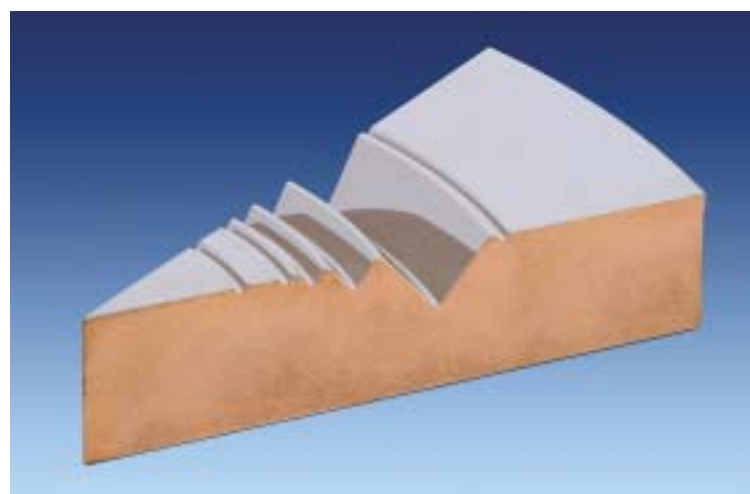


Bild 7: Diamantgedrehtes Präzisions-Tiefen-Einstellnormal
Material: „Electroless“-Nickel auf Kupfersubstrat

wurden und auf diese Weise zur weltweiten Harmonisierung der Messtechnik und Vergleichbarkeit der Messergebnisse verschiedener metrologischer Institute beitragen. Im Berichtszeitraum gilt dies beispielsweise für die Anwendung so genannter Wellennormale in der Formmesstechnik. Näheres hierzu wie auch zu anderen in der Abteilung bearbeiteten Themengebieten ist unter den nachfolgend aufgelisteten Schlagzeilen notiert.

Wie der diesjährige Jahresbericht dokumentiert, hat die Aussage des ehemaligen Leiters der Abteilung, Dr. H. Kunzmann, entnommen aus seinem Beitrag in dem VDI-Bericht „Fertigungsmesstechnik in Forschung und Industrie“ von 1987, nach wie vor Bestand: „Heute verbinden wir unsere wissenschaftlichen Arbeiten mit dem Ziele, praktische Lösungen für meßtechnische Probleme grundsätzlicher Bedeutung zu erarbeiten. Die Industrie soll damit die Voraussetzungen erhalten, auch in Zukunft eine sichere meßtechnische Basis zu haben, die in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitsystem ist und durch kalibrierte Normale bzw. erprobte Meßgeräte und Meßverfahren realisiert wird“. Diese kurze Rückbesinnung erlaubt uns zudem, Herrn Kunzmann noch zu seinem im November 2005 begangenen 65. Geburtstag zu gratulieren!

Bild 8: Evolventisches Profilwellennormal für Verzahnungen



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Messungen an lateral strukturierten Grenzflächen: Auf dem Weg zur Scatterometrie mit Röntgenstrahlen

Lateral strukturierte Grenzflächen lassen sich mit Hilfe der Scatterometrie mit Röntgenstrahlen untersuchen. Zur Unterstützung der Entwicklung quantitativer Modelle sind in Zusammenarbeit mit der AG 5.15 an Proben mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen vergleichende Untersuchungen mit komplementären Techniken durchgeführt worden. Dabei kam neben der diffusen Röntgenstreuung (DXRS) auch das Large-Range-SPM (LR-SPM) der PTB zum Einsatz. (J. Stümpel, FB 5.1, juergen.stuempel@ptb.de)

Referenzsoftware und Web-Frontend für die Berechnung von Rauheitskenngrößen

Die in der PTB entwickelte zertifizierte Referenzsoftware dient der Berechnung von Kenngrößen in der Rauheitsmesstechnik. Hierfür wurde ein neues Web-Frontend entwickelt. (L. Jung, FB 5.1, lena.jung@ptb.de)

Untersuchung eines Interferometers mit akustischer Brechzahlkorrektur am Nanometerkomparator

Im Rahmen eines EUROMET-Projekts wurde in Zusammenarbeit mit dem finnischen Metrologieinstitut MIKES ein dort entwickeltes Interferometer mit akustischer Brechzahlkompensation in Referenz zum Vakuuminterferometer des Nanometerkomparators untersucht. Bei einem Luftweg von 2 m ergaben sich Differenzen von kleiner 50 nm. (J. Flügge, FB 5.2, jens.fluegge@ptb.de)

Verbesserte Darstellung der Winkelskala

Die erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) des primären Winkelkomparators der PTB zur Darstellung der Winkelskala konnte durch einen neuen Antrieb und ein zusätzliches Kalibrierverfahren auf 0,002 Winkelsekunden verringert werden. Dies wurde durch einen Messvergleich mit einem hoch auflösenden digitalen Winkelmessgerät im Vollwinkelmessbereich nachgewiesen. (M. Krause, FB 5.2, michael.krause@ptb.de)

Sukzessive Objektiv-Optimierung unter den Bedingungen des späteren Einsatzes

Für die Neubestimmung der Avogadrokonstante mit dem Ziel einer möglichen Neudefinition des kg sind bislang unerreicht geringe Unsicherheiten zu erzielen. Beim Kugelinterferometer wurde dazu ein neuer Weg beschritten: In Zusammenarbeit mit *Carl Zeiss Jena* wurden die Kugelobjektive des Interferometers in einer thermostatisierten Vakuumkammer gemessen und optimiert. (A. Nicolaus, FB 5.4, arnold.nicolaus@ptb.de)

Untersuchung der Homogenität der thermischen Ausdehnung mit dem Präzisionsinterferometer

Die Untersuchung des thermischen Ausdehnungsverhaltens mittels interferentieller Längenmessung basiert auf der Auswertung von Interferenzbildern und damit auf einer Art „Längentopographie“ der Probe. Aus dem Verhalten dieser Längentopographie bei verschiedenen Temperaturen können Rückschlüsse über die Homogenität der thermischen Ausdehnung gewonnen werden. Es wurde demonstriert, in welcher Weise störende Einflüsse beseitigt werden können, sodass Unsicherheiten im Sub-nm-Bereich erreicht werden können.

(R. Schödel, FB 5.4, rene.schoedel@ptb.de)

Entwicklung eines Absolutinterferometers mit einem Diodenlaser

Mit einer DFB-Laserdiode als Lichtquelle wurde ein Interferometer zur Messung absoluter Distanzen (< 2 m) aufgebaut. Eine relativ hohe Modulationsfrequenz und eine Amplitudenstabilisierung des Lichts erlauben es, auf den sonst üblichen zweiten Laser zur Kompensation von Vibrationen zu verzichten. (K. Meiners-Hagen, FB 5.4, karl.meiners-hagen@ptb.de)

Einfluss von Rauheit und Oberflächenbehandlung auf die interferentielle Längenmessung von Parallelendmaßen

Bei interferometrischen Längenmessungen an Parallelendmaßen wurde der Einfluss verschiedener Verfahren zur fachgerechten Behandlung und Reinigung der Messflächen auf den optischen Phasensprung untersucht.

Der mögliche Phasensprungversatz liegt in der Größenordnung von nur 1 nm.

(P. Franke, FB 5.4, peter.franke@ptb.de)

Verfahren zur Positionierung von Mikrobauteilen

Ein neues Verfahren für die Montage von Spitzen für Rastersondenmikroskope verwendet eine 12-Achsen-Positioniereinheit sowie für die Betrachtung zwei Kamerasysteme. Spezielle Mikrogreifer und Strategien gewährleisten eine schonende Handhabung von sensiblen Bauteilen und führen zu einer μm -genauen Positionierung mit hoher Reproduzierbarkeit.

(R. Meeß, FB 5.5, rudolf.meess@ptb.de)

Entwicklung eines Sechs-Achsen-Montagesystems

Mit hoher Genauigkeit ermöglicht ein neues hochvakuumtaugliches Sechs-Achsen-Montagesystem die Positionierung von Bauteilen. Das System verfügt über mechanische und elektrostatische Greifer. Bei Anwendung unter atmosphärischen Bedingungen können auch Vakuumgreifer in Kombination mit zwei CCD-Kameras eingesetzt werden.

(R. Meeß, FB 5.5, rudolf.meess@ptb.de)

Erzeugung mäanderförmiger Mikrostrukturen

Mäanderförmige Mikrostrukturen wurden mit Hilfe von einem UV-Lasersystem hergestellt. Ein Multiscanning-Verfahren erlaubt die Herstellung von 20 μm breiten Mäanderstrukturen, die als Sensorelemente in einer großen Vielfalt von Anwendungen zur Messung von Kraft, Temperatur oder Magnetfeldern eingesetzt werden können.

(C. Siewert, FB 5.5, carsten.siewert@ptb.de)

Konstruktion und Fertigung einer Nanokraft-Messeinrichtung

Ziel der Nanokraft-Messeinrichtung ist, die Kräfte im Bereich $< 10^{-6}$ Newton mit einer Auflösung von 10^{-12} Newton zu messen. Hauptanwendung wird die Kalibrierung von Tastsensoren für die dimensionelle Messtechnik an Mikro- und Nanostrukturen sein.

(M. Müller, FB 5.5, michael.mueller@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Diamantgedrehte Tiefen-Einstellnormale mit Rillentiefen bis 5 mm

Für die Kalibrierung von Oberflächenmessgeräten mit großem vertikalen Messbereich wurden im Rahmen einer Industriekoope-ration Präzisions-Tiefen-Einstellnormale mit Rillentiefen bis 5 mm hergestellt. Aufgrund der sehr geringen Rauheit der Oberfläche können diese Normale sowohl für die Kalibrierung von optischen als auch taktilen Messgeräten eingesetzt werden.

(U. Brand, FB 5.1, uwe.brand@ptb.de)

Modellierung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften von 3-D-Mikrotastensoren aus Silizium

Für die Berechnung und die Optimierung linearer und nicht linearer mechanischer und elektrischer Eigenschaften von 3-D-Mikrotastensoren aus Silizium mit Piezowiderständen wurden neue Messmethoden sowie neue numerische und analytische Modelle entwickelt. (V. Nesterov, FB 5.1, vladimir.nesterov@ptb.de)

Entwicklung von Normalen des Elastizitätsmoduls ultradünner Schichten zur Kalibrierung von laserakustischen Messgeräten

Zur Kalibrierung von laserakustischen Messgeräten, mit denen der Elastizitätsmodul ultradünner Schichten gemessen werden kann, wurden Normale entwickelt und bereitgestellt. (K. Herrmann, FB 5.1, konrad.herrmann@ptb.de)

Direkte, rückführbare 1-D-Längenmessung im Rasterelektronenmikroskop zur Schichtdickenbestimmung an Querschnitten

Die Schichtdickenbestimmung an Querschnitten im Rasterelektronenmikroskop konnte durch eine direkte, rückführbare 1-D-Längenmessung deutlich verbessert werden.

(T. Ahbe, FB 5.1, thomas.ahbe@ptb.de)

Charakterisierung von Testmasken für die Qualifizierung von Fotolithografie-Objektiven

Es wurden Fotomasken mit unterschiedlichem Design von Teststrukturen in der PTB charakterisiert, die zum einen die Bestimmung des Maßstabsfaktors und zum anderen des Kontrastverhaltens von Fotolithographie-Objektiven erlauben. (W. Häßler-Grohne, FB 5.2, wolfgang.Haessler-Grohne@ptb.de)

Simulation der REM-Abbildung an EUV-Lithographiemasken

Für verschiedene Konfigurationen des Schichtaufbaus von EUV-Reflexionsmasken wurden Monte-Carlo-Simulationen des im Rasterelektronenmikroskop (REM) zu erwartenden Signalkontrastes an Kanten durchgeführt.

(C. G. Frase, FB 5.2, carl.g.frase@ptb.de)

Anwendung der Phasengittertechnologie zur Winkelmessung mit elektronischen Autokollimatoren

Durch eine optische Simulationsrechnung wurde gezeigt, dass bei Verwendung eines Phasengitters für die Messmarke eines Autokollimators die Winkelmessunsicherheit bei kleinen Aperturen und großen Arbeitsabständen verringert werden kann, indem die Abbildungseigenschaften im beugungsbegrenzten Bereich verbessert werden.

(G. Fütterer, FB 5.2, gerald.fuetterer@ptb.de)

Vergleichsmessungen mit optischen und taktilen Mikro-Sensoren

Es wurde erstmals eine internationale Vergleichsmessung mit taktilen und optischen Mikro-Sensoren an einem von der PTB entwickelten Mikro-Konturnormal durchgeführt. An der Vergleichsmessung waren sieben Teilnehmer mit Messgeräten unterschiedlicher Messtechnik beteiligt. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der optischen und der taktilen Sensoren innerhalb weniger μm bzw. innerhalb $0,01^\circ$. (M. Neugebauer, FB 5.3, michael.neugebauer@ptb.de)

Rückführbare Messtechnik in der Produktionslinie

In einem zweijährigen Projekt mit Messtechnikherstellern und Anwendern wurden Verfahren zur messtechnische Rückführung von fertigungsintegrierten Messungen entwickelt. Die Verfahren werden zurzeit in eine Richtlinie des *Verbandes der Automobilindustrie* (VDA) überführt.

(K. Wendt, FB 5.3, klaus.wendt@ptb.de)

Interferometrischer Taster für Koordinatenmessgeräte (Lens-Stylus)

Durch die Integration eines Laserinterferometers und eines neu entwickelten Linsentasters wird ein Koordinatenmessgerät zum Formmessgerät mit optischer Antastung. Hiermit können Regelgeometrien wie Kugeln oder Zylinder als auch komplexe Geometrien

wie Zahnräder mit interferometrischer Genauigkeit und hoher Ortsauflösung gemessen werden.

(F. Härtig, FB 5.3, frank.haertig@ptb.de)

Profilwellennormal für Verzahnungen (Involute Waviness Artifact)

Das Profilwellennormal ermöglicht erstmals die rückführbare Erfassung wellenförmiger Oberflächenstrukturen an evolventischen Zahnradflanken. Mit ihm können Verzahnungsmessgeräte qualifiziert werden, so dass Aussagen über Laufgeräusche und Verschleiß zuverlässiger getroffen werden können.

(F. Härtig, FB 5.3, frank.haertig@ptb.de)

Einsatz von Computertomographie (CT) im Reverse-Engineering

Industrielle CT-Anlagen werden in der Automobilindustrie zur maßlichen Erfassung von großen Aluminiumgussteilen eingesetzt. Im Rahmen eines BMW-Projekts wurde der Einsatz von CT am Beispiel des Reverse-Engineering einer historischen Automobilkomponente (Zylinderkopf eines HORCH-853-Automobils von 1935 bis 1937) untersucht. Die festgestellten Abweichungen zwischen Original- und Bauteilkopie sind im Hinblick auf die geforderten Gussteiltoleranzen als sehr zufriedenstellend zu bewerten. (M. Bartscher, FB 5.3, markus.bartscher@ptb.de)

Analyse der Messunsicherheit der Messeinrichtung der PTB zur Untersuchung von Laserinterferometern für Längenmessungen

Die Messunsicherheit des PTB-Komparators zur Kalibrierung kompletter Laserinterferometer wurde für einen Arbeitsbereich von 2 m analysiert und mit denen anderer NMIs anhand der CMC-Liste verglichen.

(G. Sparrer, FB 5.4, gerald.sparrer@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Gesetzliche Regelungen für Choirometer in Deutschland

Die Zulassung neuer messtechnischer Verfahren zur Klassifizierung von Choirometern, die auf der digitalen Bildauswertung der Schnittflächen von Schweineschlachtkörpern beruhen, sind beantragt und befinden sich in der labormäßigen und praktischen Prüfung. Ausgelöst durch die Notwendigkeit, EU-Recht in nationales Recht umzusetzen, werden die Arbeiten in naher Zukunft auf die

Zulassung von Geräten zur Klassifizierung von Rinderschlachtkörpern ausgedehnt. (M. Wolf, FB 5.4, michael.wolf@ptb.de)

Konstruktion und Fertigung einer Bestrahlungsvorrichtung für die Kalibrierung von Ortsdosimetern

Aus einem Bleimagazin mit vier verschiedenen radioaktiven Gammaquellen wird jeweils eine Quelle herausgefahren und bestrahlt in einem Radius von 5 m die zu kalibrierenden Ortsdosimeter. Die gemessene Dosisleistung der Ortsdosimeter wird nach Ende der Messreihe miteinander verglichen. (E. Luiken, FB 5.5, enno.luiken@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

EUROMET L-K1 – Internationaler Ringvergleich für Parallelendmaße

Der EUROMET-L-K1-Ringvergleich zu interferometrischen Längenmessungen an Parallelendmaßen aus Stahl und Wolframkarbid bestätigte bis auf wenige Ausnahmen die messtechnische Kompetenz der 16 teilnehmenden metrologischen Staatsinstitute. Die bei der Auswertung angebrachte Driftkorrektur für Endmaße aus Wolframkarbid konnte durch umfangreiche Nachmessungen der PTB nicht bestätigt werden. (P. Franke, FB 5.4, peter.franke@ptb.de)

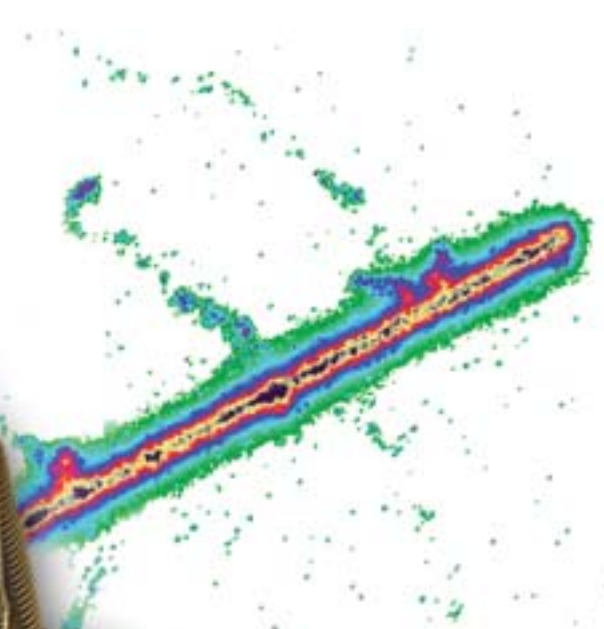
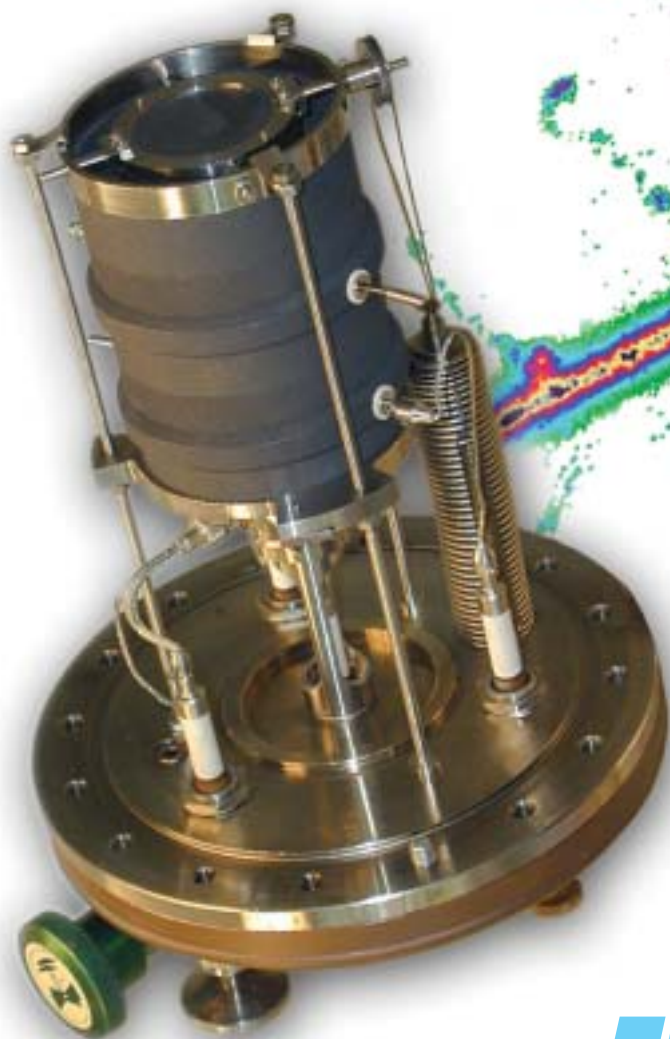
EUROMET-Projekt 677: Internationaler Ringvergleich für Stahlmessbänder

Drei Stahlmessbänder mit den Längen 10 m, 30 m und 50 m wurden im Rahmen einer EUROMET-Vergleichsmessung von 16 nationalen Metrologieinstituten kalibriert. Hierbei kamen sehr unterschiedlich lange Komparatoren (3 m bis 70 m) mit ebenso sehr unterschiedlichen Messunsicherheiten zum Einsatz. (K. Meiners-Hagen, FB 5.4, karl.meiners-hagen@ptb.de)

EUROMET-Projekt 649: Kalibrierung von Vergrößerungsnormalen

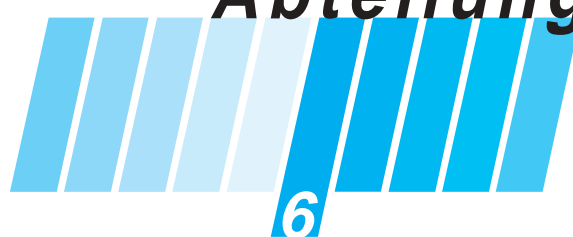
Ein EUROMET-Projekt zur Kalibrierung von Form-Vergrößerungsnormalen (u. a. Flicks) wurde durchgeführt. Dabei wurden zum ersten Mal international die metrologischen Eigenschaften von Wellennormalen verglichen. Es konnten Übereinstimmungen innerhalb von $0,01 \mu\text{m}$ bei kleinen Wellenzahlen erreicht werden. (O. Jusko, FB 5.3, otto.jusko@ptb.de)

Ionisierende Strahlung



Berichte der Abteilungen

Abteilung



6

Ionisierende

Einleitung

Die Abteilung 6 hat den Auftrag, Fortschritt und Zuverlässigkeit in der Messtechnik der ionisierenden Strahlung für Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft zu gewährleisten. Die sich daraus ergebenden Aufgabenbereiche werden im Folgenden kurz erklärt und es wird auf bedeutsame Ergebnisse aus dem Jahr 2005 hingewiesen, über die im Anschluss an die Einleitung gesondert berichtet wird. Weitere Informationen finden sich in den darauf folgenden Schlagzeilen.

Grundlagen der Metrologie

In der Abteilung 6 erfolgt die Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten der Aktivität, der Teilchenfluenz, der Luftkerma, der Energiedosis und der Äquivalentdosis. Es werden Primär- und Transfernormale entwickelt und bereitgestellt, die die heutigen und die für die Zukunft absehbaren Anforderungen erfüllen. Die PTB sichert damit international die Einheitlichkeit von Messungen im Bereich ionisierender Strahlung. Es wird über ein verbessertes Primärnormal für die Brachytherapie, Messungen der relativen biologischen Wirksamkeit hochenergetischer Neutronen und, in den Nachrichten des Jahres, über das neue Primärnormal für die Wasser-Energiedosis berichtet.

Metrologie für die Wirtschaft

Die Förderung der Wirtschaft erfolgt durch Forschung und Entwicklung, Kalibrierung sowie Beratung und Information auf dem Gebiet ionisierender Strahlung. Es wird über die Metrologie für die Fusionsforschung und, als ein Beispiel für eine innovative Geräteentwicklung, über die Entwicklung eines Nanodosimeters berichtet.

Titelbild

Ionisierende Strahlung und Messtechnik: Messgerät zur Bestimmung der Flussdichte von Neutronenstrahlung und Ionisationsspur eines hochenergetischen Kohlenstoff-Ions, gemessen mit der Teilchenspurkammer OPAC.

Metrologie für die Gesellschaft

Die Abteilung 6 stellt Messtechnik und Messverfahren ionisierender Strahlung zum Erhalt bzw. zur Wiederherstellung der Gesundheit der Bürger sowie zum Schutz gegen schädigende Wirkungen ionisierender Strahlung bereit. Es wird über Dosismessungen an Personen- und Güterscannern im Rahmen eines BMU-Vorhabens und, als Beispiel für eine Qualitätskontrolle durch die PTB, über einen Ringversuch mit dotierten Referenz-Aerosolfiltern berichtet.

Internationale Angelegenheiten

Internationale Einheitlichkeit ist insbesondere notwendig bei der Verwendung der Wasser-Energiedosis in der Strahlentherapie, der Luftkerma in der Strahlendiagnostik, der Strahlenschutz-Messgrößen der ICRU und der Charakterisierung von Referenzmaterialien für Aktivitäts-Messvergleiche.

Ehemaliger Forschungsreaktor wird Zentralwerkstatt

Am 28.7.2005 hat die zuständige Genehmigungsbehörde, das *Niedersächsische Umweltministerium*, den letzten Teilbereich des *Forschungs- und Messreaktors Braunschweig* (FMRB) zur uneingeschränkten Nutzung aus der atomrechtlichen Aufsicht des Atomgesetzes (AtG) entlassen. In vier Gebäuden können jetzt 184 Räume konventionell nachgenutzt werden. Der größte Raum, die rund 1500 m² große ehemalige Experimentierhalle des Reaktors wird in Zukunft die Fertigungsanlagen des Gerätebaus beherbergen. Bild 1 zeigt die Experimentierhalle des Forschungsreaktors während des Reaktorbetriebs 1990 und nach der Freigabe zur konventionellen Nutzung.

Im Rahmen des Rückbaus und der Stilllegung des FMRB sind insgesamt 585 t in Chargen sortierte Reststoffe angefallen. Davon wurden 350,8 t Material uneingeschränkt und 73,3 t zur Entsorgung auf die Deponie von der

e Strahlung



Bild 1: Experimentierhalle des Forschungsreaktors während des Reaktorbetriebs 1990 (oben) und nach der Freigabe zur konventionellen Nutzung 2005 (unten)

Genehmigungsbehörde freigegeben. 160,9 t radioaktives Material wurde volumenoptimiert in Fässer verpackt, dies erfolgte nach Ablaufplänen, die durch die Genehmigungsbehörde und das *Bundesamt für Strahlenschutz* (BfS) freigegebenen wurden. Nachdem das Verpacken durch zwei unabhängige Sachverständige geprüft wurde, konnten die Fässer in das Zwischenlager des *Forschungsreaktors* eingelagert werden. Die PTB hat seit 1995 bis zur Entlassung des letzten Teilbereichs des FMRB gesonderte Mittel in Höhe von 16,3 Mio EUR für die Stilllegung und den Rückbau aufgebracht.

Qualitätssicherung von Spurenmessungen durch Ringversuch

Spurenmessungen dienen der Überwachung der Umweltradioaktivität auf sehr niedrigem Aktivitätsniveau, um sowohl Aktivitätskonzentrationen in der Luft langfristig zu beobachten (Trenderkennung) als auch kurzfristige Erhöhungen nachzuweisen. Die Messungen werden in Deutschland im Rahmen der Überwachung der Umweltradioaktivität in der Luft nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz durchgeführt.

Zur Überprüfung der Qualität der Messergebnisse unter möglichst realen Bedingungen dienen sogenannte Ringversuche. Solche Versuche wurden 2005 erstmals bei der Spurenmessung von Radionukliden in der bodennahen Luft mit fünf Teilnehmern aus Deutschland, Österreich und der Schweiz durchgeführt.

Dazu wurden Großflächenfilter mit realem Luftstaub von Routineprobenentnahmen beaufschlagt und zur PTB gesandt. Aufgabe der PTB war die Herstellung einer Aktivitätsnormallösung sowie die Dotierung der Filter. Etwa 3000 Tropfen pro Filter wurden homogen auf den Staub aufgebracht (Bild 2). Ziel waren Radionuklidaktivitäten, die dem Spuren-Niveau entsprachen, jedoch hinreichend über den Nachweisgrenzen der Messsysteme liegen. Einflüsse der Aktivitätsbeiträge von Radionukliden im Luftstaub wurden berücksichtigt. Die dotierten Filter wurden zu den Teilnehmern geschickt, dort in die spezifischen Messgeometrien gebracht und die Aktivitäten auf dem Filter gemessen.

Das Ergebnis des Ringversuchs ist zufriedenstellend. Die beobachteten Abweichungen der Labormittelwerte von den Sollwerten sind bis auf einen Ausreißer kleiner als 30 %.

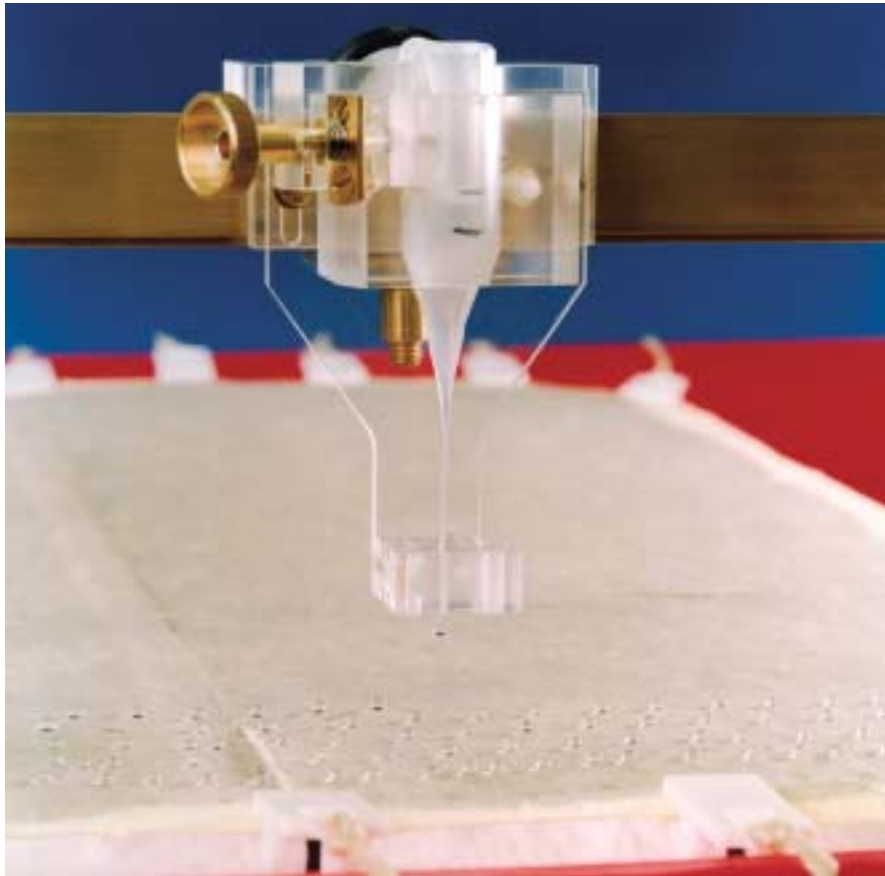


Bild 2: Dotierung eines bestaubten Großflächenfilters mit Tropfen einer Aktivitätsnormallösung

Fertigstellung der Primärnormal-Messeinrichtung zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis von Betaquellen für die Brachytherapie

Mit der neuen Primärnormal-Messeinrichtung für die Brachytherapie ist die PTB in der Lage, dreidimensionale Verteilungen der Wasser-Energiedosis im Nahfeld von Betaquellen, also unter klinischen Anwendungsbedingungen, zu bestimmen. Die zu kalibrierenden Quellen sind denen ähnlich, die in der Augentumor- und Gefäß-Strahlentherapie eingesetzt werden.

Die Messeinrichtung basiert auf der in Bild 3 links dargestellten Multielektroden-Extrapolationskammer (MEK) mit einer segmentierten Messelektrode, die mit Hilfe lithographischer Verfahren im *Reinraumzentrum* der PTB auf einem Si-Wafer hergestellt wurde. Die Waferelektrode gestattet die simultane Messung der Wasser-Energiedosis an 28 Messpunkten. Die Größe einer Einzelmesselektrode beträgt $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. Die MEK wird zusammen mit der Apparatur in Bild 3 rechts

benutzt. Zur Messung der Energiedosis wird eine Quellenkapsel (a) in die MEK (b) in einem definierten Abstand zur Messelektrode eingeführt. Die Vorderfläche der Kapsel dient als Gegenelektrode zur Messelektrode, so dass die Bestimmung der Dosis direkt auf der Phantomboberfläche geschehen kann. Nach der Kalibrierung wird die Kapsel in den Abschirmbehälter (c) eingesetzt. Für Sr-90/Y-90-Flächenquellen beträgt die relative Standard-Messunsicherheit 2,9 %, die Wiederholstandardabweichung 1 %. Ein

im Juli 2005 durchgeführter PTB-interner Vergleich mit dem Primärnormal für Beta-Flächenquellen wies eine Übereinstimmung von 2 % auf.

Dosismessungen an Personen- und Güterscannern

Über den Einsatz von ionisierender Strahlung für die Personen- und Güterkontrolle, z. B. an Grenzen oder als Eingangskontrolle für zu sichernde Bereiche, wurde in jüngster Zeit in der Presse vielfach berichtet. Vorteile der Personen- und Güterscanner mit Röntgenstrahlung sind der geringe Zeitaufwand und die hohe Selektivität, die es ermöglichen, u. a. Sprengstoff und Drogen schnell zu erkennen. Im Rahmen eines BMU-Vorhabens sollten von solchen Scannern verursachten Personen- und Ortsdosen ermittelt werden. Dazu wurden Messungen an fünf technisch repräsentativen und kommerziell erhältlichen Personen- und Güterscannern durchgeführt. Alle Scanner arbeiten mit Pulsen kurzer Dauer (typisch einige Millisekunden) und hoher Dosisleistung (bis etwa 4 Sv/h). Es zeigte sich, dass die in dem gepulsten Strahlungsfeld auftretenden Personen- und Ortsdosen relativ niedrig sind und nur mit einer speziellen in der PTB ent-

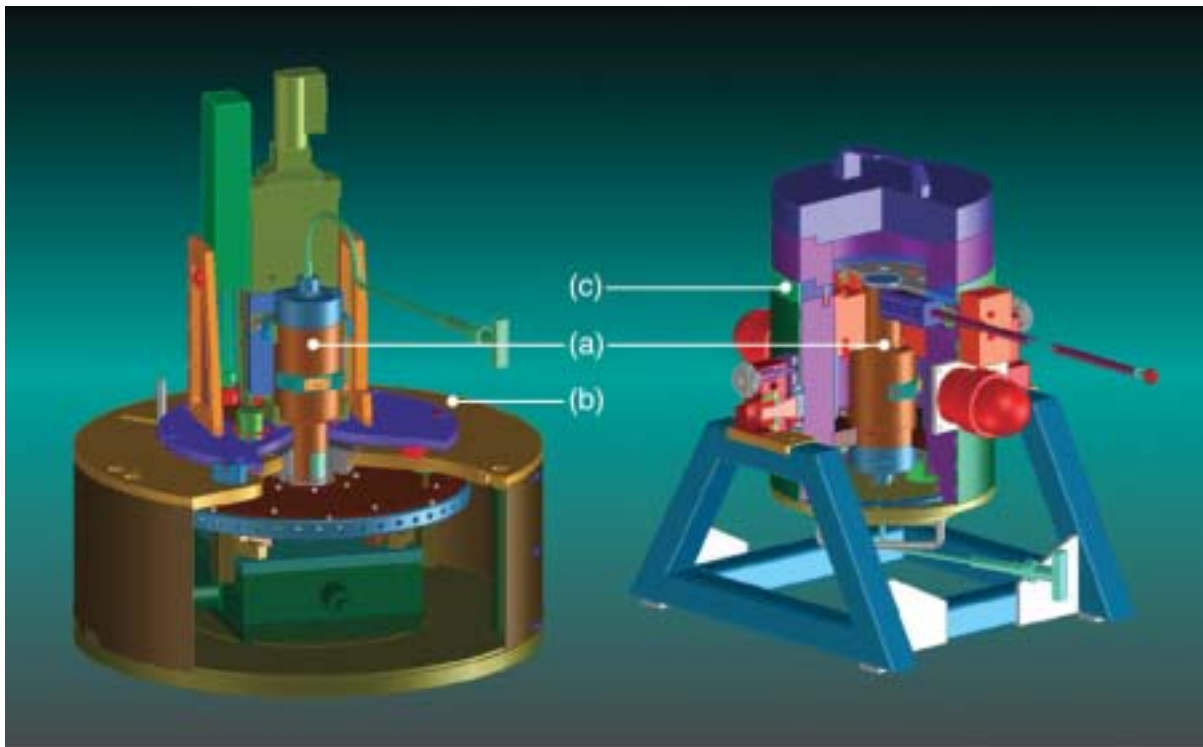


Bild 3: Multielektroden-Extrapolationskammer (links) und Apparatur für die Quellenhalterung (rechts) zur Darstellung und Weitergabe der Wasser-Energiedosis in der Brachytherapie (weitere Erläuterungen siehe Text)

wickelten Apparatur zuverlässig gemessen werden konnten. Die gemessenen Tiefen-Personendosen bzw. Umgebungs-Äquivalentdosen lagen im Bereich von 0,07 Mikrosievert bis 6 Mikrosievert für einen Scan, abhängig von der Art des Scanners und den Betriebsparametern. Diese Werte sind erstaunlich niedrig: die mittlere effektive Tagesdosis einer Person beträgt in Deutschland etwa 11 Mikrosievert; bei einem Flug von Frankfurt nach Washington erhält man eine effektive Dosis von etwa 35 Mikrosievert.

Relative biologische Wirksamkeit hochenergetischer Neutronen

Die Quantifizierung der biologische Wirkung verschiedener Arten von ionisierender Strahlung beruht im Wesentlichen auf epidemiologischen Studien und Tierexperimenten. Daneben dienen aber auch radiobiologische In-vitro-Studien zur Abschätzung von Trends, z. B. der Energieabhängigkeit der biologischen Wirkung. Bei solchen Experimenten wird in geeigneten Zellen die Häufigkeit des Auftretens eines für die Strahlenwirkung typischen „Endpunktes“, z. B. einer Chromoso-

menaberration oder des Zelltods, als Funktion der Dosis untersucht. Diese Untersuchungen sind besonders wichtig für solche Energiebereiche und Strahlenarten, für die epidemiologische Studien nicht möglich oder nicht aussagekräftig sind. Ein Beispiel ist die Strahlenexposition des fliegenden Personals oder von Personen an Hochenergiebeschleunigern. In beiden Fällen wird ein großer Teil der effektiven Dosis durch Neutronen mit Energien oberhalb von 20 MeV erzeugt.

In Zusammenarbeit mit Strahlenbiologen des *Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit* (GSF, Neuherberg) und des BfS wurden deshalb die an der Beschleunigeranlage der PTB durchgeführten Untersuchungen zur neutroneninduzierten Produktion dizentrischer Chromosomen in menschlichen Lymphozyten (s. Jahresbericht 2003, S. 105) durch Experimente mit hochenergetischen Neutronen in Louvain-la-Neuve (Neutronenergie 60 MeV) und Kapstadt (Neutronenergie 200 MeV) erweitert. Im Gegensatz zu den in der PTB zur Verfügung stehenden monoenergetischen Neutronenfeldern enthält das hochenergetische Fluenzmaximum dieser Strahlungsfelder nur etwa 30 % der gesamten Neutronenfluenz. Bei der Analyse der in Louvain-la-Neuve gewonnenen Daten wurde der Beitrag der niederenergetischen Neutronen durch ein iteratives Extrapolationsverfahren berücksich-

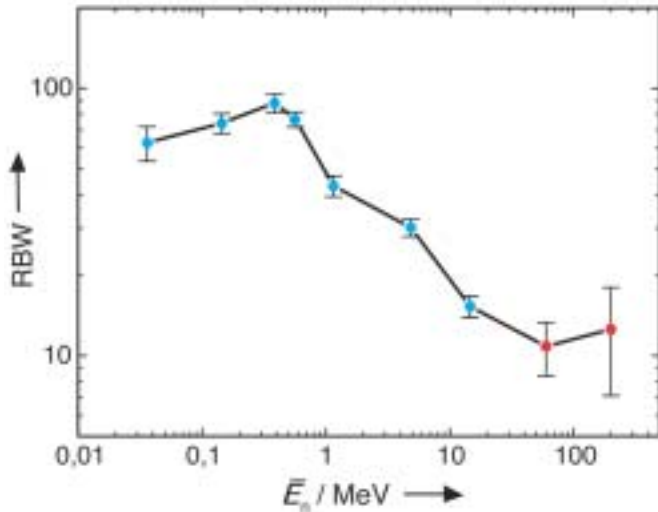


Bild 4: Relative biologische Wirksamkeit RBW in Abhängigkeit von der mit der Energiedosis gewichteten mittleren Energie \bar{E}_n der Neutronenstrahlung

tigt, das auf die in der PTB gemessenen Daten für Energien bis 15 MeV zurückgreift. Bei den Daten für 200 MeV erlaubten die besonderen Eigenschaften der Bestrahlungseinrichtung in Kapstadt dagegen eine separate experimentelle Bestimmung dieser Korrektur. Bild 4 zeigt experimentell bestimmte Werte der „Relativen Biologischen Wirksamkeit“ (RBW). Sie ist definiert als Quotient der Energiedosis einer Referenzstrahlung (hier Co-60-Gammastrahlung) und der interessierenden Strahlungsart (hier Neutronen) bei gleicher beobachteter biologischer Wirkung. Man erkennt oberhalb von etwa 20 MeV keine statistisch signifikante Energieabhängigkeit. Die in anderen Arbeiten berichteten Anzeichen für einen starken Wiederanstieg der RBW bei hohen Neutronenenergien wurden nicht bestätigt.

Metrologie für die Fusionsforschung

Nach der für die europäische Fusionsforschung erfreulichen Entscheidung, den geplanten internationalen Fusionsreaktor ITER im französischen Cadarache zu bauen, rücken Fragen rund um die Fusionstechnologie auch in Deutschland wieder mehr in das Blickfeld. Die Messung der bei der Fusion von Deuterium und Tritium entstehenden Neutronen ist nicht nur aus Strahlenschutzaspekten eine große Herausforderung. Die gemessene spektrale Verteilung der Neutronen ist von großem diagnostischen Wert und erlaubt Rückschlüsse auf die komplexen Vorgänge im Plasma wie z. B. auf die Tempera-

turverteilung der Ionen und die Mechanismen bei der Heizung des Fusionsplasmas. Die PTB hat mit Unterstützung durch das European Fusion Development Agreement (EFDA) ein Neutronenspektrometer auf der Basis organischer Szintillationsdetektoren für den gesamten für die Fusionsforschung relevanten Neutronenenergiebereich von etwa 1 MeV bis 15 MeV entwickelt und dieses bereits in mehreren Messkampagnen am *Joint European Torus* (JET) in Culham, England, eingesetzt.

Durch eine Zusammenarbeit mit dem *Max-Planck-Institut für Plasmaphysik* in Garching und Greifswald ist die PTB eingebunden in die Entwicklung und Charakterisierung eines Systems zur Überwachung der gesamten Neutronenproduktion des größten deutschen Fusionsexperiments Wendelstein 7-X, das voraussichtlich 2011 den Experimentierbetrieb aufnehmen wird (Bild 5).

Die PTB führt außerdem seit vielen Jahren Messungen zur Bestimmung der Neutronenwirkungsquerschnitte von Materialien durch, die für die Fusionstechnologie relevant sind, und ist damit lange vor der konkreten Realisierung am Design von Fusionsforschungsanlagen beteiligt.

Experimentelle Nanodosimetrie in der PTB eingeführt

Die Spurstruktur ionisierender Strahlung hängt stark von der Teilchenart und Teilchenenergie ab und ist damit zur Charakterisierung strahleninduzierter biologischer Effekte unerlässlich. Strahlungsdetektoren sollten entsprechend miniaturisiert sein bis hin zu Nanometerstrukturen. Um Spurstrukturen messtechnisch zu erfassen, wurde ein am *Weizmann Institut*, Israel entwickeltes Nanodosimeter installiert, mit dem die Erzeugung von Ionisations-Clustern (Anzahl von Ionisationsereignissen) in Gasen untersucht werden kann (Bild 6). Die durch primäre Strahlung im Wechselwirkungsbereich des Dosimeters erzeugten Ionen werden durch ein Elektroden-system aus dem Messvolumen extrahiert, über eine Driftstrecke auf einen Detektor geleitet und dort einzeln nachgewiesen. Das Dosimeter wird zurzeit mit Propan betrieben und hat ein Messvolumen mit einem Durchmesser von 1 mm. Bei einem Betriebsdruck von 1,3 mbar ergibt sich damit eine Massebelegung von 0,26 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. Diese Massebe-

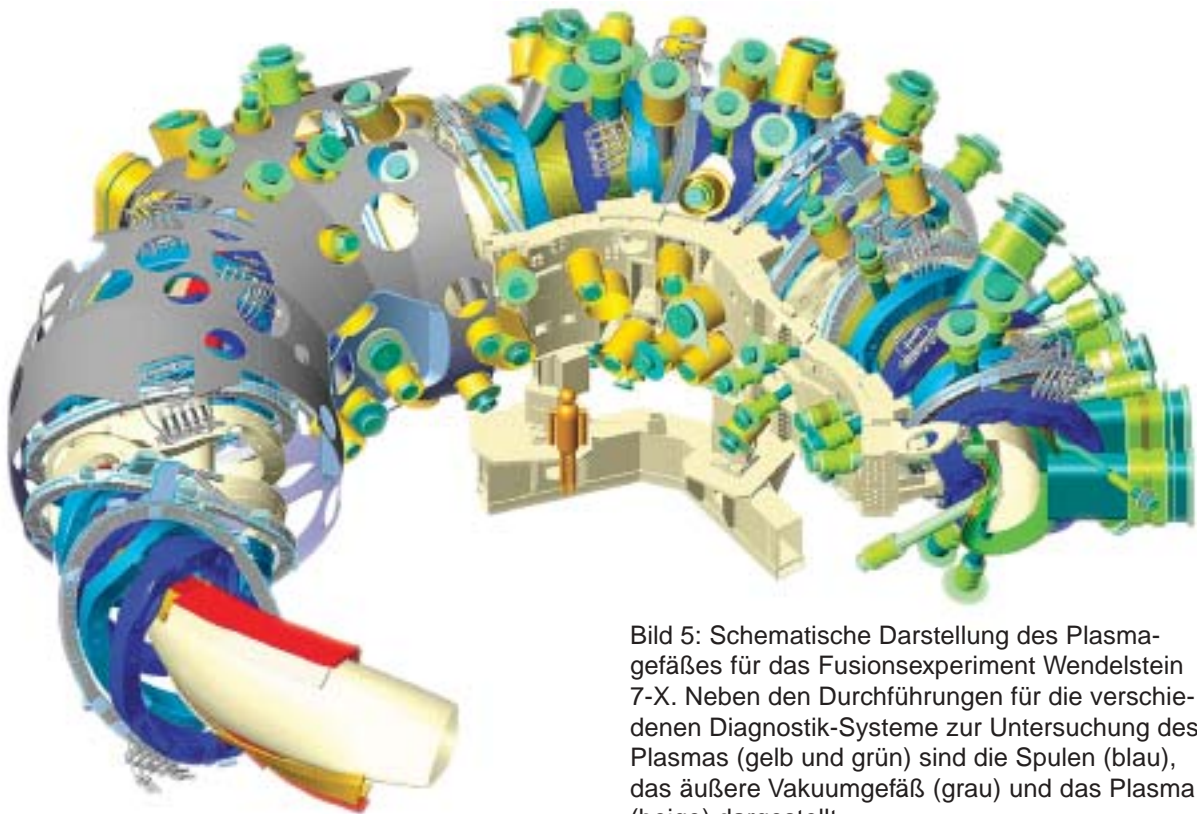


Bild 5: Schematische Darstellung des Plasmagefäßes für das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X. Neben den Durchführungen für die verschiedenen Diagnostik-Systeme zur Untersuchung des Plasmas (gelb und grün) sind die Spulen (blau), das äußere Vakuumgefäß (grau) und das Plasma (beige) dargestellt.

legung entspricht einer Abmessung von 2,6 nm in Wasser (als Ersatz für biologisches Gewebe) und damit etwa dem Durchmesser der DNA. In Monte-Carlo-Simulationsrechnungen wurde gezeigt, dass die Ionisationscluster- Erzeugung in Gasen bei geeigneter Wahl des Gasdrucks auf die Clustererzeugung in Wasser übertragen werden kann und zumindest für Elektronenstrahlung eng mit der Erzeugung von Einfach- oder Doppelstrangbrüchen in der DNA korreliert ist.

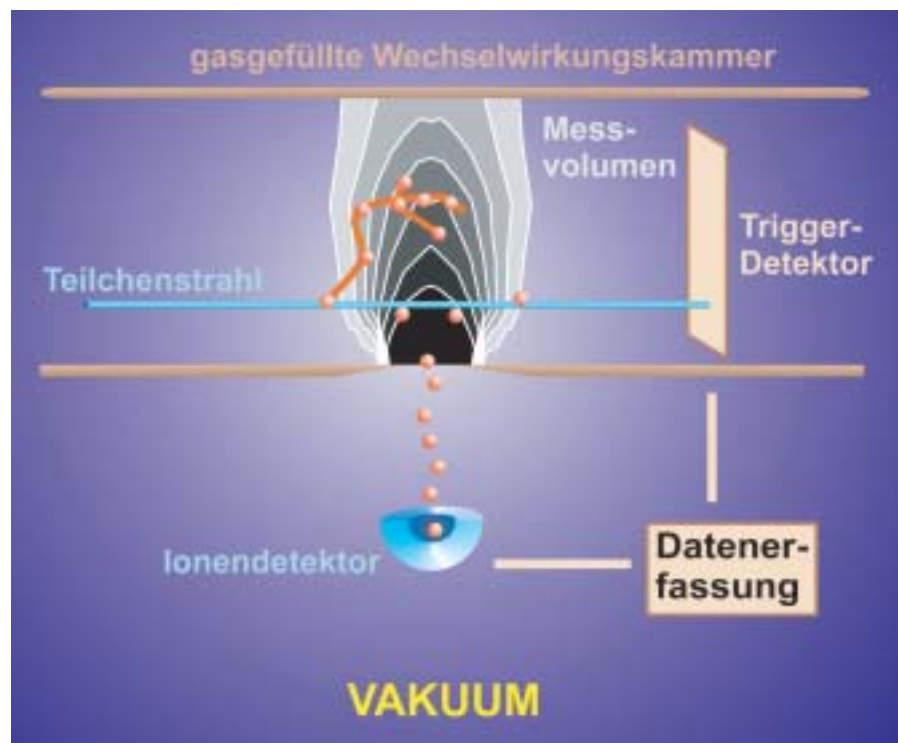


Bild 6: Messprinzip zur Untersuchung der Ionisationscluster-Erzeugung in Gasen: Die durch primäre Strahlung im Messvolumen des Dosimeters erzeugten Ionen werden durch ein Elektrodensystem aus dem Messvolumen extrahiert, über eine Driftstrecke auf einen Detektor geleitet und dort einzeln nachgewiesen. Die unterschiedlich gefärbten Bereiche des Messvolumens kennzeichnen die Ortsabhängigkeit der Ionen-Extraktionswahrscheinlichkeit.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Entwicklung eines neuen Relativmessverfahrens zur Aktivitätsbestimmung mit Hilfe von Flüssigszintillationszählern

In der PTB wurde ein neues Relativmessverfahren zur Aktivitätsbestimmung mit Hilfe der 4π -Flüssigszintillationszählung entwickelt und getestet. Bei dem Verfahren wird die Nachweiswahrscheinlichkeit eines Radionuklids auf eine ^3H -Referenzlösung zurückgeführt, wodurch die Methode sehr robust gegenüber Veränderungen der Messapparatur ist. Das Verfahren ist auch für kleine Aktivitäten geeignet und soll zum Gebrauch für internationale Vergleichsmessungen weiterentwickelt werden.

(K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

Bestimmung der Emissionswahrscheinlichkeiten und der Aktivität von ^{109}Cd im Rahmen eines internationalen Vergleichs

Die Arbeitsgruppe *Aktivitätseinheit* hat zu Vergleichszwecken eine radioaktive ^{109}Cd -Lösung an das internationale Referenzsystem SIR geschickt. Die Emissionsrate der Konversionselektronen wurde mit Hilfe von Druckproportionalzählern und einem Flüssigszintillationsspektrometer bestimmt. Zusätzlich wurde die Photonen-Emissionsrate mit Hilfe von kalibrierten Halbleiterspektrometern gemessen. Durch Kombination der Ergebnisse erhält man sowohl die Aktivität als auch die Emissionswahrscheinlichkeiten für die 88-keV-Photonen und Konversionselektronen.

(K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

Vollständige Berechnung der Koinzidenzsumimations-Korrekturen für gammaspektrometrische Messungen mit Germaniumdetektoren

Das Monte-Carlo-Programm GESPECOR wurde zur Berechnung von Korrekturen für Zwei-, Drei- und Vierfach-Koinzidenzen zwischen Gamma-Photonen und K-Röntgenstrahlung sowie für Escape-Linien erweitert. Damit ist es erstmals möglich, für alle in einem Spektrum gemessenen Linien die Koinzidenzsumimationskorrekturen zu berechnen.

(D. Arnold, FB 6.1, dirk.arnold@ptb.de)

Ermittlung des Fluenzspektrums des neuen ^{60}Co -Referenzstrahlungsfeldes mittels Monte-Carlo-Simulation

Das Fluenzspektrum des neuen ^{60}Co -Referenzstrahlungsfeldes wurde durch Simulation des Photonentransports in der Bestrahlungsvorrichtung mit dem Monte-Carlo-Simulationsprogramm BEAMnrc ermittelt. Die mit Hilfe dieses Spektrums berechnete Tiefendosiskurve im Wasserphantom weist eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit experimentell bestimmten Tiefendosiskurven auf.

(R.-P. Kapsch, FB 6.2, ralf-peter.kapsch@ptb.de)

Verbessertes Verfahren zur Spektrometrie von Referenz-Photonenstrahlungsfeldern

Es wurden zwei allgemein anwendbare Verfahren entwickelt für eine verbesserte Bestimmung von Fluenzspektren von Referenz-Photonenstrahlungsfeldern. (Th. Schneider, FB 6.2, thorsten.schneider@ptb.de)

Sekundärstandard-Ionisationskammer für die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ für Photonenstrahlung von 12 keV bis 6,7 MeV

Für die Photonendosimetrie wurde ein Sekundärnormal für die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ weiterentwickelt. Durch die Optimierung steht nun erstmalig eine Sekundärstandard-Ionisationskammer für den Photonenenergiebereich von 12 keV bis 6,7 MeV zur Verfügung. Die Weitergabe der Einheit $H^*(10)$ ist damit auch im niederenergetischen Bereich unterhalb von 25 keV, bei dem die Darstellung von $H^*(10)$ sehr schwierig ist, gesichert. (U. Ankerhold, FB 6.3, ulrike.ankerhold@ptb.de)

Bestimmung differentieller Wirkungsquerschnitte für die Neutronenstreuung an Wolfram im Energiebereich 7 MeV bis 14 MeV

Zur vollständigen Beschreibung der Neutronenemission nach Beschuss von Wolfram mit Neutronen wurden differentielle elastische und inelastische Wirkungsquerschnitte für Neutronenenergien zwischen 7 MeV und 14 MeV mit größtmöglicher Genauigkeit bestimmt. (D. Schmidt, FB 6.4, dankwart.schmidt@ptb.de)

Bestimmung der Wasser-Energiedosis in Neutronen- und Ionenfeldern mit Ionisationskammern und Wasserkalorimeter

Ein transportables und kompaktes Wasserkalorimeter wurde in Kliniken und Forschungsinstituten eingesetzt, die verschiedene Strahlenarten für die Krebstherapie verwenden: im kollimierten Neutronenstrahl (*Klinikum Essen*), in Protonenstrahlen (HMI in Berlin und *iTHEMBA LABS* in Südafrika) sowie im ^{12}C -Schwerionen-Therapiestrahle (GSI in Darmstadt). Die Wasser-Energiedosis wurde mit Unsicherheiten von weniger als 1,8 % bestimmt und bestätigt die Messungen mit Standard-Ionisationskammern. (U. Giesen, FB 6.4, ulrich.giesen@ptb.de)

Beimischung von Neutronen aus der Reaktion $^{13}\text{C}(p, n)^{13}\text{N}$ bei der Erzeugung hochenergetischer Photonen durch inelastische Streuung $^{12}\text{C}(p, p'\gamma)^{12}\text{C}$

Im Rahmen der systematischen Untersuchung der hochenergetischen Photonenfelder im Energiebereich von 4 MeV bis 7 MeV wurde die Beimischung von Neutronen aus der Reaktion $^{13}\text{C}(p, n)^{13}\text{N}$ in dem 4,4-MeV-Photonenfeld aus der Reaktion $^{12}\text{C}(p, p'\gamma)^{12}\text{C}$ untersucht. Der Anteil der Neutronen an der Äquivalentdosis beträgt 60 % des Anteils der Photonen. Bei Kalibrierungen von neutronenempfindlichen Messsystemen muss dieser Anteil spezifiziert werden. (S. Röttger, FB 6.4, stefan.roettger@ptb.de)

Radiale Ionisationsverteilung schwerer Ionen in Materie: Experimentelle Ergebnisse mit OPAC und Vergleich mit Simulationsrechnungen

Im Rahmen einer Dissertation wurden Messungen der räumlichen Ionisationsverteilung von schweren Ionen mit gleichem Energieverlust, aber unterschiedlicher Ladung durchgeführt und mit Rechnungen verglichen. (V. Dangendorf, FB 6.5, volker.dangendorf@ptb.de)

Modernisierung der Datenerfassung für das Spektrometer NEMUS

Für das Neutronenspektrometer NEMUS wurde ein Teil des Datenaufnahmesystems erneuert. Die alten ISA-Port-Vielkanal-Analysator-Einschubkarten wurden durch neue, eigenständige Systeme ersetzt, deren Anbindung an den Mess-PC über eine Internetverbindung erfolgt. (B. Wiegel, FB 6.5, burkhard.wiegel@ptb.de)

Elektronen-W-Werte in Triethylamin deutlich kleiner als in Wasser

Zur Charakterisierung der Eigenschaften der Teilchensporkammer OPAC wurde der Elektronen-W-Wert in Triethylamin (TEA) in Abhängigkeit von der Elektronenenergie zum ersten Mal gemessen. Dabei ergab sich, dass der W-Wert für 3-keV-Elektronen in TEA um 7,7 % kleiner ist als in flüssigem Wasser und um 25,5 % kleiner als in Wasserdampf. Die Ionisationsausbeute ist daher in TEA deutlich größer als in Wasser. (B. Großwendt, FB 6.6, bernd.grosswendt@ptb.de)

Ionisationscluster-Erzeugung in nanometrischen Gastargets auch für Elektronen auf Wasser skalierbar

Durch Simulation der Ionisationscluster-Erzeugung in nanometrischen Volumina konnte auch für Elektronen gezeigt werden, dass die Häufigkeit der Clustergröße in Gasen bei geeigneter Wahl des Gasdrucks und des Targetdurchmessers der Clusterverteilung in einem nanometrischen Wassertarget äquivalent ist. (B. Großwendt, FB 6.6, bernd.grosswendt@ptb.de)

Differentielle Elektronen-Wirkungsquerschnitte für Triethylamin zum ersten Mal gemessen

Mit Hilfe einer neuentwickelten Molekularstrahl-Messmethode wurden die differentiellen elastischen und doppelt-differentiellen unelastischen Elektronen-Wirkungsquerschnitte von Triethylamin zum ersten Mal gemessen. Diese Daten bilden die Basis für ein Monte-Carlo-Simulationsmodell, mit dem die mit der Teilchensporkammer OPAC gemessenen Spurstrukturen analysiert werden können. (W. Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

Messung der Luftkermaleistung mit Freiluft- oder Hohlraum-Ionisationskammern unterscheidet sich für 400-kV-Röntgenstrahlung um 1,1 %

Zur Verifizierung unterschiedlicher Messmethoden für die Luftkerma wurde mit Hilfe einer Freiluft-Ionisationskammer und einer Hohlraum-Ionisationskammer die Luftkermaleistung für hart gefilterte 400-kV-Röntgenstrahlung unter gleichen Bestrahlungsbedingungen gemessen. Die mit der Hohlraum-Ionisationskammer gemessene Luftkermaleistung war dabei signifikant um 1,1 % größer als die mit der Freiluft-Ionisations-

kammer gemessene. Die wahrscheinlichste Ursache für diese Diskrepanz ist ein zu großer Wert für das mittleren Massen-Bremsvermögensverhältnis von Grafit zu Luft, der traditionell in der Dosimetrie verwendet wird. (L. Büermann, FB 6.6, ludwig.bueermann@ptb.de)

Deutlich verbessertes Detektormodell durch Experimente am BESSY II

Durch Messung der Pulshöhenspektren eines HPGE-Detektors für monoenergetische Photonenstrahlung am *BESSY II* in Verbindung mit Monte-Carlo-Rechnungen unter Verwendung von EGS-NRC wurde die Spektrometrie von Röntgenstrahlungsfeldern auf eine neue Grundlage gestellt. Das durch die Experimente am *BESSY II* deutlich verbesserte Detektormodell und die neue Responsematrix des Detektors bilden die zukünftige Basis zur Charakterisierung aller im Fachbereich realisierten Röntgenstrahlungsfelder. (G. Hilgers, FB 6.6, gerhard.hilgers@ptb.de)

Monte-Carlo-Simulationen ermöglichen Machbarkeitsstudie für das Avogadro-Projekt

Eine Voraussetzung für den erfolgreichen Abschluss des Avogadro-Projekts ist die Kenntnis der Isotopenzusammensetzung hochangereicherter Si-28-Proben. Thema einer Machbarkeitsstudie hierzu ist die Untersuchung, ob die Messung der Isotopenzusammensetzung unter Verwendung der Prompt- γ -Methode mit genügender Genauigkeit durchführbar ist. Um diese Untersuchung zu ermöglichen, wurde ein Monte-Carlo-Modell entwickelt, mit dem die Eigenschaften von Detektoren zur Messung der bei der Prompt- γ -Methode emittierten Photonen analysiert werden können. (E. Gargioni, FB 6.6, elisabetta.gargioni@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Forschungsprojekt EVIDOS erfolgreich abgeschlossen

Das EU-Projekt EVIDOS (Charakterisierung der Neutronenstrahlung an Arbeitsplätzen in der Kernindustrie, Bestimmung und Analyse der Anzeigen von Neutronendosimetern) wurde erfolgreich abgeschlossen. (M. Luszik-Bhadra, FB 6.5, marlies.luszik-bhadra@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Herstellung und Untersuchung definierter Thoron-Zerfallsprodukt-Referenzfelder zur Kalibrierung von Thoron-Zerfallsprodukt-Messgeräten

In der PTB wird in einem Forschungsvorhaben, das bis Ende 2006 vom *Bundesamt für Strahlenschutz* mit insgesamt 305 000,- EUR gefördert wird, ein Referenzfeld für Thoron-Zerfallsprodukte aufgebaut. (D. Arnold, FB 6.1, dirk.arnold@ptb.de; R. Tuckermann, FB 6.1, rudolf.tuckermann@ptb.de)

Neubau der Elektronenbeschleuniger-Anlage geht voran

Auf dem Gelände der PTB Braunschweig wird ein neues Gebäude zur Aufnahme der Elektronenbeschleuniger-Anlage errichtet. Es soll den Namen „Glocker-Bau“ tragen. (K. Derikum, FB 6.2, klaus.derikum@ptb.de)

Messung der Feldstörungskorrektionsfaktoren p_{Co} für Flachkammern

Für eine große Anzahl von Flachkammern der Typen Roos, Markus und Advanced Markus wurden die Feldstörungskorrektionsfaktoren p_{Co} bestimmt. Als Ergebnis dieser Untersuchungen werden in der neuen Ausgabe der Norm DIN 6800-2 bauartspezifische p_{Co} -Werte für diese Flachkammertypen angegeben. (R.-P. Kapsch, FB 6.2, ralf-peter.kapsch@ptb.de)

Optimierung der Referenzfelder für hochenergetische Photonen- und Elektronenstrahlung

Die Stabilität der Dosisleistung und der Strahlungsqualität in den hochenergetischen Photonen- und Elektronen-Referenzstrahlungsfeldern am Linearbeschleuniger der PTB konnte durch verschiedene Modifikationen des Beschleunigers deutlich verbessert werden. (R.-P. Kapsch, FB 6.2, ralf-peter.kapsch@ptb.de)

Kalibrierung von Schacht-Ionisationskammern für ^{192}Ir - und ^{60}Co -Brachytherapiequellen in Einheiten der Kenndosisleistung

Die PTB bietet seit Jahresbeginn die Kalibrierung von Schacht-Ionisationskammern sowie von Therapiekammern im Krieger-Phantom zur Anzeige der Kenndosisleistung, bzw. der reference air kerma rate, an. (H.-J. Selbach, FB 6.2, hans-joachim.selbach@ptb.de)

Bestimmung der 3-dimensionalen Verteilung der Wasser-Energiedosisleistung im Nahfeld von ^{192}Ir - und ^{60}Co - Brachytherapiequellen

Mit Hilfe einer in der PTB entwickelten wasserdichten Pinpoint-Ionisationskammer wurde erstmals eine vollständige 3-D-Verteilung der Wasser-Energiedosisleistung im Nahbereich von ^{192}Ir - und ^{60}Co - Brachytherapiequellen direkt im Wasserphantom gemessen. (H.-J. Selbach, FB 6.2, hans-joachim.selbach@ptb.de)

Ein transportables Wasserkalorimeter für hochenergetische Strahlungsfelder

Ein Wasserkalorimeter erlaubt die definitionsgemäße Messung der Wasser-Energiedosis. Aufgrund seiner kompakten Bauweise (äußere Maße ca. $(65 \times 60 \times 65) \text{ cm}^3$ [L×B×H]) ist das neu gebaute Kalorimeter auch als Transfer-Kalorimeter für therapeutische Strahlungsfelder geeignet und kann innerhalb von ca. 18 h vor Ort in Betrieb genommen werden. In der PTB wird dieses Wasserkalorimeter zur Bestimmung der energieabhängigen Korrekturfaktoren k_Q für Ionisationskammern und Alanin-Sonden bei 8-MV- und 16-MV-Photonenstrahlung eingesetzt. (A. Krauss, FB 6.2, achim.krauss@ptb.de)

Verringerung der Wiederholstandardabweichung durch neue Positioniervorrichtung

Die Sekundärnormal-Messeinrichtung für die Wasser-Energiedosis in Strahlungsfeldern hoher Energie auf der Basis von Alanin/ESR konnte durch eine neue Positioniervorrichtung für die Sonden verbessert werden. Die relative Wiederholstandardabweichung bei 5 Gy beträgt nun 0,4 %, bei 25 Gy werden 0,2 % erreicht. (M. Anton, FB 6.2, mathias.anton@ptb.de)

Vorläufige Dosisabschätzung der EURADOS-Arbeitsgruppe *Dosimetrie des fliegenden Personals*

Durch eine Sonneneruption am 20. Januar wurde die Erde von so vielen hochenergetischen Teilchen getroffen, dass die Strahlenexposition in Flughöhen kurzzeitig zunahm. Die zusätzliche Strahlenbelastung in Reiseflughöhen wurde von der PTB und anderen europäischen Partnern auf weniger als 0,2 mSv abgeschätzt. Dies entspricht etwa 1 % des für beruflich strahlenexponierte Personen zugelassenen Jahresgrenzwerts. (F. Wissmann, FB 6.3, frank.wissmann@ptb.de)

Berechnung der Dosisleistung in Flughöhen mit FDOScalc

Zur Messung der Strahlenexposition in Flughöhen durch kosmische Strahlung hat die PTB ein Messsystem in einem handlichen Koffer entwickelt. Es liefert in den sehr komplexen Strahlungsfeldern der natürlichen Höhenstrahlung zuverlässige Messungen über die vorhandene Umgebungs-Äquivalentdosis. Der Flugkoffer flog mehrere Monate an Bord eines Airbus mit und es entstand ein Berechnungsprogramm zur Abschätzung der Ortsdosisleistung in Flughöhen. Die Ergebnisse sind über das Internet verfügbar. (F. Wissmann, FB 6.3, frank.wissmann@ptb.de)

Beeinflussung der Ergebnisse der Biologischen Dosimetrie durch Zellzyklusverzögerung bei höheren Dosen von Röntgen- und Neutronenstrahlung

Die Bestimmung von Chromosomenaberrationen ist ein empfindliches biologisches Verfahren zur Abschätzung der Dosis einer ionisierenden Strahlung, die auf ein Individuum eingewirkt hat. Für die systematische Untersuchung bestimmter Einflussfaktoren auf die Validität und Zuverlässigkeit der Dosisabschätzung einer Strahlenexposition wurden Blutproben u. a. in dem intensiven, kollimierten Neutronenfeld an der Ionenbeschleunigeranlage der PTB bestrahlt. (U. Giesen, FB 6.4, ulrich.giesen@ptb.de)

Mikro-Ionenstrahl: Neues Softwaremodul zur Quantifizierung von Proteinfärbungen

Die Auswerteverfahren radiobiologischer Experimente am Mikrostrahl wurden erweitert und verfeinert, so dass jetzt die Strahlungswirkung für jede einzelne Zelle sichtbar gemacht und quantifiziert werden kann. Das Modul dient im Rahmen eines EU-Projekts der Untersuchung des so genannten Bystander-Effekts, der das Auftreten einer Strahlungswirkung in unbestrahlten Zellen bezeichnet, wenn benachbarte Zellen bestrahlt werden.

(K.-D. Greif, FB 6.4, klaus-dieter.greif@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

VERMI: Eine Initiative zum Erhalt der Qualität in der Radionuklidmetrologie

Das *Virtual European Radionuclide Metrology Institute* (VERMI) ist eine Initiative europäischer Metrologie-Institute mit dem Ziel, die durch Personalabbau gefährdete hohe Quali-

tät in der Radionuklidmetrologie aufrecht zu erhalten. Die PTB, die VERMI mit ins Leben gerufen hat, beteiligt sich aktiv an der Gestaltung von Workshops, die als intensive Qualifizierungsmaßnahmen auch eigenen Nachwuchskräften zu Gute kommen. Darüber hinaus haben sich durch VERMI wichtige Kooperationen ergeben, mit denen anspruchsvolle wissenschaftliche Projekte durchgeführt werden.

(H. Janßen, FB 6.1, herbert.janssen@ptb.de)

Internationale Vergleichsmessungen im Bereich der Aktivitätseinheit

Die Arbeitsgruppe 6.11 hat im Berichtszeitraum an einem Vergleich zur Aktivitätsbestimmung an einer ^{32}P -Lösung teilgenommen und Aktivitätsnormale der Nuklide ^{57}Co , ^{109}Cd , ^{111}In und ^{201}Tl an das internationale Referenzsystem SIR beim BIPM gesandt. Darüber hinaus wurden auch ein Aktivitätsnormal des radioaktiven Edelgases ^{222}Rn sowie eine Lösung des kurzlebigen Radionuklids ^{18}F zu Vergleichszwecken eingesandt. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

Entwicklung zweier neuer Umweltradioaktivitäts-Referenzmaterialien

In den letzten Jahren hat sich die PTB an zwei großen Vergleichsmessungen auf dem Gebiet der Umweltradioaktivität beteiligt, deren Ergebnisse jetzt zur Festlegung von Referenzwerten für die Aktivität alpha-, beta- und gammastrahlender Radionuklide in den beiden Materialien (Fischfleisch und Seetang) führte. Die Referenzmaterialien sind bei der IAEA beziehungsweise dem NIST erhältlich. (D. Arnold, FB 6.1, dirk.arnold@ptb.de)

EUROMET-Vergleichsmessung an Kalibrier- einrichtungen für die Radon-Aktivitätskonzentration erfolgreich abgeschlossen

Im Rahmen der Qualitätssicherung in der Radonmesstechnik wurde ein internationaler Ringvergleich als Euromet-Projekt von der PTB federführend durchgeführt. Unter der Projektnummer Euromet 657 bzw. „BIPM supplementary comparison EUROMET.RI(II)-S1 Comparison of calibration facilities for the radon activity concentration“ ist dieses Projekt sowohl bei EUROMET als auch beim BIPM mit insgesamt zwölf Teilnehmern geführt und ist über die zugehörigen Webseiten einsehbar: www.bipm.org/metrologia/techsupp.jsp (Metrologia, 2005, 42, Tech. Suppl. 06003)

(A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de)

Erste internationale Vergleichsmessungen in der Strahlenschutzdosimetrie

In der Strahlenschutzdosimetrie werden erstmalig zwei internationale Vergleichsmessungen durchgeführt. Beide EUROMET-Vergleiche werden von der PTB organisiert. In der Photonendosimetrie wird die Darstellung der Tiefen-Personendosis $H_p(10)$ verglichen, bei dem Vergleich mit Betastrahlung die der Oberflächen-Personendosis $H_p(0,07)$. Für beide Vergleiche wurden in der PTB neue Messgeräte entwickelt, die bislang eine hervorragende Stabilität aufweisen. Die Vergleiche liegen im Zeitrahmen und verlaufen problemlos. (U. Ankerhold, FB 6.3, ulrike.ankerhold@ptb.de; K. Helmstädter, FB 6.3, klaus.helmstaedter@ptb.de)

Weitere Informationen

Mobiles Messsystem zur Dosis-Messung mit Ionisationskammern in gepulsten Strahlungsfeldern

Zur Bestimmung der Dosis, die bei Untersuchungen von Personen und Gütern mit Röntgen-Scannern appliziert wird, wurde im Fachbereich 6.3 ein transportables Messsystem entwickelt. Mit diesem System können Ladungsimpulse aus Ionisationskammern mit einer Auflösung von 12 fC ($12 \cdot 10^{-15}$ C) und einer maximalen Messrate von 100 Hz gemessen werden. Das Messsystem verfügt über zusätzliche Sensoren, um die Messwerte mit allen notwendigen Korrekturen versehen zu können.

(G. Buchholz, FB 6.3, gerd.buchholz@ptb.de)

Temperatur und Synchrotron- strahlung

Berichte der Abteilungen

k_{BT}



Abteilung



Temperatur Synchrotron

Institut Berlin

2005 wurde das „annus mirabilis“ von Albert Einstein gefeiert, der hundert Jahre zuvor mit vier herausragenden Arbeiten das physikalische Weltbild revolutioniert hatte. Die *Deutsche Physikalische Gesellschaft* hielt aus diesem Anlass ihre sonst an verschiedenen Orten stattfindenden Frühjahrstagungen Anfang März als eine gemeinsame Jahrestagung unter dem Motto „Physik seit Einstein“ in Berlin ab. Die PTB war durch ihr *Berliner Institut* in vielfältiger Weise beteiligt.

Der damalige Präsident der *Physikalisch-Technischen Reichsanstalt* Emil Warburg (1905 bis 1922) spielte bei der Berufung Einsteins in die *Preußische Akademie der Wissenschaften*, die der Übersiedlung Einsteins nach Berlin im Frühjahr 1914 vorausging, eine maßgebliche Rolle. Während Einstein gleichzeitig seine Allgemeine Relativitätstheorie vollendete, begann er unmittelbar nach seiner Ankunft in Berlin, als Gastwissenschaftler an der PTR zu experimentieren. Zusammen mit Johannes Wandaer de Haas führte er in der PTR sein einziges veröffentlichtes Experiment durch, die Bestimmung des gyromagnetischen Verhältnisses von Elektronen in Festkörpern. Aus Anlass der 90-jährigen Wiederkehr der Entdeckung des später so benannten Einstein-de-Haas-Effekts wurde eine Ausstellung (s. a. Nachrichten des Jahres) zur Bedeutung des Elektrons für die Metrologie aufgebaut, die sich um einen originalgetreuen Nachbau der Einsteinschen Apparatur gruppiert (Bild 1) und anlässlich der feierlichen Verleihung der diesjährigen Preise der *Deutschen Physikalischen Gesellschaft* im Hermann-von-Helmholtz-Bau eröffnet wurde (Bild 2).

Titelbild

Die Abteilung 7 beteiligt sich an den internationalen Bemühungen um eine neue Definition der Temperatureinheit Kelvin durch Rückführung auf die Boltzmann-Konstante mit ihrem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer.

Auch der Beitrag der PTB zur Berliner Langen Nacht der Wissenschaften im Juni war dem Einsteinjahr gewidmet. Dr. Jürgen Neffe las vor vollem Haus aus seinem zu Anfang des Jahres erschienenen Band „Einstein – eine Biographie“ (Bild 3). Für zwei weitere kulturelle Ereignisse, die vom Einstein-Forum in Potsdam mitgestaltet wurden, lieferte das *Institut Berlin* die Kulisse. Zum einen wurden in der „E-Galerie“ die vielen Wirkungsstätten Einsteins im Stadtgebiet mit übermannshohen roten E-Buchstaben gekennzeichnet und einem den Aufstellungsort erläuternden Text versehen. Bild 4 zeigt das E in der Marchstraße. Zum anderen realisierten im Rahmen des Projekts „Einstein Spaces“ neun Künstler Arbeiten an zentralen Lebensstationen Einsteins. Im derzeit in der Umgestaltung befindlichen E2-Gebäude konnte man die vielfarbigem Kreise der Videoinstallation „Donut“ der Künstlerin Ann Veronica Janssens bewundern (Bild 5).

Neben den Aktivitäten zum Einstein-Jahr bildeten die Einweihung des neuen Rechenzentrums und das aus diesem Anlass in Berlin abgehaltene Helmholtz-Symposium mit dem Thema „Mathematics for Metrology“ mit einer Reihe international renommierter Redner einen weiteren Höhepunkt. Im neuen Rechenzentrumsgebäude ist der neu eingerichtete Fachbereich 8.4 *Mathematische Analyse und Datenmodellierung* untergebracht, so dass mit „Konrad-Zuse-Bau“ ein der Zweckbestimmung des Gebäudes in idealer Weise entsprechender Name gefunden werden konnte. Die Namensgebung wurde im Anschluss an das Symposium in Anwesenheit des ältesten Sohnes von Konrad Zuse, Dr. Horst Zuse (Bild 6), der Bürgermeisterin des Berliner Bezirks Charlottenburg-Wilmersdorf, Frau Thiemen, der Teilnehmer des Helmholtz-Symposiums und der am Bau beteiligten Fachleute gefeiert.

Das *Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung*, das für die Betreuung der Baumaßnah-

men des Instituts zuständig ist, suchte sich in diesem Jahr den Hermann-von-Helmholtz-Bau aus, um in Anwesenheit von Staatssekretär Andres vom BMWA sein Jahrbuch „Bau und Raum“ der Öffentlichkeit vorzustellen (Bild 7). Als weitere Besucher ließen sich das Direktorium der Dortmunder *Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*, die Mitglieder des regionalen Netzwerks *OptecBB* und der *Förderverein der Technologie-Stiftung Berlin* durch die jeweils interessierenden Bereiche des Instituts führen. Die Kontinuität der internationalen Einbindung des Instituts kam durch die inzwischen regelmäßigen Besuche von Wissenschafts- und Regierungsdelegationen aus China, Korea, Vietnam, der Karibik und Westafrika zum Ausdruck.

Obschon verglichen mit der benachbarten Technischen Universität ein kleiner, aber doch lebendiger und geschätzter Teil der Berlin-Brandenburger Wissenschaftslandschaft, ist das *Institut Berlin* mittlerweile sichtbar zu „Repräsentanz und Schaufenster der PTB für Politik und Öffentlichkeit in der Bundeshauptstadt“ geworden, wie es in der als Sonderdruck der PTB-Mitteilungen neu erschienenen Institutsbroschüre heißt.

Neubestimmung der Boltzmann-Konstanten

Das *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM) hat kürzlich den nationalen Metrologie-Instituten empfohlen, die notwendigen Messungen durchzuführen, um auf der 24. Generalkonferenz der Meterkonvention im Jahr 2011 neue Definitionen der SI-Einheiten Kilogramm, Ampere, Kelvin und Mol in Kraft setzen zu können. Bei diesen Neudefinitionen sollen die genannten Einheiten nicht mehr auf Prototypen oder Stoffeigenschaften, sondern auf Naturkonstanten abgestützt werden. Im Falle des Kelvin wird die Verknüpfung der Temperatur mit der thermischen Energie eines physikalischen Systems über die Boltzmann-Konstante hergestellt, deren zahlenmäßige Festlegung das Kelvin dann ohne Bevorzugung eines bestimmten Materials oder Messverfahrens definiert. Als physikalische Systeme können z. B. das angenähert ideale Gas, die Ladungsträger in einem elektrischen Leiter oder die Lichtquanten in einem Schwarzen Körper Verwendung finden. Die zugehörigen Messverfahren wären verschiedene Arten von Gasthermometrie,

Rausch- und Strahlungsthermometrie. Die PTB hat langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie und in diesem Jahr den erforderlichen Meilenstein erreicht (Bild 8), der die Investitionen rechtfertigt, die für einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des derzeitigen Wertes der Boltzmann-Konstante und der Messunsicherheit um rund eine Größenordnung notwendig sind. Dazu wurde ein gemeinsames Projekt mit den Abteilungen 2, 3 und 5 begonnen, das die Kapazitäts- und Druckmessung und die dimensionelle Messtechnik an die technischen Grenzen treiben soll.



Bild 1: Von Einstein skizzierter Aufbau für den Einstein-de-Haas-Versuch aus der Originalarbeit



Bild 2: Abend der Preisträger der Deutschen Physikalischen Gesellschaft: DPG-Präsident Prof. Dr. Knut Urban verleiht zum Abschluss die Schülerpreise



Bild 3: Autorenlesung von Dr. Jürgen Neffe während der Langen Nacht der Wissenschaften



Bild 4: Installation der E-Galerie vor der PTB an der Marchstraße

Anfang des Jahres war die PTB in Berlin Gastgeber der internationalen Experten für Thermometrie, die während eines von CCT und EUROMET unterstützten PTB-Seminars die Methoden für eine neue Bestimmung der Boltzmann-Konstanten diskutierten. Dr. Terry Quinn, der emeritierte Direktor des BIPM, stimmte die Teilnehmer mit seinem Vortrag „Temperature – from Basics to Fundamentals“ auf die grundlegende Bedeutung des Seminars ein (Bild 9). Als Ergebnis entstand ein CCT-Dokument, das die Basis bezüglich des Kelvin für die zitierte CIPM-Empfehlung zur Neudefinition von vier Basiseinheiten bis 2011 lieferte.

Metrologie mit Synchrotronstrahlung

Synchrotronstrahlung aus den Ablenkmgneten eines Elektronenspeicherrings ist bei genauer Kenntnis der Elektronenstrahlparameter nach Schwinger berechenbar. Auf diese Weise wird der Berliner Elektronenspeicherring *BESSY II* zu einem primären Strahlungsnormals bis zu Photonenenergien von 10 keV. Um auch im Bereich harter Röntgenstrahlung bis 100 keV ein entsprechendes Primärnormal zur Verfügung zu haben, wurden erste viel versprechende Messungen zur Prüfung der Eignung des 7-T-Wellenlängenschiebers durchgeführt.

Die Untersuchung von Cadmium-Tellurid-Detektoren ergab eine hervorragende Übereinstimmung von gemessenen und mit Hilfe von Monte-Carlo-Methoden simulierten Spektren der Wechselwirkung von harter Röntgenstrahlung und Detektormaterie (Bild 10). Für den Einsatz des Detektors zum Nachweis intensiver Röntgenstrahlung wurde die Streuung an einer Kaptonfolie als quantitativem Abschwächer untersucht.

Im Bereich weicher Röntgenstrahlung wurde ortsaufgelöst der Reflexionsgrad der Mo/Si-Multilayerspiegel bestimmt, aus denen die Optik des Alpha-Demo-Tools für die künftige EUV-Lithographie zusammengesetzt ist. Die PTB unterstützt damit in großem Umfang die europäische Industrie bei der Entwicklung der Lithographieverfahren für die Halbleiter-Mikrochips der nächsten drei Generationen. Außerdem wurde die Eignung von scatterometrischen Verfahren zur Charakterisierung von EUV-Masken untersucht und zusammen mit den Abteilungen 4 und 5 evaluiert.

Durch Röntgenreflektometrie bei Photonenenergien von etwa 500 eV wurde die Dicke der Oxidschicht auf der Oberfläche einer Siliciumkugel zu 6,71 nm ermittelt. Mit Hilfe derartiger Präzisionskugeln, deren Elementbestandteile und Gitterfehler genau bekannt sein müssen, soll im Rahmen des weltweiten Avogadro-Projekts ein Verfahren zur Neudefinition des Kilogramms entwickelt und zur verbesserten Bestimmung der Avogadro-Konstanten eingesetzt werden.

Der Baufortschritt des von der PTB 2004 in Adlershof begonnenen Willy-Wien-Laboratoriums, das mit seiner Metrology Light Source ab 2008 für den EUV-Bereich optimierte Synchrotronstrahlung metrologischer Qualität liefern soll, liegt im Plan. Das Gebäude wird in Kürze fertig gestellt sein (Bild 11). Mitarbeiter der *BESSY GmbH* sind intensiv mit Planung, Design und Beschaffung der Komponenten für den Speicherring beschäftigt.

Radiometrie im UV und IR

Da die PTB in Berlin mit Hohlraumstrahler und Speicherring zwei grundsätzlich verschiedene berechenbare Strahlungsquellen zur Verfügung hat, werden diese von Zeit zu Zeit im überlappenden Spektralbereich des UV verglichen. Als Transfernormale werden zwischen 120 nm und 400 nm Deuteriumlampen und Wolframbandlampen verwendet. Die Übereinstimmung lag innerhalb der Unsicherheit der *BESSY-II*-Kalibrierung und war mit 1 % bis 2 % daher perfekt.

Mit einem neuen Kryoradiometermessplatz (Bild 12), der mit unterschiedlichen Strahlungsquellen bestückt werden kann, konnte die Unsicherheit der Skala der spektralen Empfindlichkeit im UV und im IR um den Faktor 3 bis 5 auf 0,1 % bis 0,2 % reduziert werden. Als breitbandige bzw. abstimmbare Strahlungsquellen stehen im UV ein Argonplasma und im IR Wolfram-Halogenlampen und ein durchstimmbarer Diodenlaser zur Verfügung. Bild 13 zeigt die erreichte Unsicherheit im Vergleich zur Unsicherheit des „klassischen“ Laser-Kryoradiometers von 0,02 % im sichtbaren Spektralbereich.

Sowohl der radiometrische Skalenvergleich als auch die mit dem neuen Kryoradiometer erzielten Ergebnisse wurden auf der NEWRAD 2005 in Davos vorgestellt.



Bild 5: Videokunst „Donut“ von Ann Veronica Janssens im Rahmen der Aktion „Einstein Spaces“ im E2-Gebäude (Foto: Heinrich Hermes)



Bild 6: Einweihung des Konrad-Zuse-Baus: Dr. Horst Zuse erläutert die Collage über seinen Vater und dessen Werk



Bild 7: Vorstellung des Jahrbuchs „Bau und Raum“ durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung im Hermann-von-Helmholtz-Bau: BBR-Präsident Mausbach (Mitte links), Staatssekretär Andres vom BMWA (Mitte rechts)



Temperatur und Durchfluss

Neben den gemeinsamen Anstrengungen mit den anderen beteiligten Abteilungen der PTB zur Verbesserung der Apparaturen für die Präzisionsbestimmung der Boltzmann-Konstante wurden andere laufende Aktivitäten nicht vernachlässigt. Von der PTB koordinierte Untersuchungen des Einflusses der Deuteriumkonzentration auf die Temperatur des Wasserstoff-Tripelpunktes führten zu einer präziseren Definition dieses Fixpunktes durch das *Beratende Komitee für Thermometrie (CCT)* der Meterkonvention durch Festlegung der Isotopenzusammensetzung.

Auch bei den Erstarrungspunkten von Metallen beeinflussen Verunreinigungen die Fixpunkttemperatur. Zum einen hat das CCT hier Methoden zur Abschätzung dieses Einflusses empfohlen, die die PTB unter Verwendung von kristallographischen Daten vorgeschlagen hatte. Zum anderen wurde ein umfangreiches Forschungsprogramm gestartet, in dem die Verunreinigungen in Zusammenarbeit mit der BAM systematisch analysiert und damit ihr Einfluss quantitativ untersucht werden kann. Parallel dazu wird in einem von der DFG geförderten Vorhaben in Kooperation mit Abteilung 3 und der *Technischen Universität Ilmenau* der Einfluss des Materials des Zellenbehälters untersucht.

Bei den neuen Fixpunkten aus Metall-Kohlenstoff-Eutektika für Temperaturen oberhalb von 1500 K wurde das mehrjährige EU-geförderte HIMERT-Projekt mit einem internationalen Workshop abgeschlossen. Da die Kooperation unter Einschluss der Kollegen vom NMIJ in Japan und dem VNIIOFI in Moskau sich als außergewöhnlicher wissenschaftlicher Erfolg erwies (Bild 14), wird

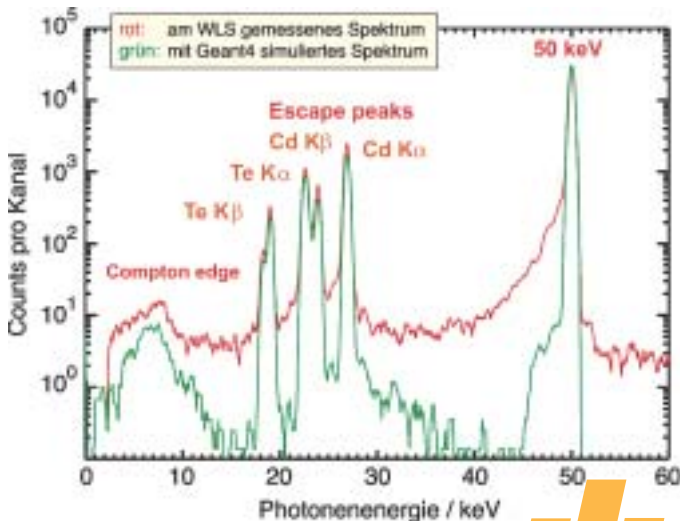


Bild 8: Temperaturmesskopf des Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometers in geöffnetem Zustand (oben)
 Bild 9: Dr. Quinn bei seinem Grundsatzreferat im Hermann-von-Helmholtz-Bau (Mitte)
 Bild 10: Ansprechfunktion eines CdTe-Detektors für monochromatische 50-keV-Strahlung verglichen mit Monte-Carlo-Simulation (unten)

angestrebt, im Rahmen des geplanten europäischen Forschungsverbundes iMERA eine Fortsetzung mit dem Ziel zu erreichen, diese neue Art von Fixpunkten als Stützstellen einer erweiterten Temperaturskala zu etablieren und schließlich kommerziell verfügbar zu machen.

Die Überprüfung der geforderten Spezifikationen der großen Wärmeenergiemessanlage ist erfolgreich abgeschlossen. Im Durchflussbereich von $5 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ und im Temperaturbereich von $3 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $90 \text{ }^\circ\text{C}$ wurden zwei unterschiedliche Wägevorfahren, das konventionelle statische und das neue dynamische, verglichen. Die Übereinstimmung (Bild 15) der Ergebnisse lässt den Schluss zu, dass damit die geforderte relative Unsicherheit von $4 \cdot 10^{-4}$ für das durchfließende Volumen erreicht und durch zwei Verfahren unabhängig bestätigt wurde.

Tiefe und ultratiefe Temperaturen

Die über mehrere Jahre aufgebaute Mikrokkelvinanlage MKA3 hat, nachdem als letztes die Kernentmagnetisierungsstufe angebaut und in Betrieb genommen wurde, als tiefste Temperatur $23 \text{ } \mu\text{K}$ erreicht. Dabei wurde der zeitliche Verlauf der Abkühlung auf Grundlage thermodynamischer Berechnung des Kernspinkühlprozesses und des Temperaturprofils im Pt-NMR-Thermometer optimiert (Bild 16). Neben der PTB will, wie beim Besuch eines Mitarbeiters der *Cryogenic Thermometry Group* klar wurde, nun auch das japanische NMIJ thermometrische Arbeiten im Milli- und Mikrokkelvinbereich aufnehmen und sich in den kommenden Jahren die apparative Ausstattung dazu aufbauen. Eine enge Kooperation wurde verabredet.

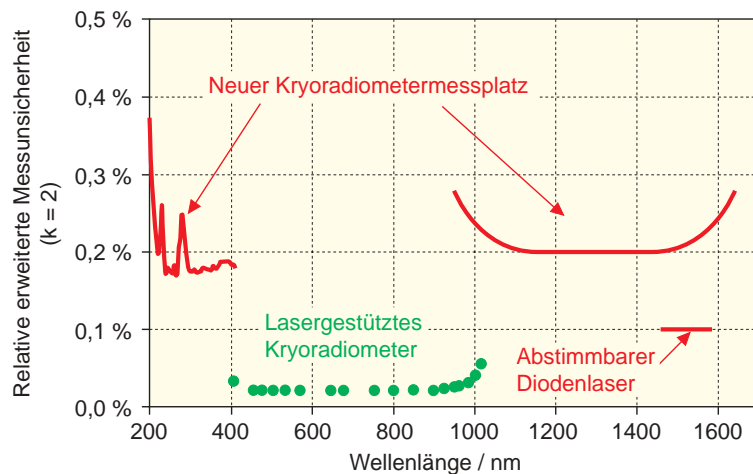
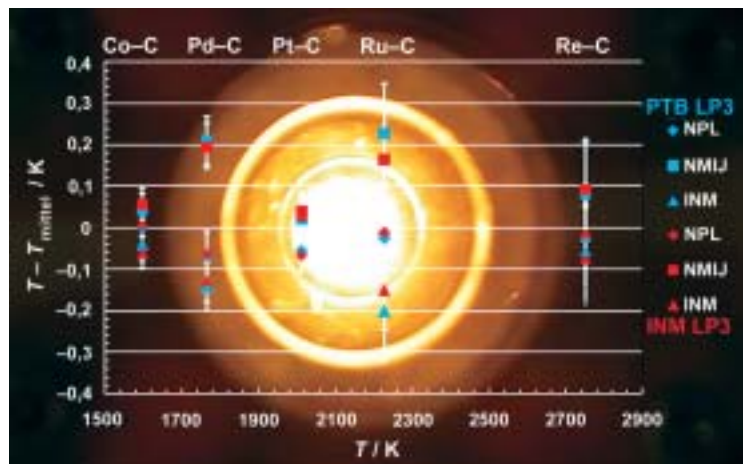


Bild 11: Willy-Wien-Laboratorium der PTB in Berlin-Adlershof kurz vor der Fertigstellung; im Vordergrund rechts das BESSY-II-Gebäude (oben)
 Bild 12: Kryoradiometermessplatz für die spektrale Empfindlichkeit im UV und IR (2. Bild von oben)
 Bild 13: Verbesserte Unsicherheit der spektralen Empfindlichkeit vom IR bis zum UV (2. Bild von unten)
 Bild 14: Streuung der Schmelztemperaturen von Zellen verschiedener Hersteller um den jeweiligen Mittelwert; Hintergrund: Strahlung aus einer Ru-C-Fixpunktzelle in der Nähe der Schmelztemperatur von etwa 2226 K (unten)



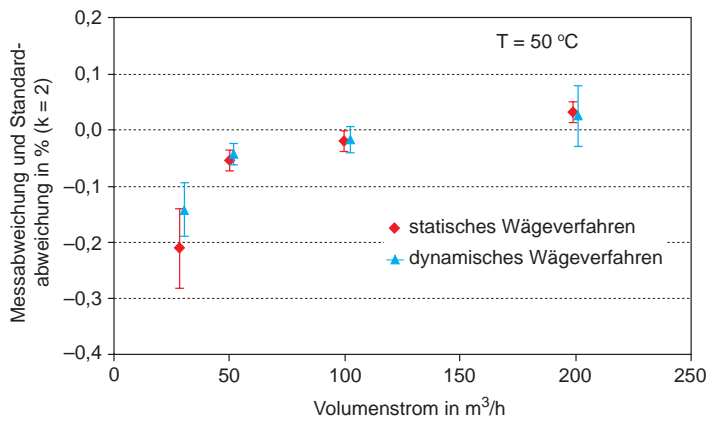


Bild 15: Vergleich von statischem und dynamischem Wägevverfahren zur Durchflussbestimmung bezogen auf einen magnetisch-induktiven Durchflusssensor als Transferstandard

In der Familie neuer rauscharmer und störungsresistenter SQUID-Sensoren wurden neben Einzelsensoren auch zweistufige Anordnungen und Mehrfacharrays hergestellt, um die Dynamik erheblich zu steigern. Die zugehörige schnelle Ausleselektronik, die zusammen mit einem Industriepartner entwickelt wurde, wurde für Mehrfach-SQUID-Verstärker erweitert.

Metrologie für die Weltraumforschung

Die Radiometrie der PTB unterstützt traditionell die weltraumgestützte Astronomie. In Kooperation mit dem *Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung* und dem *Rutherford Appleton Laboratory* wurde die Instrumentierung für die Sonnenforschung im Vakuum-UV-Spektralbereich an *BESSY II* charakterisiert. Die Instrumente sind für die Missionen *LYRA*, *SWAP* (ESA) und *MOSES* (NASA) vorgesehen. Außerdem wird für die ESA an *BESSY II* derzeit ein eigenes Strahlrohr errichtet.

Auch in der Temperaturmessung wurden Kooperationen für die Weltraumforschung vereinbart, die u. a. eine rückführbare Messung der absoluten Temperatur der Hitzeschilde bei Wiedereintritt von Raumfahrzeugen und deren räumliche Verteilung zum Ziel haben.

Vakuumphysik

Obwohl die Arbeitsgruppe *Vakuumphysik* überwiegend mit Kalibrierungen und der Rückführung der Normale anderer Staatsinstitute auf die eigenen Primärnormale befasst ist, gibt es interessante Forschungsergebnisse zu berichten. So gelang es, eine Monte-Carlo-Modellierung der Dichteverteilung in einem UHV-Rezipienten, die an der *Technischen Universität Warschau* durchgeführt worden war, innerhalb der Messunsicherheit von 0,05 % experimentell zu bestätigen. Bei der Partialdruckbestimmung wurde mit Laserabsorptionsspektroskopie in einer Herriott-Zelle erstmals CO_2 in N_2 mit einer Unsicherheit von 2 % nachgewiesen. Innerhalb dieser Grenze wurde Übereinstimmung mit gravimetrisch präparierten Gemischen der PTB und der BAM erreicht. Schließlich konnte durch Schwingungsdämpfung die Rausch- und damit Messgrenze von Gasreibungsvakuummetern um den Faktor 30 reduziert werden.

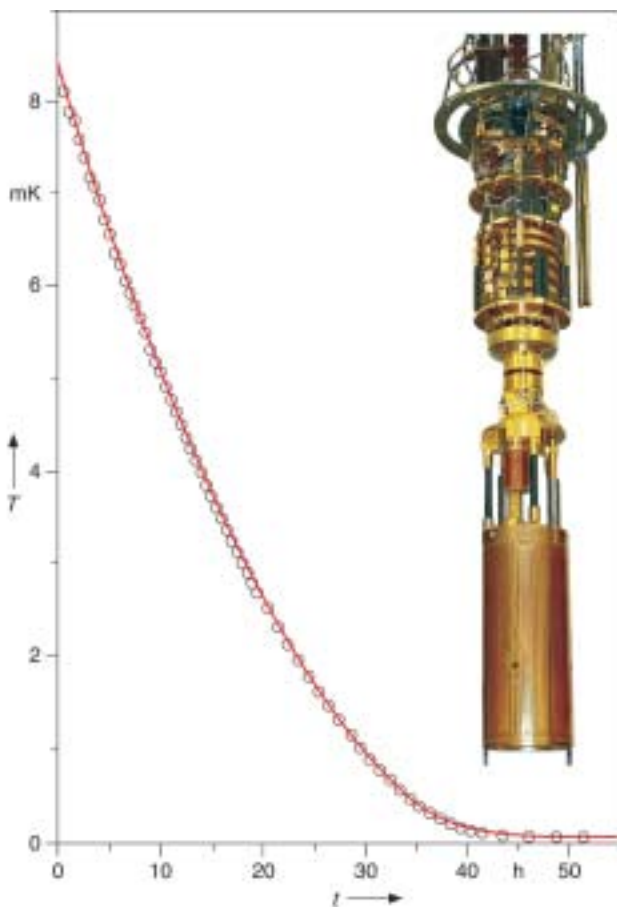


Bild 16: Kupfer-Kernentmagnetisierungsstufe mit gemessener Abkühlkurve und thermodynamischer Simulation des Abkühlprozesses

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(diese und weitere Nachrichten ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

Messungen im Vakuum-UV für die Sonnenforschung

Im PTB-Laboratorium am Elektronenspeicherring *BESSY II* wurde die Charakterisierung von Raumfahrtinstrumenten für die Sonnenbeobachtung im Vakuum-UV-Spektralbereich in Kooperation mit dem *Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung* und dem *Rutherford Appleton Laboratory* mit umfangreichen Messungen für die Missionen LYRA, SWAP (ESA) und MOSES (NASA) fortgesetzt. Außerdem demonstrierte eine Rekalibrierung der SUMER-Kalibrierquelle die hohe Langzeitstabilität und Verlässlichkeit von Transferstrahlernormalen auf der Basis von Hohlkathodenplasmen. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

Erste Experimente mit Femtosekunden-Laserstrahlung im Vakuum-UV

Am weltweit ersten Freie-Elektronen-Laser (FEL) für kurzwellige Vakuum-UV-Strahlung, der am 3. August 2005 am *Deutschen Elektronensynchrotron* (DESY) in Hamburg durch den Bundeskanzler offiziell in Betrieb genommen wurde, konnten im Rahmen einer Forschungsk Kooperation zwischen PTB, DESY und *Ioffe-Institut* (St. Petersburg) bereits Messungen zur FEL-Photonendiagnostik sowie erste erfolgreiche Experimente zur nichtlinearen Wechselwirkung von Femtosekunden-Laserstrahlung im Vakuum-UV mit Materie durchgeführt werden. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

Referenzprobenfreie Röntgenfluoreszenzanalyse für die Schichtdickenbestimmung von Nanometerschichten

Die auf atomare Fundamentalparameter gestützte Quantifizierung der referenzprobenfreien Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) von Schichten im Nanometerbereich wurde mithilfe der Röntgenreflektometrie experimentell validiert sowie für die Nutzung von L-Fluoreszenzlinien erweitert. Referenzprobenfreie RFA kann vorteilhaft eingesetzt werden bei sehr dünnen oder inhomogenen Schichten sowie bei Schichten, die mehrere Elemente beinhalten. (B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

Resonante Ramanstreuung von Röntgenstrahlung

Die Streuquerschnitte der resonanten Ramanstreuung an Silizium und Nickel wurden für monochromatische Röntgenstrahlung mit geringen Unsicherheiten absolut bestimmt. Damit ist in der referenzprobenfreien Röntgenfluoreszenzanalyse eine verbesserte Quantifizierung des spektralen Untergrunds möglich, der durch resonante Ramanstreuung an relevanten Matrix- oder Substratelementen hervorgerufen wird. (B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

Oxiddickenbestimmung auf einer Silizium-Kugel

Für das von der PTB mit internationaler Beteiligung durchgeführte Avogadro-Projekt zur Neudefinition der Masseneinheit ist u. a. die Dicke der Oxidschicht an der Oberfläche von Bedeutung. Mit Röntgenreflektometrie bei Photonenenergien in der Nähe der Sauerstoff-Absorptionskante war eine Bestimmung der Dicke auch auf der stark gekrümmten Kugeloberfläche möglich. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Metrologie im Wasserfenster

Für das *Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik* (IOF) wurden fokussierende Spiegel für den Wellenlängenbereich um 3 nm vermessen. Mit Reflexionsgraden von bis zu 15 % bei senkrechtem Einfall hat das IOF hier eine weltweit führende Stellung und ist zur Weiterentwicklung auf die Messtechnik der PTB angewiesen. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

7-T-Wellenlängenschieber als primäres Strahlernormal?

Erste Messungen zur Nutzung des supraleitenden 7-T-Wellenlängenschiebers im Elektronenspeicherring *BESSY II* als berechenbare Strahlungsquelle im Bereich der harten Röntgenstrahlung wurden durchgeführt. Insbesondere wurde die horizontale Intensitätsverteilung spektral aufgelöst untersucht. (R. Klein, FB 7.1, roman.klein@ptb.de)

Verbesserte Kalibrierung von Strahlungsempfängern

Mit einer neuen Messanlage, die ein Kryoradiometer als Primärnormal für Strahlungsleistungsmessungen und verschiedene Strahlungsquellen nutzt, können Strahlungsempfänger im UV und IR mit verringerten Standardunsicherheiten von 0,1 % bis 0,2 % kalibriert werden. Im UV wird dafür die intensive Strahlung eines Argon-Bogenplasmas eingesetzt. Im IR kann mit einem abstimmbaren Diodenlaser in einem begrenzten Spektralbereich um 1500 nm sogar eine Unsicherheit von 0,05 % erreicht werden. (L. Werner, FB 7.2, lutz.werner@ptb.de)

Messung elektrischer Feldstärken mit Zweiphotonenspektroskopie an atomarem Wasserstoff

In einer Niederdruckzelle, in der ein elektrisch geheizter Wolframdraht für Moleküldissoziation sorgt und gleichzeitig ein elektrisches Feld erzeugt, wurde der Zweiphotonenübergang $1s \rightarrow 3s/3d$ des Wasserstoffatoms dopplernfrei angeregt. Das Absorptionsspektrum beim Durchstimmen des Pulslasers wurde optogalvanisch und mithilfe der H₂-Fluoreszenz gemessen. Aufgrund des Stark-Effekts zeigt es verschiedene Linienkomponenten, aus deren Frequenzabstand elektrische Feldstärken bis hinab zu 50 V/cm bestimmt werden können. (A. Steiger, FB 7.2, andreas.steiger@ptb.de)

Partialdruckmessung mit Laserabsorptionsspektroskopie

Im Prinzip kann die Strahlungsabsorption in einer Spektrallinie einer bestimmten Molekülart für ein Primärverfahren zur Partialdruckmessung genutzt werden, weil sie proportional zur Dichte bzw. zum Partialdruck dieser Spezies ist. Dass auf diese Weise tatsächlich rückführbare Messungen mit geringen Unsicherheiten durchgeführt werden können, ist erstmals mit Absorptionmessungen von durchstimmbarer Diodenlaserstrahlung an einer Herriott-Vielfachreflexionszelle für CO₂ in N₂ demonstriert worden. Für die Partialdruckmessung wurde eine erweiterte relative Unsicherheit ($k = 2$) von 1,5 % (bei 1 % relativer Unsicherheit der Linienstärke) erreicht und durch Messungen an gravimetrisch präparierten Gasgemischen der PTB und der BAM bestätigt. (K. Jousten, FB 7.3, karl.jousten@ptb.de)

Experimentelle Bestätigung von Monte-Carlo-Simulationen der Dichteverteilung in einer UHV-Kammer

Dichteinhomogenitäten in Kalibrierkammern für Vakuummessgeräte führen zu ortsabhängigen Korrekturen des Kalibrierdrucks. Die geringen Inhomogenitäten (einige 10^{-3}) in Vakuumprimärnormalen können durch Monte-Carlo-Simulationen berechnet werden. Zum ersten Mal wurden solche durch Simulationen ermittelten Dichteunterschiede auch experimentell nachgewiesen und mit einer Standardunsicherheit von 0,05% bestätigt. (K. Jousten, FB 7.3, karl.jousten@ptb.de; T. Bock, FB 7.3, thomas.bock@ptb.de)

Reduzierung der Offsetschwankungen von Gasreibungsvakuummetern durch Schwingungsisolation

Um die Rauschgrenze kommerzieller Gasreibungsvakuummeter zu bestimmen, wurden diese auf einer schwingungsgedämpften Vorrichtung betrieben. Die Rausch- und Messgrenze ließ sich bis hinab zu 1/30 des Werts bei ungedämpfter Anbringung senken. Überraschenderweise hing die Größe der Reduzierung vom magnetischen Aufhängekopf ab. Der Schluss liegt nahe, dass Inhomogenitäten im Magnetfeld eine wesentliche Ursache für die Messgrenze sind. (K. Jousten, FB 7.3, karl.jousten@ptb.de; T. Bock, FB 7.3, thomas.bock@ptb.de)

Neudefinition des Wasserstoff-Fixpunktes

Die Definition des Wasserstofftripelpunktes ($T = 13,8$ K) wurde vom *Beratenden Komitee für Thermometrie* (CCT) durch Festlegung der Isotopenzusammensetzung präzisiert und damit die Unsicherheit seiner Darstellung um eine Größenordnung verringert. Die Neudefinition wurde möglich, weil von der PTB koordinierte Untersuchungen, an denen sich die acht führenden metrologischen Institute beteiligten, einen ausreichend genauen Wert für die Abhängigkeit der Tripelpunkttemperatur vom Deuteriumgehalt lieferten. (B. Fellmuth, FB 7.4, bernd.fellmuth@ptb.de)

Neue Methodik für die Fixpunktdarstellung

Bei der Darstellung der Temperaturfixpunkte der ITS-90 resultiert die dominierende Unsicherheitskomponente meistens aus dem Einfluss von Verunreinigungen der Fixpunktmaterialien. Bisher gab es keine abgestimmte, zuverlässige Methode zur Abschätzung dieser Komponente. Jetzt hat das *Beratende Komitee*

für *Thermometrie* (CCT) dafür generell Methoden empfohlen, die die PTB auf der Basis von kristallographischen und umfangreichen experimentellen Daten vorgeschlagen hatte. (B. Fellmuth, FB 7.4, bernd.fellmuth@ptb.de)

Abschluss des EU-Projekts HIMERT

Ein von der PTB organisierter Workshop schloss im April 2005 das EU-Projekt „Novel metal-carbon eutectic fixed-points for radiation thermometry, radiometry and thermocouples“ ab. Als Ergebnis des Forschungsprojekts stehen nun stabile und reproduzierbare Hochtemperaturfixpunkte für Temperaturen bis 2800 K kurzfristig zur Verfügung, deren thermodynamische Schmelztemperaturen mit Unsicherheiten unter 0,5 K erstmals von der PTB bestimmt wurden. (J. Hartmann, FB 7.3, dr.j.hartmann@ptb.de)

Mikrokelvinanlage erreicht Temperaturen unter 25 μ K

Mit der erfolgreichen Erprobung der Mikrokelvinanlage MKA 3 besteht nun die Möglichkeit, das Verhalten kondensierter Materie bei Temperaturen unter 50 μ K und in hohen Magnetfeldern bis zu 9 T zu untersuchen. Durch thermodynamisch optimierte Entmagnetisierung konnten bereits Festkörpertemperaturen unter 25 μ K gemessen und in einem Restfeld von 20 mT für mehrere Tage aufrecht erhalten werden. Die zuverlässige Messung der Temperatur stützt sich auf die thermodynamische Berechnung sowohl des Prozesses der Kernspinkühlung als auch der Pt-NMR-Thermometrie.

(P. Strehlow, FB 7.5, peter.strehlow@ptb.de)

Äquivalenz von dynamischem und statischem Wägeverfahren

Die Darstellung und Weitergabe der Skala für Volumen(-strom) im Temperaturbereich von 3 °C bis 90 °C für Volumenströme bis 1000 m³/h erfolgte bisher auf der Basis des statischen Wägeverfahrens. Bei der neuen gravimetrischen Normalmessanlage des Fachbereichs 7.6 *Wärme* wurde weltweit erstmals das dynamische Wägeverfahren bei großen Volumenströmen als zweite unabhängige Methode zur Skalvalidierung eingesetzt. Mehrere Versuchsreihen belegen die Äquivalenz beider Messverfahren. Damit kann die projektierte erweiterte relative Unsicherheit von $4 \cdot 10^{-4}$ für die Skalendarstellung sicher erreicht werden.

(T. Lederer, FB 7.6, thomas.lederer@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Metrologie für die EUV-Lithographie

Die umfangreiche Unterstützung der europäischen Halbleiterindustrie bei der Entwicklung der Halbleiter-Lithographie mit Strahlung einer Wellenlänge von 13,5 nm im extremen UV (EUV) wurde fortgesetzt und erweitert. Im Rahmen einer Auftragsforschung für die CZ-SMT AG wurde der Reflexionsgrad von Mo/Si-Multilayerspiegeln für ein EUVL- α -Tool vermessen. Am Messplatz für ortsauflösende Reflektometrie, wo das Strahlprofil durch den Einbau einer weiteren Blende verbessert und genauer charakterisiert wurde, wurden Messungen an Spiegeln aus der Belichtungsoptik des EUVL- α -Tool durchgeführt.

(F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

Intermediate-Focus-Monitor kalibriert

Ein von der Firma *Jenoptik* (jetzt *Xtreme*) entwickelter Monitor zur Charakterisierung des „intermediate focus“ in EUV-Steppern, der eine sehr hohe Bestrahlungsstärke aufweist, wurde kalibriert.

(R. Klein, FB 7.1, roman.klein@ptb.de)

Ausgasverhalten von Materialien unter EUV-Bestrahlung

Verschiedenste Materialien, die in einem EUV-Stepper zum Einsatz kommen, wurden in Zusammenarbeit mit TNO/TPD und der *Carl Zeiss SMT AG* auf ihre Vakuumtauglichkeit bei EUV-Bestrahlung untersucht.

(R. Klein, FB 7.1, roman.klein@ptb.de)

EUV-Scatterometrie für die Charakterisierung von Masken

Im Rahmen des BMBF-Projekts ABBILD werden gemeinsam mit den Fachbereichen 4.2 und 5.2 scatterometrische Verfahren im EUV-Spektralbereich für die Untersuchung sowohl von „klassischen“ Cr/Quarz-Masken als auch von EUV-Masken entwickelt und evaluiert.

(F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

The evitherm Society gegründet

Das virtuelle *Institut für thermische Metrologie* (evitherm) wird über die von der europäischen Union geförderte Projektlaufzeit hinaus als rechtlich selbstständiges „Non-profit“-Unternehmen weitergeführt. Die PTB stellt einen der beiden Vizepräsidenten, der sich vor allem um die Anforderungen und Anfragen aus der Industrie kümmert und das

Informationsangebot im evitherm-Internetportal (www.evitherm.org) verbessert.
(J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

Kalibrierung von Temperaturmessbrücken
Durch eine Zusammenarbeit der Fachbereiche 2.1 *Gleichstrom und Niederfrequenz* und 7.4 *Temperatur* wurde mittels verschiedener induktiver Spannungsteiler und eines Hamon-Widerstandsnetzwerks gezeigt, dass mit AC-Temperaturmessbrücken Messunsicherheiten von weniger als $5 \cdot 10^{-8}$ erreicht werden können. Weiterhin ist es nunmehr möglich, auch DC-Temperaturmessbrücken mit höchster Genauigkeit zu kalibrieren.
(S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

Unsicherheit der Kennlinien von Thermometern
Die Unsicherheit von Thermometerkennlinien zwischen den Kalibrierpunkten ist schwierig zu bestimmen und wird von vielen Staatsinstituten deshalb nicht angegeben. Die PTB hat jetzt ein Verfahren vorgeschlagen, mit dem diese Unsicherheit bestimmt werden kann. In Diskussionen zeigte sich, dass bisher viele Institute die Unsicherheiten zu optimistisch abgeschätzt haben, da nur die Fortpflanzung der Unsicherheit von den Kalibrierpunkten berücksichtigt wurde, während zusätzliche Beiträge ignoriert wurden.
(E. Tegeler, FB 7.4, erich.tegeler@ptb.de)

SQUID-Verstärker für messtechnische Anwendungen
Die PTB arbeitet seit mehreren Jahren mit verschiedenen Kooperationspartnern an der Entwicklung rauscharmer SQUID-Verstärker. Die jüngste SQUID-Stromsensorfamilie PTB-C3 umfasst Stromsensoren mit Einzel-SQUIDs, extrem rauscharme zweistufige SQUID-Anordnungen sowie SQUID-Arrays mit hoher Dynamik, bei denen besonderer Wert auf hohe Störuneempfindlichkeit gelegt wurde. Die von der PTB in Kooperation mit der Firma *Magnicon* im letzten Jahr entwickelte schnelle SQUID-Elektronik XXF-1 ist insbesondere auch für den Betrieb der zweistufigen SQUID-Verstärker und der SQUID-Arrays ausgelegt.
(Th. Schurig, FB 7.5, thomas.schurig@ptb.de)

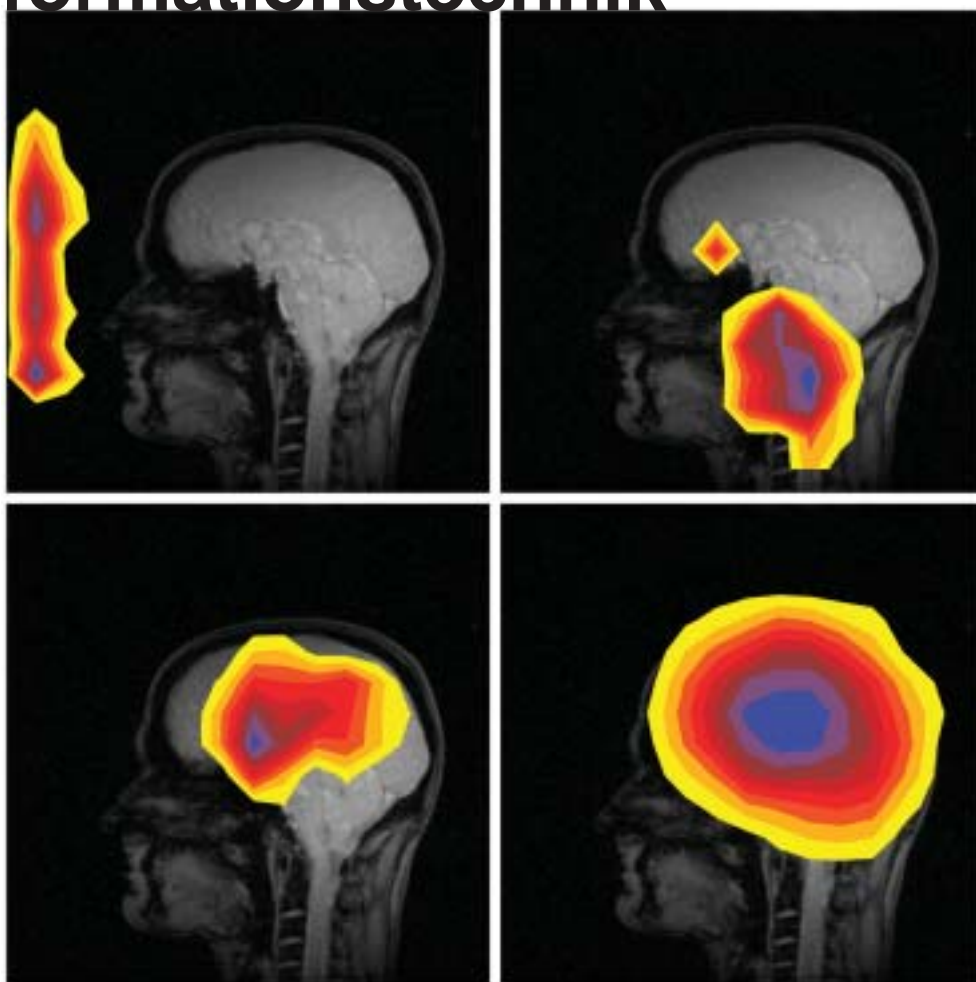
Metrologie für die Gesellschaft

Fieberthermometer werden global
Die Ende 2003 mit dem Teil 5 über Infrarot-Ohrthermometer abgeschlossene Europäische Normenreihe EN12470 „Klinische Fieberthermometer“ wird jetzt global. In einer gemeinsam von PTB und NIST geleiteten Arbeitsgruppe des ISO TC121 SC3 und der IEC TC/SC 62 D wurde jetzt der Startschuss für die Formulierung einer weltweit gültigen ISO/IEC-Norm für klinische Fieberthermometer gegeben.
(J. Hartmann, FB 7.3, dr.j.hartmann@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Qualitäts-Audits bei Staatsinstituten
Das CIPM-MRA zur gegenseitigen Anerkennung von Kalibrierungen fordert von allen Staatsinstituten den Betrieb eines Qualitätsmanagementsystems. In die Begutachtung des fachlichen Teils dieses Systems sind häufig Experten anderer Staatsinstitute eingebunden. Als gefragte Experten führten Mitarbeiter des Fachbereichs *Temperatur* Begutachtungen in Fachlaboratorien des INMETRO (Brasilien), NPL (Indien), INTI (Argentinien), GUM (Polen), metas (Schweiz) und VMT/VMC (Litauen) durch.
(J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

Medizinphysik und metrologische Informationstechnik



Berichte der Abteilungen

Abteilung



Medizinphysik metrologische Information

Einleitung

Prognosen zukünftiger Entwicklungen in Wirtschaft, Gesellschaft und Wissenschaft gehen übereinstimmend davon aus, dass die Themenfelder „Medizin/Biologie/Gesundheit“ und „Informationstechniken“ weiterhin wachsende Bedeutung erlangen werden. Entsprechend sind die Arbeitsfelder der Abteilung, die Medizinphysik, die Mathematik und die Informationstechnik als Zukunftsfelder der Metrologie expansiv zu entwickeln. Dem steht seit 15 Jahren der kontinuierliche Abbau personeller Ressourcen gegenüber, der immer schwieriger durch Effizienzsteigerungen aufzufangen ist. Ein Weg, dieses Dilemma abzumildern, ist die Verfolgung einer europäischen Strategie, d. h. eine Aufteilung der Aufgaben unter den nationalen Metrologieinstituten (NMI) Europas. Da passt es gut, dass im 7. Rahmenprogramm der EU die Lebenswissenschaften und die Informationstechnologie ebenfalls zu den herausgehobenen Schwerpunktthemen gehören. Der vorliegende Jahresbericht zeigt exemplarisch durch Verweis auf F&E-Ergebnisse des vergangenen Jahres, inwieweit mögliche Forschungsprojekte im Rahmen eines europäischen Forschungs- und Entwicklungsprogramms aufgegriffen und vertieft werden können. Dazu werden sieben übergreifende Themen näher beleuchtet.

Titelbild

Spektroskopische MR-Bildgebung („2D-CSI“) von ^{129}Xe : bereits wenige Sekunden nach dem Einatmen des hyperpolarisierten Gases können im menschlichen Kopf ^{129}Xe -Spektren mit bis zu fünf unterscheidbaren Signalen gemessen werden. Für vier dieser Linien sind die räumlichen Amplitudenverteilungen gezeigt. Oben links: gasförmiges Xe (Referenz bei 0 ppm) im nicht völlig entleerten Inhalationsbeutel. Die anderen Bilder zeigen Xe gelöst in verschiedenen Gewebekompartimenten innerhalb (unten links: 193 ppm, unten rechts 196 ppm) und außerhalb des Gehirns (oben rechts, 190 ppm).

Prüfhilfsmittel für Messtechnische Kontrollen

Die EU-Richtlinien für Medizinprodukte regeln neben anderem das Inverkehrbringen medizinischer Messgeräte, aber enthalten keine Vorschriften zur Gewährleistung der Messbeständigkeit. Dazu werden national in Betreiberverordnungen die so genannten Messtechnischen Kontrollen (MTK) vorgeschrieben. Die Prüfhilfsmittel für MTK müssen danach auf verfügbare nationale Normale rückgeführt werden. Einige solcher Prüfhilfsmittel wurden von der PTB entwickelt, z. B. für die Ergometrie, die Augentonometrie, die Lungenfunktionsdiagnostik und für Blutdruckmessgeräte.

Im Berichtsjahr wurde ein Simulator zur Prüfung nichtinvasiver Blutdruckmessgeräte im Rahmen eines von der EU geförderten Vorhabens mit Universitäten in Großbritannien, Slowenien und Deutschland sowie einem Industriepartner aus den Niederlanden fertig gestellt. Von ca. 600 Menschen wurden insgesamt etwa 1100 Blutdruckkurven aufgenommen und im Simulator gespeichert. Die gleichzeitig aufgenommenen auskultatorischen (mit dem Stethoskop aufgenommenen) Referenz-Blutdruckwerte sind ebenfalls im neuen Prüfgerät abgelegt.

Für einige andere medizinische Messgerätearten liegt das System der MTK mangels geeigneter Prüfhilfsmittel und deren Rückführungen im Argen. Für ein NMI allein ist der Umfang der recht aufwendigen Entwicklungsarbeiten nicht zu schultern. Eine europaweit koordinierte Arbeitsteilung ähnlich wie im oben beschriebenen Projekt wäre die ideale Lösung dieses Problems.

Molekulare Medizin

Eine der großen Herausforderungen an die Metrologie wird es sein, mit der rasanten Entwicklung der Biotechnologie Schritt zu halten und die völlig neuartigen messtech-

Physik und

ne

stechnik

nischen Ansprüche dieses Gebiets rechtzeitig aufzugreifen.

Exemplarisch seien drei Arbeitsergebnisse dieses Gebiets der Abteilung herausgegriffen:

Die Längenmessung auf molekularer Ebene findet ihren Einsatz bei der Identifikation von Konformitätsänderungen an Makromolekülen oder von Kopplungen zwischen Molekülen. Zum Nachweis der Kolo-kalisation von Molekülen in lebenden Zellen können Resonanzen in der Übertragung der Elektronenanregungsenergie zwischen Molekülen ausgenutzt werden (Förster-Resonanter-Energie-Transfer, FRET). Die PTB untersucht Modellsysteme bekannter Molekülstruktur mit dem Ziel, die Genauigkeit einer quantitativen Abstandsmessung im Bereich weniger Nanometer unter Verwendung des FRET-Prozesses zu bestimmen.

Viele Untersuchungen in der molekularen Medizin arbeiten mit bindungsspezifisch gekoppelten fluoreszierenden Farbstoffmolekülen („molecular imaging“), die mikroskopischen und makroskopischen Abbildungen werden meist nur qualitativ ausgewertet. Hier zu quantitativen Angaben über Konzentrationen, räumlichen Korrelationen und ähnlichen Eigenschaften zu kommen ist dringend geboten. Die PTB verfolgt diese Aufgabe in Kooperation mit dem *Robert-Koch-Institut* z. B. bei der quantitativen Analyse der Antigen-Expression von aktivierten T-Lymphozyten (Bild 1).

Statt mit Farbstoffen lassen sich Biomoleküle auch mit magnetischen Nanopartikeln markieren. Ein in der PTB zusammen mit der *Schering AG* zuerst entwickeltes und patentiertes Verfahren, die Magnetrelaxometrie, wurde inzwischen weltweit als interessante

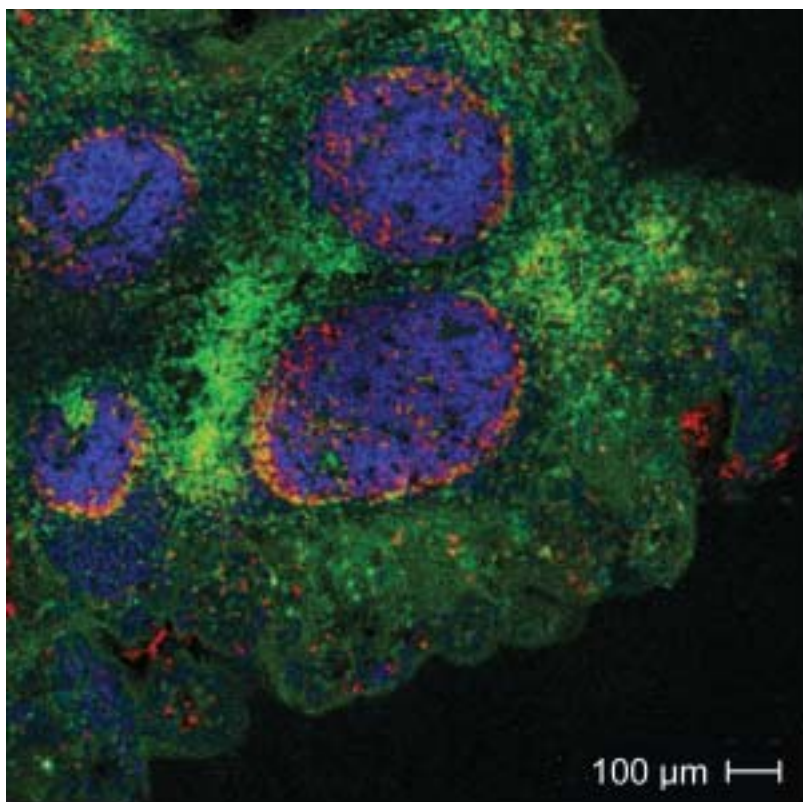
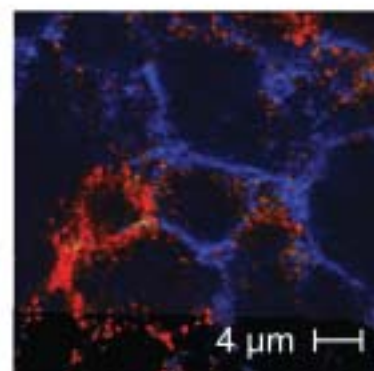


Bild 1: Korrelation von Lokalisation und Funktion: aktivierte T-Lymphozyten wandern in die Keimzentren der B-Lymphozyten ein (Tonsille, links Übersichtsaufnahme, rechts Detailbild). Die verschiedenen Zellen werden durch Antikörperfärbungen differenziert (blau: CD19, B-Zellen; grün: CD3, T-Zellen; rot: ICOS, aktivierte T-Zellen). Durch Einzelmoleküldetektion kann die Antigen-Expression einzelner Zellen quantifiziert werden.



Methode aufgegriffen und weiterentwickelt. In einem DFG-Schwerpunkt übernahm die PTB Sternvergleiche zu den physikalischen Eigenschaften der magnetischen Nanopartikelchargen, die von den Partnern des Schwerpunktes entwickelt bzw. eingesetzt wurden. An einem BMBF-Verbundvorhaben zum „Drug Targeting“ beteiligt sich die PTB zusammen mit der *Siemens AG* und mehreren akademischen Partnern.

Dieses Jahr erfolgte die Bewilligung eines großen EU-Projekts zu dem Verfahren, an dem fünf industrielle und acht akademische Partner und zwei Fachbereiche der PTB teilnehmen.

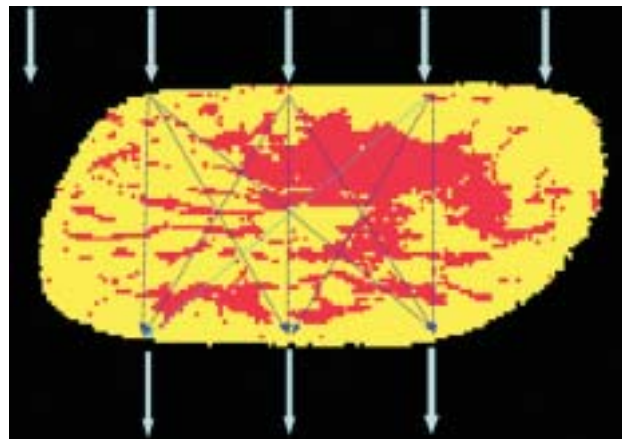
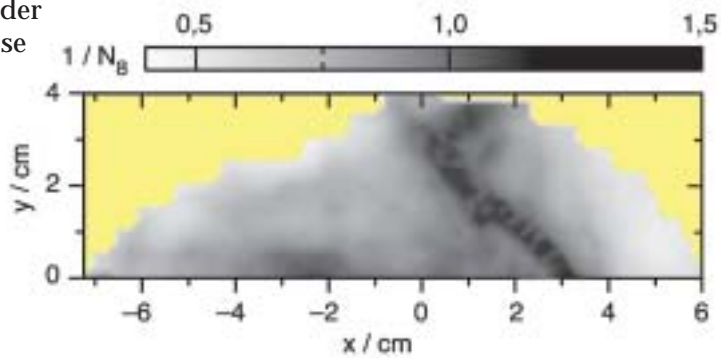
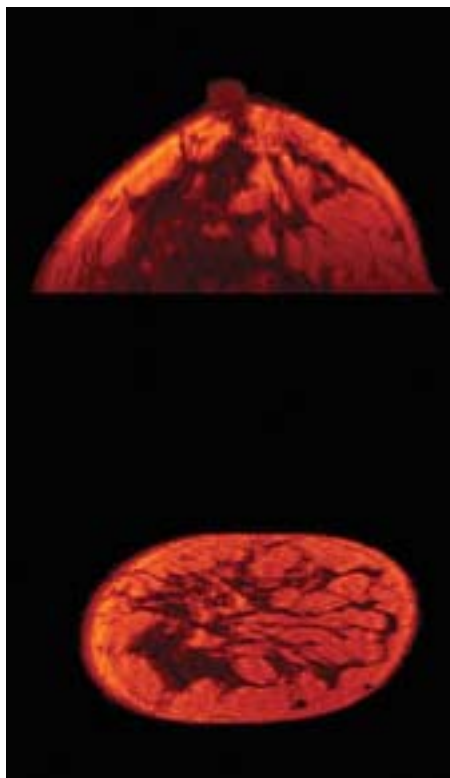
Multimodale Untersuchungen

Auf die Thematik „Multimodalität“, also der Messung mit grundverschiedenen Methoden am selben Messobjekt zur Verbesserung der Aussagekraft der Messergebnisse und zur Analyse der Vergleichbarkeit von Messmethoden, wurde im letzten Jahresbericht ausführlich eingegangen. Am Beispiel der neurovasculären Kopplung wurde der Nutzen der simultanen Messung mit der funktionellen Kernspinresonanzbildgebung und der Nahinfrarotspektroskopie einerseits und andererseits der Magnetencephalographie und der Nahinfrarotspektroskopie erläutert. Diese

Experimente erfolgten im Rahmen des BMBF-Vorhabens „Berlin NeuroImaging Centre“, das zum Jahresbeginn international erfolgreich begutachtet und für weitere drei Jahre bewilligt wurde.

Ein anderes aktuelles Beispiel für die Synergieeffekte multimodaler Messungen ist die im Berichtsjahr realisierte simultane Messmöglichkeit der Kernspinresonanzbildgebung (MRI) und der optischen Nahinfrarot-Mammographie (Bild 2). Ziel dieser Untersuchungen ist die Verbesserung der Bildrekonstruktion bei der optischen Mammographie durch die hochaufgelösten MRI-Bilddaten.

Bild 2: Links: Axiale (oben) und koronale (unten) Schicht aus einem 3-D-MR-Bild einer gesunden weiblichen Brust. Oben rechts: Nahinfrarot-Transmissionsbild derselben Probandin mit einem optischen Mammographen aufgenommen. Die craniale- caudale Projektion entspricht dem axialen Schnitt oben links. Unten rechts: schiefer Schnitt durch die aus den MR-Daten bestimmte Gewebezusammensetzung (gelb: Fett, rot: Drüsengewebe). Die gewählte Schnittebene enthält fünf optische Sendefasern (Pfeile oben) und drei optische Empfangsfasern (Pfeile unten) des experimentellen Aufbaus zur kombinierten MR/NIR-Mammographie.



Erreicht wird dies dadurch, dass aus den 3-D-MR-Datensätzen die lokale Gewebekomposition ermittelt wird. Für die optische Rekonstruktion sind dann im Idealfall statt in jedem einzelnen Volumenelement die relevanten optischen Parameter nur noch einmal pro Gewebetyp (Fett, Drüsengewebe, Tumor, ...) zu bestimmen.

Dies wird insbesondere dem begonnenen BMBF-Vorhaben zur Fluoreszenzmammographie zugute kommen, das mit den Firmen *Philips*, *Schering* und *PicoQuant* sowie der *Robert-Rössle-Klinik* durchgeführt wird.

In ähnlicher Weise gibt es in der medizinischen Messtechnik vielfältige Möglichkeiten, durch Multimodalität Verbesserungen im Methodenverständnis, der Methodenvergleichbarkeit und der Resultate zu erzielen. Für diese Fragestellungen bietet sich eine koordinierte Aufteilung entsprechender Aktivitäten in Europa an.

Der virtuelle gemessene Mensch

Seit einigen Jahren wird in mehreren Zentren ein weltweit koordinierter Versuch unternommen, die Vision des „virtual human“ zu verwirklichen. Darunter wird die realistische numerische Modellierung des menschlichen Körpers und seiner Vitalfunktionen inklusive der Pathophysiologien verstanden.

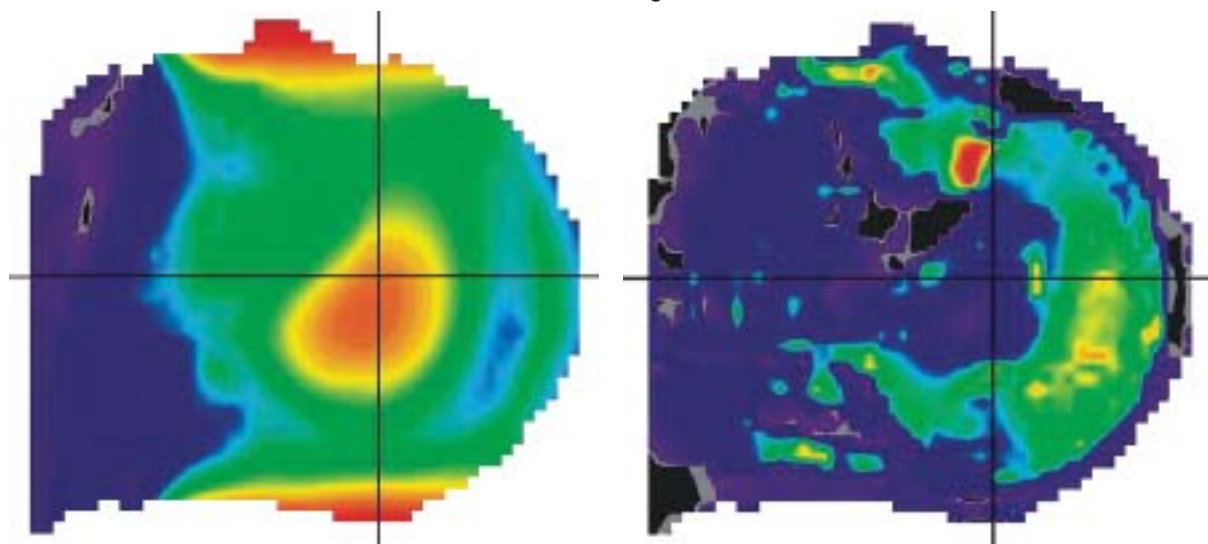
Diese Vision ist reizvoll für die Metrologie, da der virtuelle Mensch eines Tages die Funktion eines Referenznormals für die Biologie und die Medizin übernehmen könnte.

Daher befasst sich die PTB mit metrologischen Teilaspekten im Sinne dieses ambitionierten Projekts.

Bereits jetzt bringt die numerische Modellierung unmittelbaren Nutzen, wie an folgendem Beispiel illustriert wird. Bild 3 zeigt in einer Simulation, wie die Hochfrequenzleistung einer realistischen Sendespule für die Kernspintomographie in einem Kopfmodell absorbiert wird. Würde die besondere Belastung des Auges bei der Festlegung von Leistungsgrenzwerten für die Spule nicht angemessen berücksichtigt, könnte dies fatale Folgen für einen Patienten haben.

Die entscheidende Grundlage zur Entwicklung des „virtuellen Menschen“ ist eine möglichst detaillierte und genaue Bildgebung. Die Magnetresonanzbildgebung ist der ideale Kandidat, um diese Basisdaten zu liefern. Besonders die Entwicklung des 7-Tesla-Tomographen verspricht deutlich detailgenauere 3-D-Informationen (nicht nur der Geometrie, auch einiger Vitalfunktionen), besitzt allerdings das Problem verstärkter auftretender Inhomogenitäten des Magnetisierungsprofils. Eine mögliche Gegenmaßnahme ist die Anwendung des „Transmit-Sense“-Prinzips (Bild 4).

Bild 3: Links: Simulierte Verteilung der sendewirksamen B1-Komponente einer MR-Spule in einem Computermodell des menschlichen Kopfes bei 1 kW Sendeleistung. Rechts: Die zugehörige SAR-Verteilung (SAR: specific absorption rate) als Maß für die lokal deponierte HF-Leistung zeigt eine dramatische Überhöhung im Bereich des Auges.

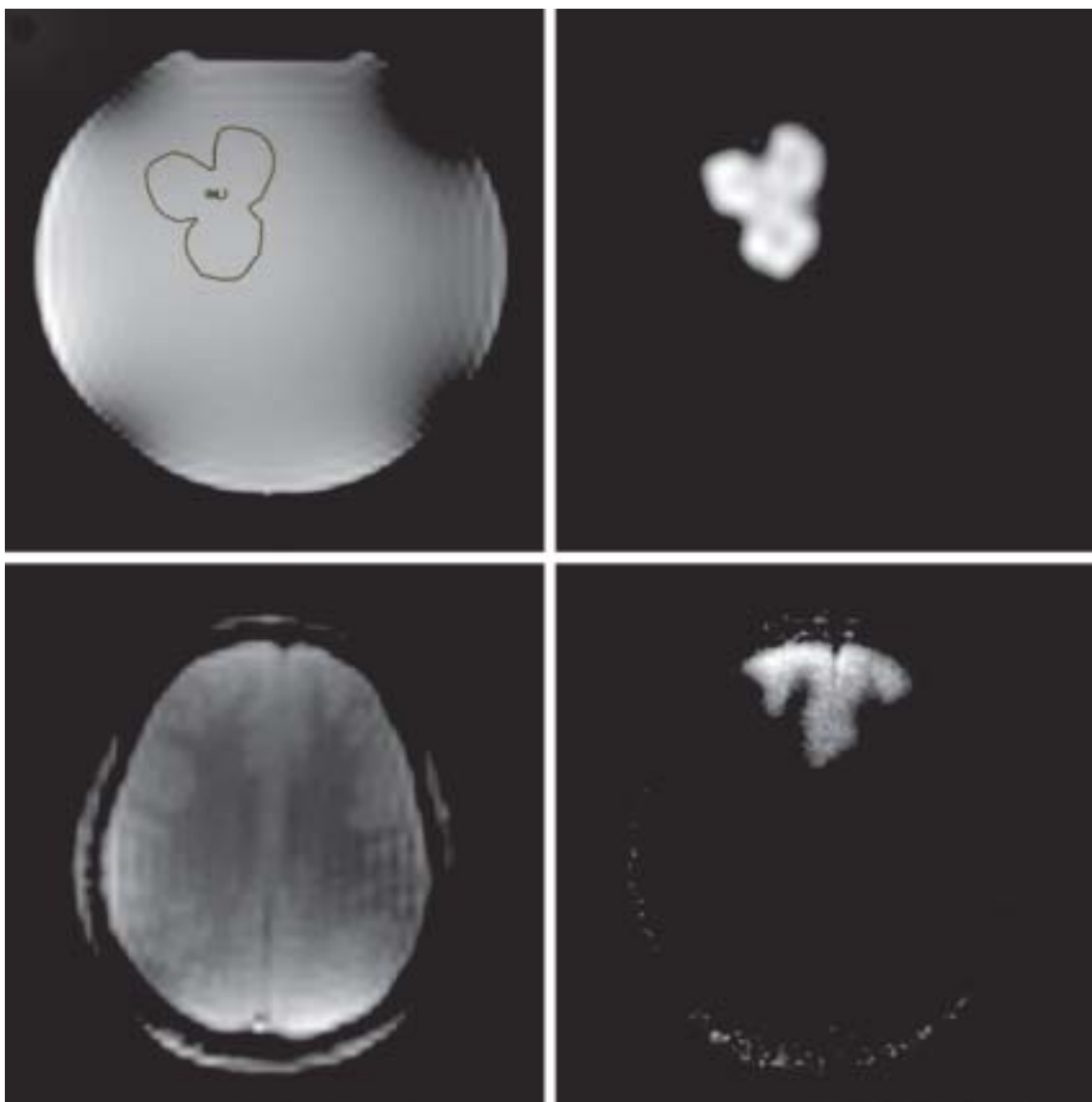


Das Verfahren erlaubt es, die Magnetisierung eines ausgedehnten Messobjekts gezielt in beliebig geformten Teilvolumina anzuregen und anschließend mit konventioneller MR-Bildgebung darzustellen. Während das Grundprinzip bereits länger bekannt ist, sind reale Anwendungen jetzt durch die Verwendung mehrkanaliger Sendespulen möglich geworden. Die Bilder zeigen die erstmalige experimentelle Demonstration dieses Verfahrens an einem Human-MRT durch P. Ullmann et al. in einer Kooperation von *Bruker Biospin GmbH*, *Uni Freiburg* und PTB. Alle Bilder wurden am 3-Tesla-MRT der PTB unter Verwendung des von uns entwickelten und patentierten Vierkanal-Spulenarrays aufgenommen.

Für das BMBF-Vorhaben „Numerisches Herzmodell“ galt es, auch die Bewegungsdynamik der Herzgeometrie in das Modell mit einfließen zu lassen. Dazu wurden so genannte

Tagging-MRI-Aufnahmen des Herzens aufgenommen, darin Bezugspunkte gesetzt und deren Bewegung verfolgt, um daraus eine Kompressionsmatrix zu extrahieren, mit der dann das Gitter des Finite-Elemente-Modells entsprechend der Herzwandbewegung deformiert werden kann (Bild 5). Modellrechnungen der elektrischen Erregungsausbreitung für die beiden Extremfälle Diastole und Systole ergeben deutlich unterschiedliche Zeit- und Ortsabhängigkeiten der simulierten EKG-Signale. Ein Hinweis darauf, wie wichtig die Einbeziehung der elektromechanischen Kopplung für die Realistik der Herzmodellierung ist.

Bild 4: Oben links: Scout-MRT eines homogenen Kugelphantoms mit frei definierter Zielregion. Oben rechts: Transmit-SENSE-Aufnahme des markierten Bereichs. Unten: Erste In-vivo-Anwendung der Methode am Gehirn eines gesunden Probanden



Messunsicherheit in komplexen Messverfahren

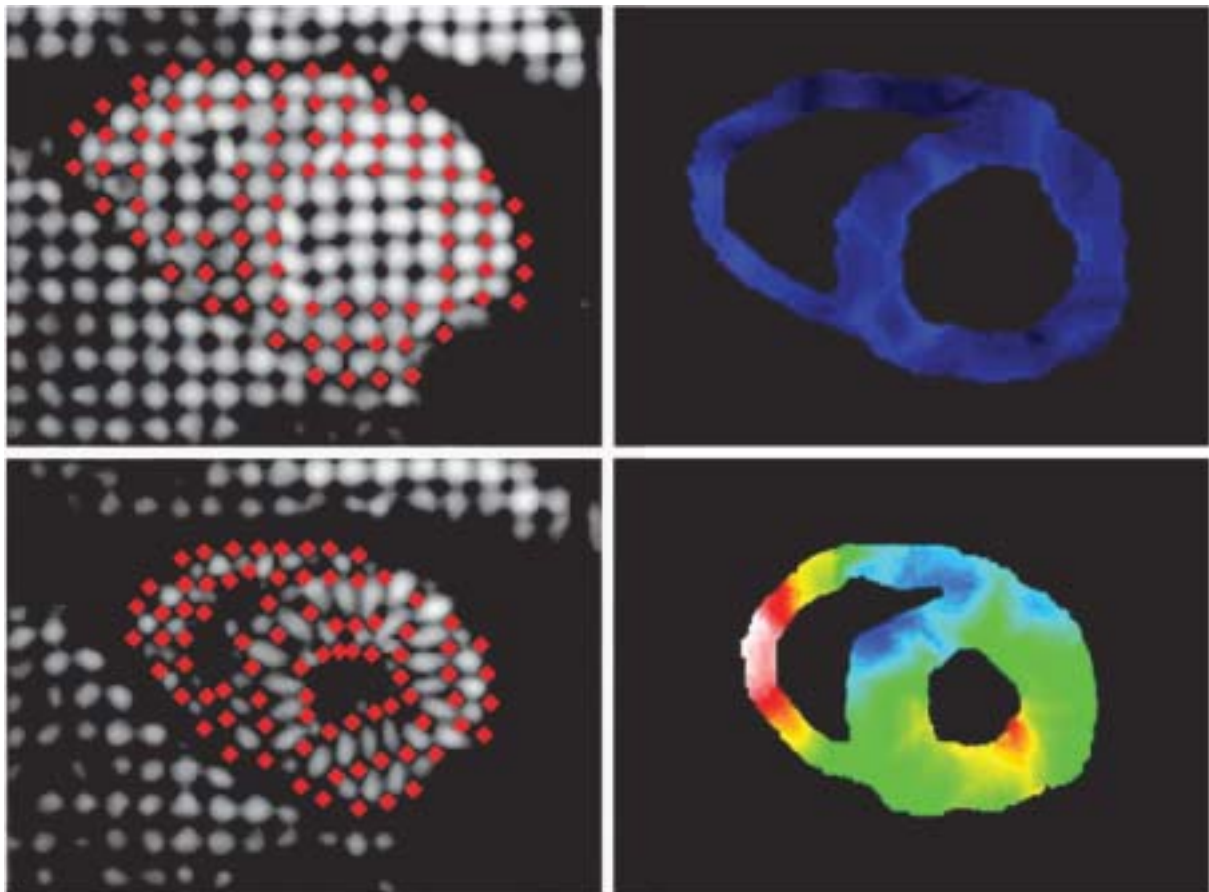
Mathematische Modellierung und Datenanalyse sind Grundlage vieler metrologischer Untersuchungen. Modellierung und Simulation dienen nicht nur dem besseren physikalischen Verständnis eines Systems, sondern sind auch oft notwendige Elemente bei der Bestimmung der Messunsicherheit nach den Prinzipien des „Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)“. Dies ist besonders schwierig für komplexe Messprozesse, wie sie in nichtlinearen Systemen vorkommen oder in Systemen, die indirekte Messungen ausnutzen und mit inversen Methoden arbeiten.

Der GUM legt bisher nur die Vorgehensweise in einfachen Situationen fest, in denen explizite Messmodelle vorliegen. Es muss aber das Ziel der Metrologie sein, auch für komplexere Anwendungen Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit bereit zu stellen und entsprechende Grundlagen zu erarbeiten. Die Weiterentwicklung des GUM im oben ange deuteten Sinne erfordert enge Kooperationen mit mathematisch ausgerichteten Forscher-

gruppen anderer Staatsinstitute und in internationalen Gremien der Metrologie.

Ein Beispiel für die Anwendung der Modellierung und Datenanalyse zur Verbesserung der Bestimmung der Messunsicherheit, ist die Auswertung von Experimenten zur Ermittlung von Metabolitkonzentrationen aus Kernspinresonanzmessungen am Gehirn von Probanden. Hier erlaubt eine so genannte semi-parametrische Modellierung die Trennung der Signale einzelner Substanzen vom unspezifischen Hintergrund des NMR-Spektrums (Bild 6). Allerdings können dafür die resultierenden Messunsicherheiten nicht mehr mittels GUM errechnet werden. Daher ist für diese Auswertung ein adäquates Verfahren auf der Basis der Bayesschen Unsicherheitstheorie entwickelt worden.

Bild 5: Extraktion der Herzwandgeometrie aus Tagged-MRI-Aufnahmen (links; rot: Kontrollpunkte) für die Fälle Diastole (oben) und Systole (unten). Die Falschfarbenkoordinierung des rechten Bilds zeigt den Grad der Kompression des Herzmuskelgewebes an.



Softwarevalidierung in der Metrologie

Auf dem Gebiet der Metrologischen Informationstechnik ist in den letzten Jahren eine Konzentration auf Fragen der Softwarevalidierung und der Datensicherheit erfolgt.

So wurde im Bereich des gesetzlichen Messwesens im Jahre 2005 unter Federführung der PTB auf europäischer Ebene die Erarbeitung des neuen Softwareleitfadens abgeschlossen; er wurde als neuer WELMEC-Guide 7.2 angenommen worden.

Die Softwareprüfstelle hat sowohl bei anspruchsvollen Prüfungen für sensible Messgeräte- und für Wahlgerätesoftware als auch bei qualitätssichernden Maßnahmen wie Richtlinienerstellung, Beratungen und Begutachtungen ihre anerkannte Stellung befestigt und ausgebaut. Die Akkreditierung ist um weitere fünf Jahre verlängert worden.

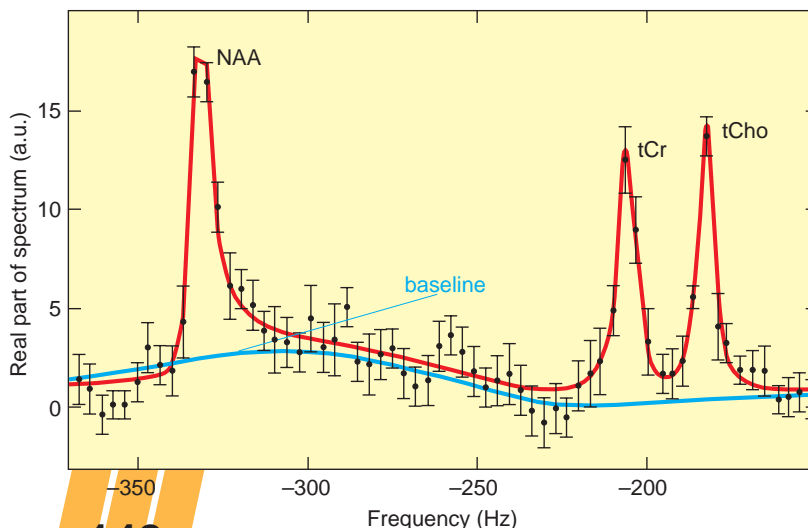
Die Arbeitsergebnisse der Metrologischen Informationstechnik sind vielfältig präsentiert worden, unter anderem auf der internationalen Konferenz „Impact of IT in Metrology“ in Japan. Dort erhielt die PTB den Auftrag, die nächste Konferenz dieser Reihe im Jahre 2007 in der PTB durchzuführen.

Die Abteilung stellt sich darauf ein, dass auch für den Arbeitsbereich der Metrologischen Informationstechnik die Herausforderungen wachsen werden und in europäisch abgestimmter Weise darauf reagiert werden muss.

Sicherlich werden die Bereiche Software, Softwarequalitätssicherung bzw. Softwarevalidierung einen Schwerpunkt der europäischen Arbeitsteilung bilden. Software ist längst nicht mehr ein Produkt im herkömmlichen

Sinne, dessen Qualität durch eine einmalige Prüfung bescheinigt werden kann. Vielmehr ist Software im Internetzeitalter auf dem Wege zu einem flexiblen, verteilten, sich immer mehr automatisch verändernden Bestandteil von (Mess-)Systemen. Das erfordert metrologisch geeignete, softwarelebenszyklusbegleitende Qualitätssicherungsmaßnahmen, die nicht nur den Entwicklungsprozess selbst betreffen, sondern auch und gerade die wesentlich durch das Internet gestützten neuen Distributions-, Wartungs- und Updateprozesse. Zugleich bietet das Internet ganz neue Möglichkeiten des Testens und Überwachens von Software, die es für die Metrologie nutzbar zu machen gilt.

Bild 6: Bestimmung von Metabolit-Konzentrationen in einer ausgewählten Region des Gehirns (sichtbar im Querschnitt einer NMR-Aufnahme, linkes Bild). Das rechte Bild zeigt die semiparametrische Modellierung des Spektrums (rote Linie), die auf einer nichtparametrischen Bestimmung des Hintergrunds (Baseline) beruht.



Messdatensicherheit

2005 wurde das von der PTB maßgeblich unterstützte SELMA-Projekt (Sicherer Elektronischer Messdaten-Austausch) erfolgreich abgeschlossen (Bild 7). Diese Zusammenarbeit mit der deutschen Messgeräteindustrie, Energieversorgungsunternehmen und Universitäten führte zu einem auf breiter Basis akzeptierten System zur Sicherung sensibler (Mess)-Daten bei deren Übertragung in verteilten Netzen und bei Fernzugriffen. Das metrologische Spezifikum der Datensicherheit in diesem Projekt lag in der Lösung des Problems, reale Messgeräte und ihre Daten in ein integriertes, neu entwickeltes Datensicherungssystem einzubinden. Dazu waren geeignete Standards für die Geräteschnittstellen zu etablieren. Das Projekt war exemplarisch für viele ähnlich gelagerte Fragestellungen in anderen metrologischen Arbeitsgebieten und Anwendungsbereichen, in denen moderne

Informations- und Kommunikationstechniken Fuß fassen. Dafür sind Sicherheitsniveaus zu definieren, Sicherheitsmodule und Verifikationsverfahren zu entwickeln und an die sich bildenden Sicherheitsinfrastrukturen außerhalb der Metrologie zu adaptieren.

Es bietet sich an, was mit dem SELMA-Projekt in Deutschland begann, auf einen europäischen Rahmen in Zusammenarbeit mit anderen NMIs zu übertragen und auf ähnlich gelagerte Fragestellungen anzuwenden

Resümee

Die Zukunftsthemen Bio- und Medizinphysik sowie Mathematik und Informationstechnik stellen für die Metrologie eine anspruchsvolle Herausforderung dar, für die die PTB gut gerüstet ist, die aber eine europäische Arbeitsteilung dringend erforderlich macht.

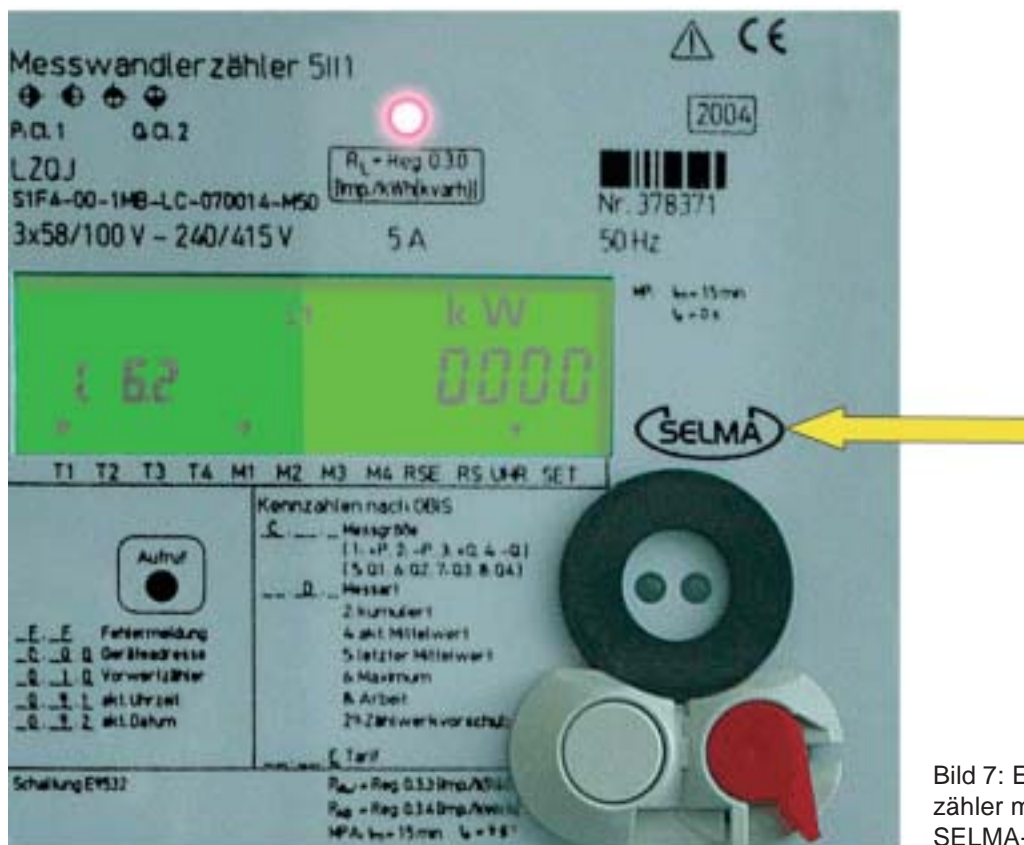


Bild 7: Elektricitätszähler mit integrierter SELMA-Technik

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(diese und weitere Nachrichten ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

PTB nimmt an internationaler Pilotstudie zur Kalibration von Fluorometern teil

Die Fluoreszenzspektroskopie gehört zu den empfindlichsten spektroskopischen Methoden und wird deshalb immer häufiger in der chemischen, medizinischen und biotechnologischen Analytik eingesetzt. Ungeachtet dieser Entwicklung besteht kein Konsensus hinsichtlich der Kalibrierung der eingesetzten Messverfahren, insbesondere auch nicht zur spektralen Korrektur. Unter Beteiligung der nationalen Metrologieinstitute NIST, NPL, NRC und PTB sowie der BAM wurden in einer Pilotstudie zu dieser Problematik an fünf Kalibrations- und drei unbekanntem Fluoreszenzfarbstoffen Messungen durchgeführt. Dabei wurde untersucht, ob die Kalibration mit Hilfe physikalischer Transferstandards mit einer Farbstoff-basierten Kalibration vergleichbar ist. Obwohl von den verschiedenen Laboratorien unterschiedliche Messverfahren eingesetzt wurden, ergab die vorläufige Auswertung der Ergebnisse eine gute Übereinstimmung zwischen den ermittelten Fluoreszenzspektren und den Messunsicherheiten. (B. Ebert, FB 8.3, bernd.ebert@ptb.de)

Zuordnung der MR-Signale von hyperpolarisiertem ^{129}Xe im Kopf

Hyperpolarisiertes Xe-Gas wird nach dem Einatmen in der Blutbahn aufgenommen und zu den Organen transportiert. Insbesondere können bereits wenige Sekunden nach dem Einatmen Magnetresonanz-Signale im Gehirn gewonnen werden. Um die im Kopfbereich messbaren Linien Xe-Anteilen in verschiedenen Gewebetypen zuzuordnen, wurde eine spektroskopische Bildgebung durchgeführt und die Amplitudenverteilung mit der Gewebeverteilung im Kopf verglichen. Dabei konnten zwei Linien aus dem Gehirn klar von Signalen aus anderen Kopfbereichen getrennt werden. Die beiden Hirnsignale werden Xe in grauer oder weißer Substanz zugeordnet. (W. Kilian, FB 8.1, wolfgang.kilian@ptb.de)

Computers in Cardiology Challenge 2006 nutzt den EKG-Referenzdatensatz der PTB

Auf Anregung der PTB hat die internationale Konferenz „Computers in Cardiology“ den nächsten Wettbewerb zum Thema QT-Intervall-Messung ausgeschrieben (<http://www.physionet.org/challenge/2006/>). Die von den Teilnehmern auszuwertenden Daten sollen dem EKG-Referenzdatensatz (<http://www.physionet.org/physiobank/database/ptd.de/>) der PTB entnommen werden. (H. Koch, FB 8.2, hans.koch@ptb.de)

Vektormagnetometer

Für den neuen magnetischen Abschirmraum BMSR-2 wurde ein Vielkanalmagnetometer entwickelt, in dem 304 Tieftemperatur-SQUIDS die Magnetfeldvektoren in einem zylindrischem Volumen von 250 mm Durchmesser und 140 mm Höhe simultan messen. Das extrem geringe Eigenrauschen der SQUIDS ($< 2\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$) und die einzigartigen Abschirmeigenschaften des BMSR-2 (> 107) ermöglichen Magnetfeldmessungen mit bisher unerreichtem Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Die Messanlage stellt ein Referenzmesssystem für biomagnetische Anwendungen dar und wurde bereits für die Messung der Herzsignale von ungeborenen Föten und für das Monitoring magnetisch markierter Arzneiformen im Magen-Darm-Trakt eingesetzt. Auch für die Kernspinresonanzbildgebung im niedrigen Feld eröffnet dieses Messsystem neue Möglichkeiten. (A. Schnabel, FB 8.2, allard.schnabel@ptb.de)

Links-Rechts-Asymmetrie bei MRS-Daten

Eine empirisch in der PTB mittels Magnetresonanzspektroskopie (MRS) gefundene Asymmetrie von Metabolitkonzentrationen in der linken bzw. rechten Hirnhälfte konnte auf eine ortsabhängige Asymmetrie zwischen links drehenden und rechts drehenden Komponenten des magnetischen Hochfrequenzfelds zurückgeführt werden. Mittels Simulationsrechnungen und anhand von Phantommessungen konnte der Effekt genauer verstanden und ein Korrekturverfahren für die Kalibration der MR-Spektren entwickelt werden.

(F. Seifert FB 8.1, frank.seifert@ptb.de)

Nanometrische Abstandsmessungen an einzelnen Molekülen mittels resonantem Förster-Energietransfer

In Zusammenarbeit mit dem *Robert-Koch-Institut* Berlin sowie der Fa. *PicoQuant GmbH* (Berlin) wurde ein fluoreszenzmikroskopisches Messverfahren zur Bestimmung intramolekularer Abstände von wenigen Nanometern an einzelnen Molekülen weiterentwickelt und verbessert. Das Verfahren wurde an Molekülen definierter Länge im Bereich von 2 nm bis 8 nm eingesetzt und überprüft. Mit den verwendeten Fluoreszenzfarbstoffen konnten dabei Messunsicherheiten von ca. 1 nm erreicht werden. Derartige Abstandsmessungen sind u. a. für Anwendungen in der molekularen Medizin von Interesse, z. B. um Konformationsänderungen von Proteinen oder die Antikörper-Antigenbindung durch Kollokalisierung zu detektieren. (S. Rüttinger, FB 8.3, steffen.ruettinger@ptb.de)

Virtuelles Experiment zur Entwicklung von neuen Sensoren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von leitenden Materialien

In Kooperation mit AG 1.74 wurde im vergangenen Jahr die Finite-Elemente-Methode zur Entwicklung neuer Sensoren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von leitenden Materialien eingesetzt. Es wird die zeitabhängige Temperaturverteilung für ein zu untersuchendes Material und den eingebetteten Sensor simuliert. Die mäanderförmigen, in eine Isolierschicht eingeschlossenen Metallstreifen des Sensors dienen gleichzeitig als Wärmequelle und Temperatursensor. Die Simulationen werden als „virtuelles Experiment“ genutzt und erlauben es, sowohl den systematischen Fehler der zur Auswertung der Experimente verwendeten linearen Näherungsformeln als auch den Einfluss der Dicke der Isolierschicht auf die Messung zu bestimmen. (R. Model, FB 8.4, regine.model@ptb.de)

Self-Assembly und Selbstorganisation in biologischen Membranen

Biologische Membranen zeichnen sich durch dynamisch veränderliche Strukturen auf Skalen von nm bis mm aus. Anhand von Modellrechnungen wurde gezeigt, dass biologische Membranen verschiedene Mechanismen zur Bildung von Lipid- und Proteindomänen besitzen. Alternativ kann die Strukturierung der Membran entweder durch physikalische Lipid-Protein-Wechselwirkung (Self-Assem-

bly) oder durch einen von Enzymen gesteuerten Kreislauf von Anlagerung und Loslösung von Proteinen an der Membran (Selbstorganisation) erreicht werden. Beide Prozesse sind voneinander thermodynamisch fundamental verschieden – Self-Assembly erfolgt durch Minimierung der freien Energie, während Selbstorganisation nur in offenen Systemen unter Verbrauch von Energie möglich ist. Simulationen zeigen, dass Self-Assembly Strukturen im Nanometerbereich in wenigen Sekunden erzeugt, wohingegen Selbstorganisation Membranstrukturen von bis zu 100 nm in wenigen Minuten hervorbringt. (M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Abschluss des SELMA-Vorhabens

Das 2001 gestartete Forschungsvorhaben SELMA „Sicherer Elektronischer Messdatenaustausch“ ist im Jahre 2005 erfolgreich abgeschlossen worden. In einem groß angelegten Feldversuch wurde nachgewiesen, dass die technischen Zielsetzungen erreicht wurden. Mit der SELMA-Lösung steht ein erprobtes Verfahren für den Austausch und die Speicherung von Messdaten in offenen Systemumgebungen zur Verfügung (s. a. www.selma-project.de). Die am Projekt beteiligten und weitere Partner haben über die Laufzeit des Vorhabens hinaus einen Arbeitskreis gebildet, um Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur sicheren Messdatenübertragung gemeinsam fortzusetzen. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)

BMWA-Projekt „Adaptive Mehrelement-Spulen für die Hochfeld-Kernspintomographie“ abgeschlossen

Das genannte Kooperationsvorhaben mit der *Bruker BioSpin MRI GmbH*, gefördert vom BMWA im Rahmen des Programms „Leistungssteigerung Infrastruktur“, konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Ziel des Vorhabens war es, durch eine getrennte Ansteuerung der einzelnen Elemente eines Spulen-Arrays mit bestimmter Amplitude und Phase die Feldverteilung des magnetischen Hochfrequenzfelds B1 für die jeweilige Anwendung zu optimieren. Neben der erfolgreichen Patentierung eines speziellen MR-Spulen-Arrays konnten erstmals Verfahren zur Homogenisierung („Shimming“) oder Fokussierung der NMR-aktiven B1-Komponente experimentell demonstriert werden. Darüber

hinaus wurden Messverfahren zur Charakterisierung von MR-Spulensystemen sowie Verfahren zur Computersimulation von adaptiven Mehrelement-Spulen entwickelt. Die nunmehr abgeschlossenen Arbeiten sind insbesondere für zukünftige Anwendungen der Ultrahochfeld-Kernspintomographie (7 Tesla) von Bedeutung.
(F. Seifert FB 8.1, frank.seifert@ptb.de)

Auflösung einer Arzneiform im Magen-Darm-Trakt kann on-line verfolgt werden
Das Auswerteverfahren des „Magnetic Marker Monitoring“ wurde in die Hard- und Software des biomagnetischen Messsystems der PTB integriert, so dass es jetzt möglich ist, die Auflösung einer Tablette im Magen oder Darm eines Probanden direkt auf dem Bildschirm zu verfolgen. Das erleichtert die routinemäßige Testung von Arzneiformen, so dass das Messverfahren jetzt der pharmazeutischen Industrie als Produkt angeboten werden kann.
(O. Kosch, FB 8.2, olaf.kosch@ptb.de)

Testmessungen an neuer MR-Spule für 7-Tesla-MRT
In Kooperation mit Mitarbeitern der *Rapid Biomedical GmbH*, der *Siemens AG* sowie des *Instituts für Neurobiologie*, Magdeburg, war die AG 8.11 *NMR-Messtechnik* an Messungen an Europas erstem 7-Tesla-Magnetresonanztomographen (MRT) in Magdeburg beteiligt. Ziel war die Untersuchung der elektromagnetischen Feldverteilungen einer neuartigen MR-Spule für Kopfuntersuchungen bei 7 Tesla. Die Messungen an einem PTB-Phantom dienten auch zur Validierung numerischer Feldsimulationen, die in 8.11 durchgeführt wurden. In einem zweiten Schritt wurden diese Rechnungen auf ein Computermodell des menschlichen Kopfes ausgedehnt. Die Ergebnisse zeigen klar, dass bei 7 Tesla die Gefahr lokaler Überhitzung von Körpergewebe durch HF-Deposition gegenüber aktuellen klinischen MRTs mit deutlich geringeren Feldstärken drastisch erhöht ist.
(F. Seifert FB 8.1, frank.seifert@ptb.de)

Berührungslose Messung der elektrischen Herzerregung an genetisch modifizierten Mäusen
Die Entschlüsselung des Erbguts der Maus ermöglicht die Durchführung von Modellstudien an Mäusen mit genau definierten Krankheitsbildern, bei denen jeweils nur wenige

Gene verändert wurden. Die PTB hat dazu ein Verfahren zur berührungslosen Messung des Herzmagnetfelds von Mäusen entwickelt, bei dem eine mögliche Verfälschung der Resultate durch die Betäubung der Tiere vermieden werden kann. Ähnlich wie das Elektrokardiogramm spiegelt das Magnetokardiogramm die elektrische Aktivität der Herzzellen wider. Veränderungen der Elektrophysiologie können mit dieser Messmethode direkt erfasst und charakterisiert werden. Erste Untersuchungen gemeinsam mit Ärzten des *Max Delbrück Centrums* (MDC) bilden die Grundlage der gegenwärtigen Konstruktion eines speziell für Mäuse ausgelegten Tier-scanners.
(U. Steinhoff, FB 8.2, uwe.steinhoff@ptb.de; T. Schurig, FB 7.5, thomas.schurig@ptb.de)

Entwicklung und Erprobung mikrostrukturierter Durchflusszytometer
Mikrostrukturen mit integrierten optischen, elektrischen und fluidischen Komponenten bieten Möglichkeiten zur Entwicklung neuer durchflusszytometrischer Diagnosesysteme zur Untersuchung humaner Zellen. In Zusammenarbeit mit dem *Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik* (IKMM) der *TU Berlin* wurden mikrostrukturierte Durchflusszytometer entwickelt, am IKMM gefertigt und in der AG 8.32 hinsichtlich der Strömungsverhältnisse und der hydrodynamischen Fokussierung in Mikrokanälen sowie der Empfindlichkeit beim optischen Nachweis einzelner Partikel charakterisiert. Durch Optimierung der Mikrostrukturen konnte eine zweidimensionale hydrodynamische Positionierung der Partikel und damit eine für die Differenzierung von Zellen mit hohem Durchsatz erforderliche Auflösung der Streulichtsignale erreicht werden. (J. Neukammer, AG 8.32, joerg.neukammer@ptb.de)

Softwarevalidierung nach DIN EN ISO/IEC 17025
Die Norm ISO/IEC 17025 stellt Forderungen an Software, die in Prüf- und Kalibrierlaboratorien als Prüf- und Messmittel oder als Teil von ihnen eingesetzt wird. Entsprechend der neuen Richtlinie „Validierung messtechnischer Software gemäß DIN EN ISO/IEC 17025“ werden die diesbezüglichen Forderungen aus softwaretechnischer Sicht interpretiert und in einer leicht verständlichen Form für die Anwendung in der Metrologie zusam-

mengestellt. In die Richtlinie sind auch Erfahrungen aus Softwarevalidierungen der Abteilung 7 eingeflossen.

(N. Greif, FB 8.5, norbert.greif@ptb.de)

Formmessung optischer Asphären

Ein gemeinsam mit der AG 4.21 entwickeltes Verfahren (TMS – Traceable Multi Sensor) zur hochgenauen Formmessung optischer Oberflächen wurde durch Analyse von Vergleichsmessungen mit einer hochgenauen Koordinatenmessmaschine validiert. Für die untersuchte optische Testoberfläche mit Schwankungen im Bereich von 50 µm lagen die relativen Differenzen der beiden Verfahren im Bereich von $\pm 10^{-3}$ und damit innerhalb der Unsicherheiten. Zur effizienten Berechnung der TMS-Lösung wurde ein spezielles Programmmodul entwickelt.

(C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

Bildgebendes Nahinfrarot-Reflexionsspektrometer mit ps-Zeitauflösung zur funktionellen Diagnostik des Gehirns fertiggestellt

Im Rahmen eines vom BMWA finanzierten Projekts wurde in Kooperation mit den Firmen *PicoQuant GmbH* und *Loptek Glasfasertechnik GmbH & Co. KG* ein Funktionsmuster für einen „Brain Imager“ entwickelt. Die Messung der zeitaufgelösten diffusen Reflexion, simultan bei drei Wellenlängen, erlaubt die Bestimmung von wellenlängenabhängigen Absorptionsänderungen im Gehirn, z. B. infolge einer veränderten Durchblutung oder Sauerstoffsättigung, getrennt von solchen in darüber liegenden Schichten. Ein Mapping solcher Veränderungen wird dadurch erreicht, dass das Laserlicht nacheinander zu neun Sendeoptoden geschaltet wird, während vier parallele Detektionskanäle die aus dem Kopf austretenden Photonen erfassen. Das Funktionsmuster wurde in Untersuchungen an Probanden gemeinsam mit Partnern der *Neurologischen Klinik der Charité Berlin* im Rahmen des „Berlin Neuroimaging Center“ erfolgreich eingesetzt. (H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Experimentelle Realisierung von Transmit-SENSE

Mit Transmit-SENSE wird in der Magnetresonanztomographie (MRT) ein neuartiges Verfahren bezeichnet, das es erlaubt, Magnetisie-

rungsmuster mit frei wählbarer räumlicher Verteilung anzuregen. Auf diese Weise können z. B. interessierende Teilvolumina eines ausgedehnten Messobjekts selektiv angeregt und abgebildet werden. Alternativ lässt sich die Technik benutzen, um auch mit einem räumlich inhomogenen Hochfrequenzfeld ein homogenes Magnetisierungsmuster zu erzeugen. Insbesondere der letztgenannte Grund macht das Verfahren außerordentlich interessant für die aufkommenden MRT-Geräte mit „ultrahohen“ Magnetfeldern von 7 Tesla und höher. In einer Kooperation der PTB-MR-Gruppe mit der *Bruker BioSpin GmbH* und der *Uni Freiburg* wurde Transmit-SENSE jetzt zum ersten Mal experimentell realisiert. Sowohl an einem Tier-MRT der Fa. *Bruker* als auch am 3-Tesla-Human-MRT der PTB wurde die Technik erfolgreich implementiert und bereits für eine Probandenmessung genutzt.

(F. Seifert FB 8.1, frank.seifert@ptb.de)

Über zwei Millionen Menschen haben elektronisch gewählt

Bei der Wahl zum Deutschen Bundestag am 18. September 2005 haben mehr als zwei Millionen Menschen ihre Stimme an über 1300 elektronischen Wahlgeräten abgegeben. Alle eingesetzten Geräte gehören zu Bauarten, die in der PTB einer gründlichen Prüfung unterzogen worden waren.

(N. Greif, FB 8.5, norbert.greif@ptb.de)

Neue Spielverordnung verabschiedet

Nach einem siebenjährigen Vorbereitungs- und Abstimmungsprozess ist eine neue Spielverordnung von der *Bundesregierung* und dem *Bundesrat* verabschiedet worden, die zum 1. Januar 2006 in Kraft tritt. Der Novellierung der Spielverordnung liegt ein von der PTB entwickeltes technisches Konzept zu Grunde. Parallel zum politischen Abstimmungsprozess sind in der PTB ein darauf abgestimmtes neuartiges Prüfkonzept für Spielgerädebauarten entwickelt sowie eine technische Richtlinie und ein Merkblatt für Antragsteller erarbeitet und herausgegeben worden. Damit hat die Industrie die Möglichkeit, sich rechtzeitig auf die neuen technischen Anforderungen und Vorgehensweisen einzustellen.

(D. Richter, FB 8.5, dieter.richter@ptb.de;

T. Bronder, FB 8.5, thomas.bronder@ptb.de)

Monitoring der Krebstherapie mit SQUIDs

Mit dem Verfahren der SQUID-Magnetrelaxometrie wurde die Verteilung und Konzentration magnetischer Nanopartikel im Tumor eines Kaninchens gemessen. Diese Untersuchung wurden in Zusammenarbeit mit der *HNO-Klinik der Uni Erlangen* durchgeführt, in der das so genannte Magnetische Drug Targeting zur örtlich begrenzten Chemotherapie mittels magnetisch markierter Arzneistoffe entwickelt wird. (F. Wiekhorst, FB 8.2, frank.wiekhorst@ptb.de)

Erkennung von Tumorstufen im Dickdarm

Durch Umbau und Erweiterung eines kommerziellen Endoskops wurde ein Gerät zur gleichzeitigen Erfassung des reflektierten Kaltlichtes einer Xenon-Hochdrucklampe sowie der laserinduzierten Fluoreszenzstrahlung zur Detektion von Tumorstufen im Dickdarm entwickelt. Die Tumorstufen werden anhand der erhöhten Fluoreszenz des körpereigenen Fluorophors (Protoporphyrin IX) erkannt. Das Reflexionsbild wird transparent mit dem verrechneten Fluoreszenzbild unter Festlegung eines Schwellenwerts überlagert, so dass Areale erhöhter Fluoreszenz markiert werden. Dadurch wird die Voraussetzung geschaffen, gezielt und schnell Biopsien aus verdächtigen Arealen entnehmen zu können.

(B. Ebert, FB 8.3, bernd.ebert@ptb.de)

Zusammenhang zwischen Angstzuständen und Neurochemie des Hippocampus

In Zusammenarbeit mit der *Universitätsmedizin Charité*, Berlin, wurde bei 38 gesunden Kontrollpersonen ein Zusammenhang zwischen der Konzentration des Neuromarkers N-Acetylaspartat (NAA) im Hippocampus des Gehirns mit bestimmten genetischen Variationen des Serotonin-Transporters gefunden. Letztere werden wiederum mit dem Auftreten von Angstzuständen in Verbindung gebracht. Die Konzentration des NAA in vivo wurde mittels eines in der PTB entwickelten magnetresonanzspektroskopischen Verfahrens bei 3 Tesla bestimmt. (F. Schubert, FB 8.1, florian.schubert@ptb.de)

Durchflusszytometrische Zellzählung im Liquor

Im Vergleich zu Blutproben sind die Konzentrationen weißer und roten Blutzellen im Liquor um mehrere Dekaden geringer. Bei

gesunden Erwachsenen beträgt die Leukozytenkonzentration nur $1 \mu\text{L}^{-1}$ bis $5 \mu\text{L}^{-1}$, Erythrozyten sollten im Liquor Gesunder nicht nachweisbar sein. Durchflusszytometrische Routineverfahren sind für die Zellzählung im Liquor nicht geeignet, daher wird in der klinischen Liquor-Diagnostik nahezu ausschließlich die manuelle mikroskopische Zellzählung eingesetzt, mit dem Nachteil des hohen Personalaufwands und der hohen Messunsicherheit wegen der geringen Anzahl der beobachteten Zellen. Die in der PTB entwickelten Referenzverfahren zur Zellzählung in Blutproben wurden erstmals erfolgreich zur Konzentrationsbestimmung roter und weißer Blutzellen im Liquor bei Ringversuchen zur Liquor-Diagnostik eingesetzt. (J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

Biometrie mittels Herzsignalen

Basierend auf der EKG-Datenbank der PTB wurde eine Studie zur Untersuchung der prinzipiellen Eignung von Herzsignalen zum Einsatz in der Biometrie durchgeführt. Hierzu wurde ein EKG-Testdatensatz unter der Maßgabe von in der Praxis einfach durchführbaren Messungen zusammengestellt. Als Ergebnis wurden hervorragende Fehlerraten von unter 3 % für die Identifikation bzw. Verifikation von Personen erreicht. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de)

WELMEC-Leitfaden 7.2 „Software“ verabschiedet

Das WELMEC-Komitee hat im Jahre 2005 einen Leitfaden zu Software (WELMEC-Guide 7.2) verabschiedet. Dieser Leitfaden wurde unter Federführung der PTB entwickelt. Mit der Verabschiedung ist ein wichtiger Beitrag zur Harmonisierung der Zertifizierung von gesetzlich geregelten Messgeräten in Europa erfolgt.

Im Zuge der Übertragung des neuen WELMEC-Leitfadens 7.2 (Software) auf die national geregelten Messgerätearten sind in der PTB erstmals Risikoklassen für die Software in allem geregelten Messgerätearten definiert worden. Damit ist eine wichtige Grundlage für die transparente Festlegung des erforderlichen Manipulationsschutzes und der zum Nachweis anzusetzenden Prüftiefe gelegt worden.

(D. Richter, FB 8.5, dieter.richter@ptb.de; U. Grottker, FB 8.5, ulrich.grottker@ptb.de)



Wissenschaftlich- technische Querschnittsaufgaben

Berichte der Abteilungen

Abteilung

Wissenschaftliche technische Querschnitt

Die Abteilung Q unterstützt die Fachabteilungen durch wissenschaftliche, technische und infrastrukturelle Dienstleistungen. Zu ihren Aufgaben gehört auch die wissenschaftliche und technische Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern.

Die technischen und infrastrukturellen Dienstleistungen zur Unterstützung der Fachabteilungen, die den Schwerpunkt der Tätigkeiten in der Abteilung Q ausmachen, eignen sich naturgemäß weniger für eine Berichterstattung in diesem Rahmen. Daher stehen auch in diesem Jahr wieder Arbeiten in den drei Geschäftsbereichen *Grundlagen der Metrologie*, *Metrologie für die Gesellschaft* und *Internationale Angelegenheiten* im Mittelpunkt dieses Berichts.

Grundlagen der Metrologie

Die im Fachbereich Q.2 *Theoretische Grundlagen* behandelten Themen stammen hauptsächlich aus dem Gebiet der theoretischen Festkörperphysik im Hinblick auf die Quantenmetrologie. Andere resultieren aus praktischen Fragestellungen, wie die Auswertung

von Messungen und die Ermittlung von Messunsicherheiten. Zwei der wichtigsten metrologischen Dokumente der letzten zehn Jahre sind der Leitfaden „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) sowie das „Internationale Wörterbuch der Metrologie“ (VIM). Die Pflege beider Dokumente erfolgt durch das *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM), dessen Vorsitzender der Direktor des BIPM ist. Beide Dokumente, VIM und GUM, werden von den wichtigsten internationalen wissenschaftlichen Organisationen wie der *International Union of Pure and Applied Physics* (IUPAP) und der *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) getragen. Mitarbeiter dieser und anderer internationaler Organisationen sowie metrologischer Staatsinstitute bilden zwei Arbeitsgruppen, eine zuständig für das VIM, die andere für die Erstellung von Begleitdokumenten zum GUM. Zurzeit wird das VIM überarbeitet, während ein erstes Ergänzungsdokument zum GUM über die Anwendung der Monte-Carlo-Methode bei der Auswertung von Messdaten international zur Diskussion gestellt ist. Die PTB ist in beiden Arbeitsausschüssen durch einen Mitarbeiter aus der Abteilung Q vertreten.

Fragestellungen aus dem Fachgebiet *Auswertung von Messungen* ergeben sich z. B. bei der Messung von Neutronenspektren, wo häufig Bonnerkugel-Spektrometer eingesetzt werden. Die Bestimmung des Spektrums aus den mit dem Spektrometer gewonnenen

Titelbild
Netz der Versorgungsleitungen auf dem Gelände
der PTB Braunschweig
blau: Kaltwasser
rot: Heizung
grün: Fernmelde-/Datenkabel



haftlich- tsaufgaben

Daten stellt ein schlecht gestelltes inverses Problem dar, das nicht ohne Rückgriff auf Vorwissen gelöst werden kann. Zur Verknüpfung neuer und vorhandener Information nutzt man das Bayessche Theorem. Hiermit konnte die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Neutronenspektrums bestimmt werden. Es zeigte sich, dass das mit Hilfe der bislang genutzten Maximum-Entropie-Methode berechnete Neutronenspektrum mit dem wahrscheinlichsten Neutronenspektrum dieser Bayesschen Analyse übereinstimmt. Mittels einer Bayesschen Evidenzanalyse konnte weiterhin der wahrscheinlichste Wert für den Regularisierungsparameter bestimmt werden, der das Vorwissen gewichtet. Damit ist es nun möglich, die Güte des zugrunde liegenden Modells zu quantifizieren. Für die Berechnung der Unsicherheit konnte bislang nur die Kovarianzmatrix der Messwerte herangezogen werden. In einem nächsten Schritt soll zusätzlich auch die Kovarianzmatrix der Antwortfunktion des Spektrometers berücksichtigt werden.

Zu den theoretischen Grundlagenfragen gehören die Beschreibung des Quantentunnelns sowie neuere Probleme beim Quanten-Hall-Effekt. Die Entdeckung von Zuständen mit verschwindendem elektrischen Widerstand im Quanten-Hall-System unter Mikrowelleneinstrahlung hat eine große Zahl von experimentellen und theoretischen Arbeiten ausgelöst. Zwei konkurrierende theoretische Ansätze zur Beschreibung der Experimente

haben sich bisher herauskristallisiert: Beim ersten werden die strahlungsinduzierten Nullstellen im spezifischen Widerstand als eine Folge der Unordnungsstreuung der durch die Mikrowelle angeregten Elektronen verstanden, die auf Grund der unordnungsverbreiteten Energiestruktur der Landau-niveaus zum Widerstand in einer oszillatorischen Weise beiträgt. In einem zweiten Ansatz werden dagegen die Strukturen im Widerstand auf eine oszillierende Nichtgleichgewichtsverteilung der Elektronen zurückgeführt. Diese Situation erfordert eine sorgfältige Analyse der mikroskopischen Grundlagen beider Theorien. Daher wurde der Ausdruck für die Leitfähigkeit in Anwesenheit von Mikrowellen aus den Gleichungen der linearen Antworttheorie neu hergeleitet, und zwar in einer Störungsentwicklung nach der Amplitude des elektrischen Mikrowellenfelds. Damit gelang es, in tiefster (zweiter) Ordnung, einige wichtige Aspekte des Experiments wiederzugeben. Darüber hinaus konnten allgemeine Eigenschaften höherer Ordnung diskutiert werden.

Während die Hall-Leitfähigkeit in Quanten-Hall-Systemen mit sehr geringer Unsicherheit bekannt ist und daher schon lange für metrologische Anwendungen genutzt wird, gilt dies nicht für die longitudinale Leitfähigkeit σ an den kritischen Punkten zwischen den einzelnen Hall-Plateaus. Aufgrund früherer feldtheoretischer Untersuchungen wurde für diese Punkte ein Wert $\sigma_c = 1/2 \cdot e^2 h$ vorherge-

sagt und später in einigen Experimenten bestätigt. Numerische Berechnungen des kritischen Leitwerts ergaben jedoch $g_c = 0,6 e^2/h$. Da a priori nicht klar ist, ob Leitwert und Leitfähigkeit an kritischen Punkten in zweidimensionalen Systemen identisch sind, wurde nun auch die Kubo-Leitfähigkeit berechnet und im Rahmen der numerischen Unsicherheit eine Übereinstimmung mit dem Leitwert gefunden. Die Ursache für die Diskrepanz mit den feldtheoretischen Vorhersagen liegt vermutlich in der Vernachlässigung wichtiger Korrelationen, welche die multifraktalen Eigenzustände an kritischen Punkten aufweisen und die in den numerischen Berechnungen berücksichtigt wurden.

Ein detailliertes Studium des Quantentunnels erfordert Methoden, die über die Störungstheorie hinausgehen. Das Doppelmulden-Potential liefert dafür ein ausgezeichnetes Beispiel: Die Energie-Lücke zwischen Grundzustand und erstem angeregten Zustand wird für große Kopplungskonstanten auf nicht-analytische Weise exponentiell klein. Perturbative Methoden versagen im Allgemeinen in solchen Fällen. Daher wurde quantitativ geprüft, wie gut die funktionale Renormierungsgruppe in diesem Fall anwendbar ist. Ursprünglich wurden Renormalisierungsgruppentechniken vor allem zur Beschreibung von Phasenübergängen erfolgreich eingesetzt. Die Anwendung auf niedrigdimensionale Systeme, in denen zwar keine Phasenübergänge, dafür aber andere Singularitäten auftauchen, ist relativ neu. Insbesondere müssen für solche Fälle geeignete Näherungsverfahren zur Lösung von Funktional-Differentialgleichungen entwickelt werden. In den untersuchten Beispielen (anharmonischer Oszillator, symmetrische Doppelmulde sowie verschiedene asymmetrische Doppelmulden) können die Ergebnisse mit unabhängigen numerischen Lösungen verglichen werden. Auf diese Weise lassen sich Erfahrungen sammeln, wie sich die verschiedenen Näherungsverfahren verhalten.

Metrologie für die Gesellschaft

Die Europäische Messgeräte Richtlinie 2004/22/EG (Measuring Instruments Directive, MID) muss bis zum 30. April 2006 in nationales Recht umgesetzt werden. Unter Federführung des *Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit* hat die PTB – teilweise in

Zusammenarbeit mit den betroffenen Kreisen – mehrere Abschnitte eines künftigen Gesetzes über das Mess- und Eichwesen sowie einer entsprechenden Verordnung gestaltet. Wesentliche Beiträge betreffen technisch-rechtliche Querschnittsaspekte und die technischen Anforderungen an einzelne Messgerätearten, für die Baumusterprüfungen durchzuführen sind. In Anpassung an moderne Technologien wurde veranlasst, dass die Rechtsvorschriften nicht nur auf Messgeräte beschränkt werden, sondern auch Messungen in komplexen Messsystemen mit verteilten Komponenten erfassen, um die für den Bürger relevanten Messergebnisse lückenlos rückverfolgbar zu sichern. Diese Harmonisierungsarbeit wurde durch Mitarbeit und Vorsitz in verschiedenen nationalen und europäischen Arbeitsausschüssen in Zusammenarbeit mit den betroffenen Behörden und der Industrie geleistet. Durch die Zusammenarbeit in der *European Cooperation in Legal Metrology* (WELMEC) wurde eine Vielzahl von Themen auf der Grundlage der Messgeräterichtlinie diskutiert und harmonisiert, wobei durch die Mitarbeit der PTB die Erfahrungen in Deutschland eingebracht werden konnten. Die Zusammenarbeit von WELMEC und OIML (*Organisation Internationale de Métrologie Légale*) hat für Europa zunehmende Bedeutung erlangt, da von den internationalen Empfehlungen der OIML normative Dokumente im Sinne der Messgeräte abgeleitet werden, die von den Herstellern alternativ zu harmonisierten europäischen Normen verwendet werden können.

Zur Vorbereitung auf die neuen Rechtsvorschriften haben verschiedene Veranstaltungen mit Moderatoren und Referenten aus der PTB stattgefunden, um die betroffenen Behörden, die Konformitätsbewertungsstellen sowie die Hersteller und Verwender von Messgeräten rechtzeitig über die unterschiedlichen Auswirkungen zu informieren. Unter der Schirmherrschaft von D-A-CH im gesetzlichen Messwesen wurde für den deutschsprachigen Raum (Deutschland, Österreich, Schweiz) eine gemeinsame Informationsveranstaltung durchgeführt.

Zur weiteren Vorbereitung hat die PTB-Zertifizierungsstelle für Messgeräte ein eigenes Qualitätsmanagementsystem eingeführt, das den Anforderungen der europäischen

Normen an Zertifizierungsstellen für Produkte und für QM-Systeme entspricht. Für die künftigen Anerkennungsverfahren wurden bereits erste Probeaudits bei Messgeräteherstellern durchgeführt. Die Auditteams wurden aus qualifizierten Auditoren und Fachexperten der PTB und der Eichbehörden zusammengesetzt.

Unter den Stichworten „Partner des Mittelstandes“ und „Technologietransfer“ hat die PTB auf der CeBit 2005 der Öffentlichkeit neue Datenbanken vorgestellt. Mit diesem Internetportal zum Technologietransfer werden die verfügbaren PTB-Technologien in den Branchen Messtechnik, Halbleiter, Sicherheitstechnik und Medizintechnik angeboten. Die für Kontakte zuständigen Ansprechpartner werden ebenfalls angezeigt. Zur Intensivierung der regionalen Kooperationen mit Industriefirmen dienen auch Veranstaltungen mit Existenzgründern und Unternehmern.

Internationale Angelegenheiten

Der Schwerpunkt der Aktivitäten der Abteilung Q im Geschäftsbereich *Internationale Angelegenheiten* liegt im Bereich der *Technischen Zusammenarbeit* (TZ). Durch Projekte zum Auf- und Ausbau der Qualitätsinfrastruktur und deren Komponenten Mess-, Normen-, Prüf- und Qualitätswesen, Akkreditierung und Zertifizierung (MNPQ) werden die Voraussetzungen für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung verbessert und Entwicklungsländern die Teilnahme

am Welthandel erleichtert. Diese Ziele werden zunehmend durch regionale Projekte verfolgt, die die Realisierung regionaler Märkte unterstützen und den Aufbau regionaler MNPQ-Strukturen fördern. Von den insgesamt 28 vom *Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung* (BMZ) finanzierten Projekten verfolgen elf einen regionalen oder sektoralen Ansatz

Wie auch in den vergangenen Jahren erfolgt eine Zusammenarbeit mit den ehemaligen Ländern der Sowjetunion mit finanzieller Unterstützung des *Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit*. Intensive Arbeitsbeziehungen sind mit Kasachstan, Georgien und der Ukraine zu verzeichnen. Durch ein EU-finanziertes so genanntes Twinning-Projekt wird Litauen im Bereich Metrologie in der Chemie gefördert.

Neben der Projektarbeit wurden Instrumente der TZ weiter entwickelt. Zur Anpassung an das neue Auftrags- und Berichtsverfahren des BMZ sind neue Arbeitshilfen entwickelt und dokumentiert worden. Als Reaktion auf die Schwerpunkt- und Programmorientierung der deutschen Entwicklungszusammenarbeit wurde die Strategie des Fachbereichs Q.5 *Technische Zusammenarbeit* weiter ausgearbeitet, die den beteiligten Partnern die Bedeutung von MNPQ zur Erreichung der jeweiligen Ziele deutlich macht. Der Fachbereich hat zur Publikation dieser Ziele einige Broschüren in mehreren Sprachen gestaltet (Bild 1).



Bild 1:
PTB-Broschüren zu Themen der Technischen Zusammenarbeit

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Funktionale Renormalisierungsgruppe und Quantentunneln

Quantentunneln in Einteilchen-Systemen wird mit Hilfe eines Renormierungsgruppenverfahrens untersucht. Gewonnen werden dadurch Einsichten in die Anwendbarkeit unterschiedlicher Renormierungsgruppen-gleichungen. (M. Weyrauch, FB Q.2, michael.weyrauch@ptb.de)

Fraktionale Minima in der Leitfähigkeit des Quanten-Hall-Systems unter Mikro-welleneinstrahlung

Wir analysieren die Grundlagen der mikro-skopischen Theorie für die Experimente. (W. Apel, FB Q.2, walter.apel@ptb.de; M. Weyrauch, FB Q.2, michael.weyrauch@ptb.de)

Universelle Leitfähigkeit an quanten-kritischen Punkten

Quantenmechanische Berechnungen der elektrischen Transporteigenschaften an kritischen Punkten eines Quanten-Hall-Systems ergaben eine Übereinstimmung von kritischem Leitwert und longitudinaler Leitfähigkeit mit einem universellen Wert $0,6 e^2/h$. (L. Schweitzer, FB Q.2, ludwig.schweitzer@ptb.de)

Bayesscher Ansatz zur Entfaltung von Neutronenspektren aus Messungen mit Bonnerkugeln

Die Entfaltung von Neutronenspektren aus den Zählraten eines Bonnerkugel-Spektrometers stellt ein inverses Problem dar, das mit dem Bayesschen Theorem behandelt wird. (D. Sibold, FB Q.2, dieter.sibold@ptb.de)

Netzgestützte Metrologie

Das virtuelle Test-Labor „VirTeL“ (auch „Kollaboratorium“ genannt) wird zunehmend von Wissenschaftlern genutzt, um jederzeit den korrekten Betrieb ihrer Anlagen oder Experimente zu überwachen. (K. Guckelsberger, FB Q.4, kurt.guckelsberger@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Datenbank für Zertifikate nach dem Eichgesetz (MiCert)

Am 1.1.2005 wurde eine neue Internet-Datenbank für Zulassungsdokumente nach dem Eichgesetz „MiCert (Measuring Instruments Certificates)“ in Betrieb genommen. (H. Stolz, FB Q.3, harry.stolz@ptb.de)

Qualitätsmanagementsystem in der Zertifizierungsstelle Messgeräte

In der Zertifizierungsstelle für Messgeräte wurde ein QM-System eingeführt, das den Normen DIN EN 45011 „Allgemeine Anforderungen an Stellen, die Produktzertifizierungssysteme betreiben“ und DIN EN 45012 „Allgemeine Anforderungen an Stellen, die Qualitätsmanagementsysteme begutachten und zertifizieren“, entspricht. (H. Stolz, FB Q.3, harry.stolz@ptb.de)

Vollversammlung für das Eichwesen

In einer jährlich stattfindenden und einer zusätzlichen Veranstaltung stimmte die Vollversammlung über die Entwürfe zu den Anlagen einer neuen Verordnung über das Mess- und Eichwesen ab. (C. Mengersen, FB Q.3, christian.mengersen@ptb.de)

Statistische Daten zu den staatlich anerkannten Prüfstellen

Die staatlich anerkannten Prüfstellen für Messgeräte für Elektrizität, Gas, Wasser und Wärme haben durch Stichprobenprüfungen zur Verlängerung der Eichgültigkeitsdauer dazu beigetragen, dass die meisten Zähler weiter in den Versorgungsnetzen verwendet werden können. (C. Mengersen, FB Q.3, christian.mengersen@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Technologietransfer durch internationale Patente

Wegen des zu erwartenden wirtschaftlichen Nutzens wurden internationale Patente in den Bereichen Oberflächenmesstechnik, Medizintechnik, Telekommunikation und Halbleitertechnik angemeldet. (B. Smandek, FB Q.3, bernhard.smandek@ptb.de)

Leitbild zum Technologietransfer

Mit einem Leitbild definiert die PTB ihr Verständnis vom Technologietransfer zum Nutzen der Industrie und zur Motivation der Wissenschaftler und Ingenieure. (B. Smandek, FB Q.3, bernhard.smandek@ptb.de)

MELODI

Sowohl die Bearbeitung von Spielgeräten als auch Vorgänge nach dem OIML-Zertifizierungssystem wurden in SAP-MELODI aufgenommen. Die Online-Datenbank für Zertifikate MICert wurde für den internationalen Zugriff um eine englische Version erweitert. (R. Ohl, FB Q.4, rainer.ohl@ptb.de)

Mittelstandsforum (KMU)

Das PTB-Portal wurde fertig entwickelt und auf der CeBit 2005 vorgestellt. Drei Datenbanken geben online Auskunft über die Aktivitäten der PTB für den Mittelstand in den Bereichen Kalibrier- und Messmöglichkeiten, Gremienarbeit sowie Patente zur Verwertung. (K. Guckelsberger, FB Q.4, kurt.guckelsberger@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten**TZ mit Balkanländern**

Das BMZ hat Mittel für ein Neuprojekt in Albanien bereitgestellt, mit denen der Aufbau eines nationalen Metrologieinstituts durch die PTB unterstützt werden soll. In Bulgarien wird die Konzipierung und Planung des Baus eines neuen Metrologie-Instituts mit EU-Mitteln gefördert, dabei werden Experten der PTB in einem Konsortium mit *ICON Public*, Köln, Beratungsleistungen durchführen. (H.-D. Velfe, FB Q.5, hans-dieter.velfe@ptb.de)

EU-Twinning-Projekt zur Fertigpackungskontrolle und zum Qualitätsmanagement metrologischer Einrichtungen in Litauen

Die PTB hat zwischen September 2004 und März 2005 litauische Eichämter und nationale Metrologieinstitutionen bei der praktischen Umsetzung der EU-Richtlinien auf dem Gebiet der Fertigpackungskontrolle sowie durch Beratungen zum nationalen Messwesen unterstützt. (H.-D. Velfe, FB Q.5, hans-dieter.velfe@ptb.de)

Metrologische Basisarbeit der PTB in Westafrika wird fortgesetzt

Das seit 2001 laufende Projekt zum Aus- und Aufbau nationaler und regionaler Strukturen des Mess- und Prüfwesens in zehn Ländern Westafrikas wurde vom BMZ um weitere drei Jahre bis 2007 verlängert. (U. Diekmann, FB Q.5, ulrich.diekman@ptb.de)

PTB erbringt Beitrag zur Qualitätssicherung von Agrarprodukten in Ghana

Ziel des neuen Vorhabens mit Ghana ist die Bereitstellung und Nutzung nachfragegerechter messtechnischer Dienstleistungen zur Qualitätssicherung von Agrarprodukten. Hintergrund ist die fehlende internationale Anerkennung lokaler Prüfzertifikate. (U. Diekmann, FB Q.5, ulrich.diekman@ptb.de)

World Metrology Day 2005 im südlichen Afrika

Gemeinsam mit der regionalen Metrologieorganisation im südlichen Afrika (SADC-MET) hat die PTB ein Poster geschaffen, um den World Metrology Day am 20. Mai 2005 im südlichen und östlichen Afrika unter ein gemeinsames Thema, nämlich die Bedeutung der Metrologie für kleine und mittlere Unternehmen, zu stellen. Ergänzend wurden die nationalen Metrologieinstitute mit Vorlagen für entsprechende Pressenotizen unterstützt. (K. Stoll-Malke, FB Q.5, kai.stoll-malke@ptb.de)

Neues EU-Twinning-Projekt mit Jordanien

Die PTB ist in einem Konsortium mit der *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung* (BAM) und dem *Deutschen Institut für Normung* (DIN) für die Implementierung der Metrologiekomponente des EU-Twinning-Projekts „Strengthening of the *Jordan Institution for Standards and Metrology*, for its Compliance with the EU-Jordan Association Agreement“ verantwortlich. (K. Stoll-Malke, FB Q.5, kai.stoll-malke@ptb.de)

Metrologie-Leitfaden als Hilfe für kleine und mittlere Unternehmen im südlichen Afrika

Im Rahmen der Unterstützung der Entwicklungsgemeinschaft des südlichen Afrikas (SADC) entwickelte die PTB gemeinsam mit dem südafrikanischen *Ministerium für Wirt-*

schaft und Industrie einen Leitfaden für kleine und mittlere Unternehmen, um deren Messtechnik zu verbessern. Die Erstellung des Leitfadens wird als eine Maßnahme zur Verbesserung der zielgruppennahen Vernetzung und Aufklärung betrachtet. (K. Stoll-Malke, FB Q.5, kai.stoll-malke@ptb.de)

Technische Zusammenarbeit mit Madagaskar

Die PTB unterstützt madagassische Qualitätsinfrastruktur(QI)-Institutionen durch eine Heranführung an die QI-Fachnetzwerke der Südafrikanischen Entwicklungsgemeinschaft SADC. (S. Wallerath, FB Q.5, stefan.wallerath@ptb.de)

Argentinien im „Club der Global Player“

Die argentinische Akkreditierungsstelle OAA (*Organismo Argentino de Acreditación*) hat die „Gegenseitige Anerkennungsvereinbarung“ (MLA) mit ILAC (*International Cooperation for Laboratory Accreditation*) und IAF (*International Accreditation Forum*) unterzeichnet. Diese internationale Anerkennung setzt den erfolgreichen Schlusspunkt unter ein TZ-Projekt der PTB zur Unterstützung des argentinischen Qualitätssystems. (U. Flach, FB Q.5, ursula.flach@ptb.de)

Unterstützung der Fachabteilungen

Datennetz

Die Gigabit-Ethernet-Verbindung zwischen den Standorten Braunschweig und Berlin wurde eingerichtet. (H.-J. Herrmann, FB Q.4, juergen.herrmann@ptb.de)

Datensicherung von Lotus-Domino-Datenbanken über das Storage-Area-Network (SAN)

Die Speicherkapazität und die Zahl der Switch-Ports der Storage-Area-Network-Infrastrukturen an den Standorten Braunschweig und Berlin wurden erweitert. Damit kann die Datensicherung eines der Lotus-Domino-Server nun direkt über das SAN durchgeführt werden.

(Dieter Sibold, FB Q.4, dieter.sibold@ptb.de)

201. PTB-Seminar: Einsatz von SAP im öffentlichen Bereich

Nach fünfjähriger Erfahrung mit SAP und der Einführung von vielen SAP-Modulen wurde das 201. PTB-Seminar zum Erfahrungsaustausch zwischen Behörden, die SAP einsetzen, genutzt.

(Rainer Ohl, FB Q.4, rainer.ohl@ptb.de)

Aufbau eines Pilotsystems für die Langzeitarchivierung von elektronisch signierten Dokumenten

Im Rahmen des BundOnline-2005-Projekts „ArchiSafe“ (Langzeitarchivierung) werden die Grundlagen für eine kostengünstige und skalierbare elektronische Archivlösung definiert und in Form eines Pilotsystems realisiert. (S. Hackel, FB Q.4, siegfried.hackel@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 DKD größtenteils auf die Ebene der industriellen Messtechnik verlagert. Diese Entlastung ermöglicht es den PTB-Laboratorien, sich auf hochgenaue Kalibrierungen zu beschränken, damit Forschungsarbeiten und gesetzliche Aufgaben konzentriert bearbeitet werden können.

Die Sicherstellung der Qualität der externen Kalibrierungen ist über den DKD gegeben. Die 372 DKD-akkreditierten Kalibrierlaboratorien (Stand 10/2005) werden kompetent überwacht und durch den DKD in wichtigen nationalen und internationalen Gremien vertreten, wobei die Ausrichtung der messtechnischen Anforderungen innerhalb der PTB abgestimmt wird. Die Orientierung an den Interessen der beteiligten Wirtschaftskreise wird durch den DKD-Beirat und über die elf DKD-Fachausschüsse sichergestellt.

Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien stellten im Jahr 2004 etwa 300 000 DKD-Kalibrierscheine für Kunden aus dem In- und Ausland aus. Diese DKD-Kalibrierscheine sind ein Nachweis für die messtechnische Rückführung auf nationale oder internatio-

nale Normale. Die Zahl der durch DKD-Laboratorien erstellten Werkskalibrierscheine liegt etwa bei 2 Millionen pro Jahr. Der jährliche Umsatz dieser Laboratorien mit internen und externen Kalibrierdienstleistungen wird auf etwa 150 Mio. Euro geschätzt.

Vor dem Hintergrund der Globalisierung der stark exportorientierten deutschen Wirtschaft soll auch zukünftig gewährleistet sein, dass DKD-Kalibrierscheine weltweit anerkannt werden.

Da die Unternehmen der Messtechnik und somit auch die DKD-akkreditierten Laboratorien überwiegend im Bereich kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) angesiedelt sind, besteht weiterhin die Notwendigkeit der Vertretung durch eine von privatwirtschaftlichen Interessen unabhängige Stelle, für die Kompetenz in der Messtechnik eine hohe Bedeutung hat.

Der DKD ist mit derzeit etwa 330 akkreditierten Kalibrierlaboratorien in Deutschland ein wesentlicher Bestandteil des Technologietransfers auf dem Gebiet der Metrologie. Weitere 40 Laboratorien (z. T. Staatsinstitute) wurden im Ausland – meist im Rahmen eines Projekts der Technischen Zusammenarbeit (TZ) – durch den DKD akkreditiert und erhalten durch die Bestätigung ihrer messtechnischen Kompetenz einen besseren Marktzugang.

Qualitätsma

Anerkennung QM-System

Im Rahmen des CIPM-MRA konnten die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB in den Metrologiegebieten Länge, Ionisierende Strahlung sowie Zeit und Frequenz nach erfolgreichem internationalen Bewertungsverfahren („peer review“) ausgebaut bzw. bestätigt werden. Die internationale Anerkennung in allen anderen Metrologiegebieten bleibt unverändert aufrechterhalten. Voraussetzung hierfür war der Nachweis eines funktionierenden QM-Systems. Der diesjährige QM-Nachweis erfolgte durch Berichterstattung des Qualitätsmanagers der PTB auf der 12. Sitzung des Technischen Komitees für Qualität von EUROMET in Bukarest.

Ein bedeutsamer Meilenstein der nationalen Anerkennung bildete die 25. Arbeitsbesprechung der QM-Verantwortlichen der PTB. Sie wurde im März 2005 im Institut Berlin durchgeführt. Im Mittelpunkt standen die Ergebnisse nach Einführung und Realisierung des QM-Systems entsprechend ISO/IEC 17025 und der damit verbundenen neuen QM-Organisation. Der von der PTB eingeschlagene Weg hinsichtlich eines fachbezogenen und angemessenen QM-Systems fand auf dieser Arbeitsbesprechung durch das übergeordnete *Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit* ausdrücklich Würdigung und Bestätigung. Die vom Gesetzgeber geforderten Akkreditierungen bzw. Anerkennungen konnten unverändert aufrechterhalten bleiben, d. h. das QM-System der PTB bleibt von den entsprechenden Stellen weiterhin anerkannt.

Integration IT-Infrastruktur

Das QM-System der PTB fand seine Erweiterung für die Dienstleistungen der IT-Infrastruktur für die Standorte Braunschweig und Berlin auf der Basis spezifischer IT-Anforderungen und der ISO/IEC 17025. Diese Verknüpfung war ein wichtiger Schritt hinsichtlich der Stärkung der internen Kundenorientierung auch im Bezug auf IT-spezifische Fragestellungen z. B. zu Betrieb und Wartung der Datennetze, Management der integrierten Datenbankanwendungen, IT-Sicherheit oder auch IT-Fortbildung. In diesem Jahr erfolgten bereits erste erfolgreiche fachliche Audits zu einigen Themen der IT-Infrastruktur und regten Verbesserungen an.

Interne Audits

Audits werden in der PTB bereits seit 1995 durchgeführt. Sie haben sich zusammen mit dem QM-System der PTB in Richtung eines gezielten Verbesserungsmanagements weiterentwickelt. Insbesondere bei internen Audits steht dabei der fachliche Erfahrungsaustausch im Vordergrund. Durch die bewährte Teilnahme externer Auditoren der deutschsprachigen nationalen Metrologieinstitute Österreichs und der Schweiz konnte wie schon im vergangenen Jahr dieser Erfahrungsaustausch über die Landesgrenzen hinaus erweitert und die gegenseitige Vertrauensbildung vor dem Hintergrund des CIPM-MRA gefördert werden. Diese Vorgehensweise konnte einer breiten Öffentlichkeit in einem EUROMET-Workshop vorgestellt werden.

anagement

Erstmals fanden in diesem Jahr in den Fachabteilungen neben den bewährten Audits im Bereich Kalibrieren/Prüfen auch Audits in der Forschung und Entwicklung (F&E) und bei Produktzertifizierungen statt. Zusätzlich ergänzten erstmals in einigen besonders stark durch Kalibrierdienstleistungen nachgefragten Laboratorien Audits zur Qualitätspolitik im Sinne der Einhaltung des Subsidiaritätsprinzips das Auditprogramm. Im Ergebnis dieser Audits erfolgte in diesen Bereichen eine Aufgabenkritik und perspektivische Schwerpunktbildung, um den Kundenwünschen nach entsprechenden metrologischen Dienstleistungen auch in Zukunft entsprechen zu können.

Aufgabenbezogene Forschung und Entwicklung sind in der PTB eng mit ihren Kalibrier- und Prüftätigkeiten verbunden. Das QM-System schließt daher entsprechende F&E-Aufgaben im Sinne der „Selbsterklärung“ zur Einhaltung der ISO/IEC 17025 und der Empfehlungen der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zur guten wissenschaftlichen Praxis ein. Im Rahmen der Audits konnte das QM-Bewusstsein der Mitarbeiter in diesen Bereichen geschärft werden und Verbesserungen z. B. zu den Themen Messdatensicherung, Erstellung von Messunsicherheitsbudgets und angemessene messtechnische Rückführung der verwendeten Messgeräte angeregt werden.

Die Audits im Bereich Produktzertifizierungen unter teilweiser Beteiligung der neu gegründeten Zertifizierungsstelle für Messgeräte führten vor dem Hintergrund der geltenden Normen und Gesetze zu einer kritischen Betrachtung der PTB-Umsetzung der geforderten formalen Trennung von Prüfung und Zertifizierung. Im Ergebnis dieser Audits werden Lösungen erarbeitet und Prozesse vervollkommen, die dem Kunden der PTB weiterhin ein Höchstmaß an fachlicher Kompetenz unter Wahrung der geltenden Gesetze und Normen zur Verfügung stellen werden.

PTB

Die Anlagen

Kuratorium

Mitglieder

Präsident des Kuratoriums

Ministerialdirektor Dr. jur. Eckhard Franz
Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit,
Berlin

Stellvertretender Präsident des Kuratoriums

Prof. Dr. h. c. Dr. rer. nat. Klaus von Klitzing
Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

Dr.-Ing. Axel Anderlohr

Geschäftsführer TÜV Pfalz GmbH, Kaiserslautern

Prof. Dr. rer. nat. Gisela Anton

Physikalisches Institut IV der Universität Erlangen

Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Auweter-Kurtz

Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart

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

Geschäftsführer (bis 07.2005)
National Rejectors Inc. GmbH, Buxtehude

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. Jürgen Mlynek

Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft, Berlin

Prof. Dr.-Ing. Volker Pilz (bis 07.2005)

Prof. Dr. rer. nat. Frank Pobell

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

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

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

Vorsitzender des Vorstandes
Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich

Dr. rer. nat. Martin Winterkorn

Mitglied des Konzernvorstandes
Volkswagen AG, Wolfsburg

Dr.-Ing. Klaus Rudolf Wurster

Geschäftsführer (ab 07.2005)
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 07.2005):

Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. Lothar Siekmann

Institut für Klinische Biochemie, Universität Bonn



Präsidium

Präsident
Prof. Dr. E. O. Göbel

☎ 10 00

Vizepräsident
Prof. Dr. Dr. h. c. M. Kochsiek

☎ 20 00

Mitglied des Präsidiums
Prof. Dr. M. Kühne

☎ 30 00

Abteilung 1
Mechanik und Akustik
Prof. Dr. M. Peters

☎ 10 10

Abteilung 2
Elektrizität
Dr. H. Bachmair

☎ 20 10

Abteilung 3
**Chemische Physik
und Explosionsschutz**
Dr. W. Hemminger

☎ 30 10

Abteilung 4
Optik
Dr. F. Riehle

☎ 40 10

Abteilung 5
Fertigungsmesstechnik
Prof. Dr. M. Kühne

☎ 30 00

Fachbereich 1.1
Masse
Dr. R. Schwartz

☎ 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. M. Klonz

☎ 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. J. Niemeyer

☎ 24 00

Fachbereich 2.5
**Halbleiterphysik und
Magnetismus**
Dr. U. Siegner

☎ 25 00

Fachbereich 2.6
Elektrische Einheiten
Dr. J. Melcher

☎ 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. H. Wehinger

☎ 37 00

Fachbereich 4.1
**Photometrie und angewandte
Radiometrie**
Prof. Dr. J. Metzdorf

☎ 41 00

Fachbereich 4.2
**Bild- und Wellenoptik
und Druck**
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. C. Fallnich

☎ 45 00

Fachbereich 5.1
Nano- und Mikrometrologie
Dr. G. Wilkening

☎ 51 00

Fachbereich 5.2
Längen- und Winkelteilungen
Dr. H. Bosse

☎ 52 00

Fachbereich 5.3
Koordinatenmesstechnik
Dr. F. Wäldele

☎ 53 00

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: BWA

Benannte Stellen nach europäischen Richtlinien (Nummer: 0102)

Zertifizierungsstelle für
Messgeräte (in Vorbereitung)
EG-Richtlinien 2004/22/EG
Dr. H. Stolz
im Fachbereich Q.3

☎ 83 20

Zertifizierungsstelle für
nichtselbsttätige Waagen
EG-Richtlinie 90/384/EWG
Dr. R. Schwartz
im Fachbereich 1.1

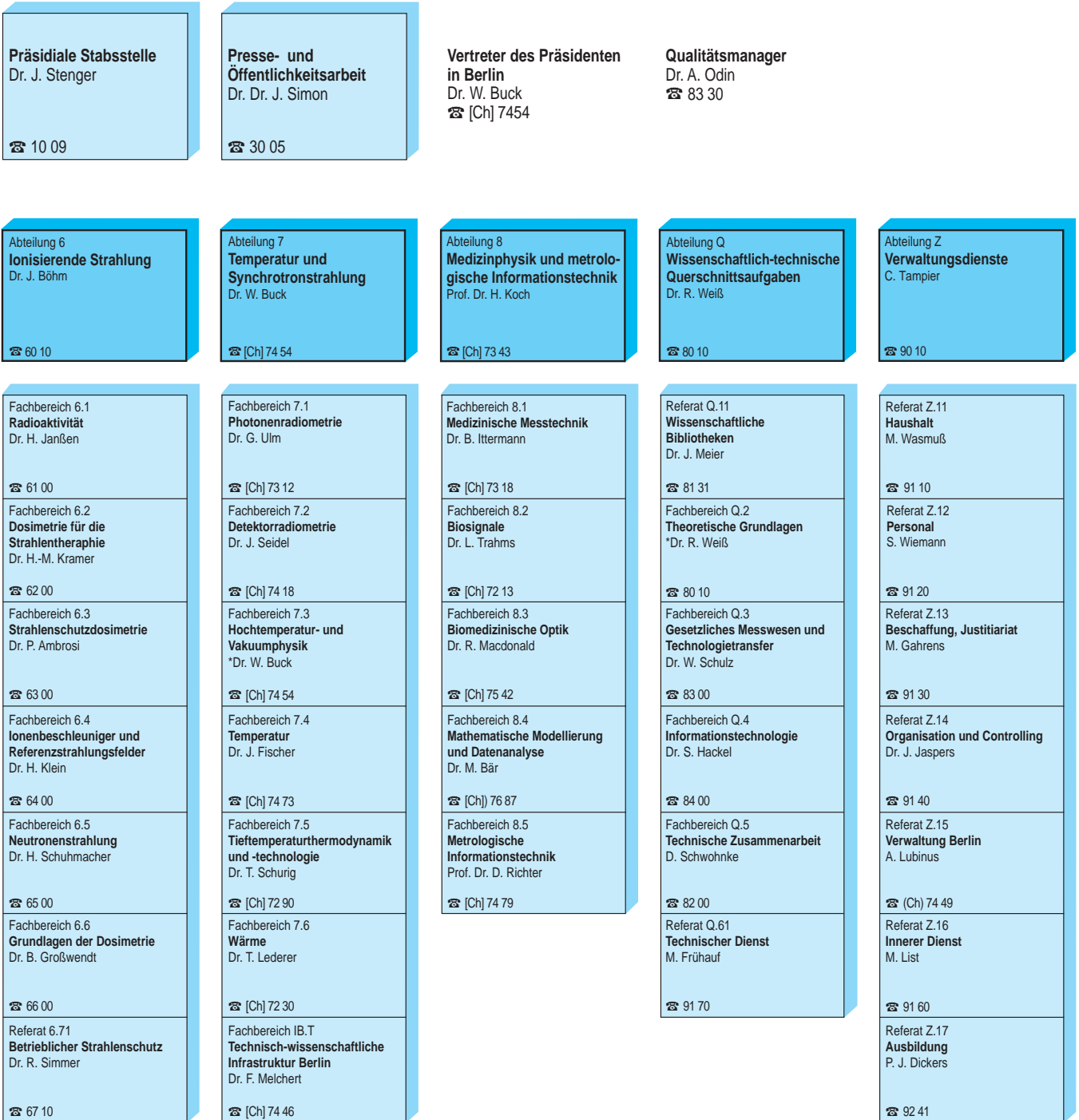
☎ 11 00

Zertifizierungsstelle für
Explosionsschutz
EG-Richtlinie 94/9/EG
Dr. H. Wehinger
im Fachbereich 3.7

☎ 37 00

Organigramm

Stand: 1. Oktober 2005



Gesamtpersonalrat

R. Thomas ☎ (Ch) 73 60
Örtlicher Personalrat Braunschweig
 U. Meyer ☎ 10 90
Örtlicher Personalrat Berlin
 R. Thomas ☎ (Ch) 73 60
Gleichstellungsbeauftragte
 C. Krügener ☎ 91 33

Gesamtvertretung der Schwerbehinderten

T. Quandt ☎ 10 97
Vertretung der Schwerbehinderten Braunschweig
 T. Quandt ☎ 10 97
Vertretung der Schwerbehinderten Berlin
 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-Charlottenburg:

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

Impressum

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

Braunschweig, März 2006

Satz, Gestaltung: PTB, Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Übersetzung: PTB, Sprachendienst

Druck: Saxoprint, Dresden

Nachdruck mit Quellenangabe gestattet.



Jahresbericht im Internet

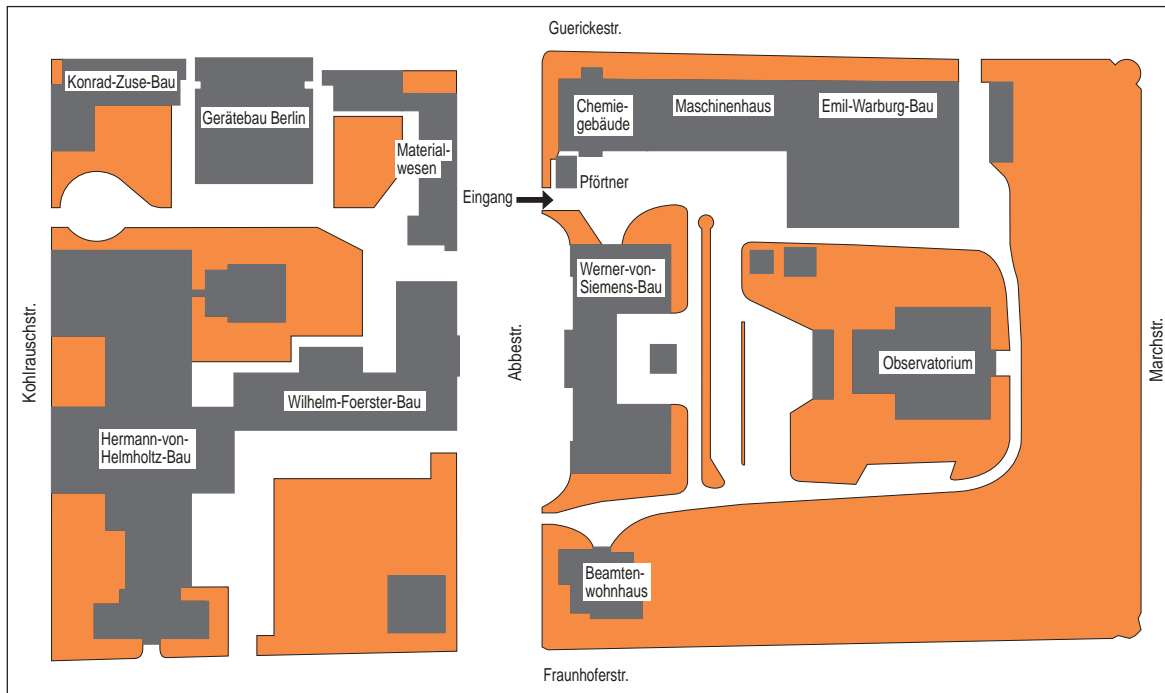
Der gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2005. Den kompletten Jahresbericht mit Nachrichten und speziellen Listen finden Sie auf den Internetseiten der PTB (unter www.ptb.de im Bereich „Publikationen“).

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

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

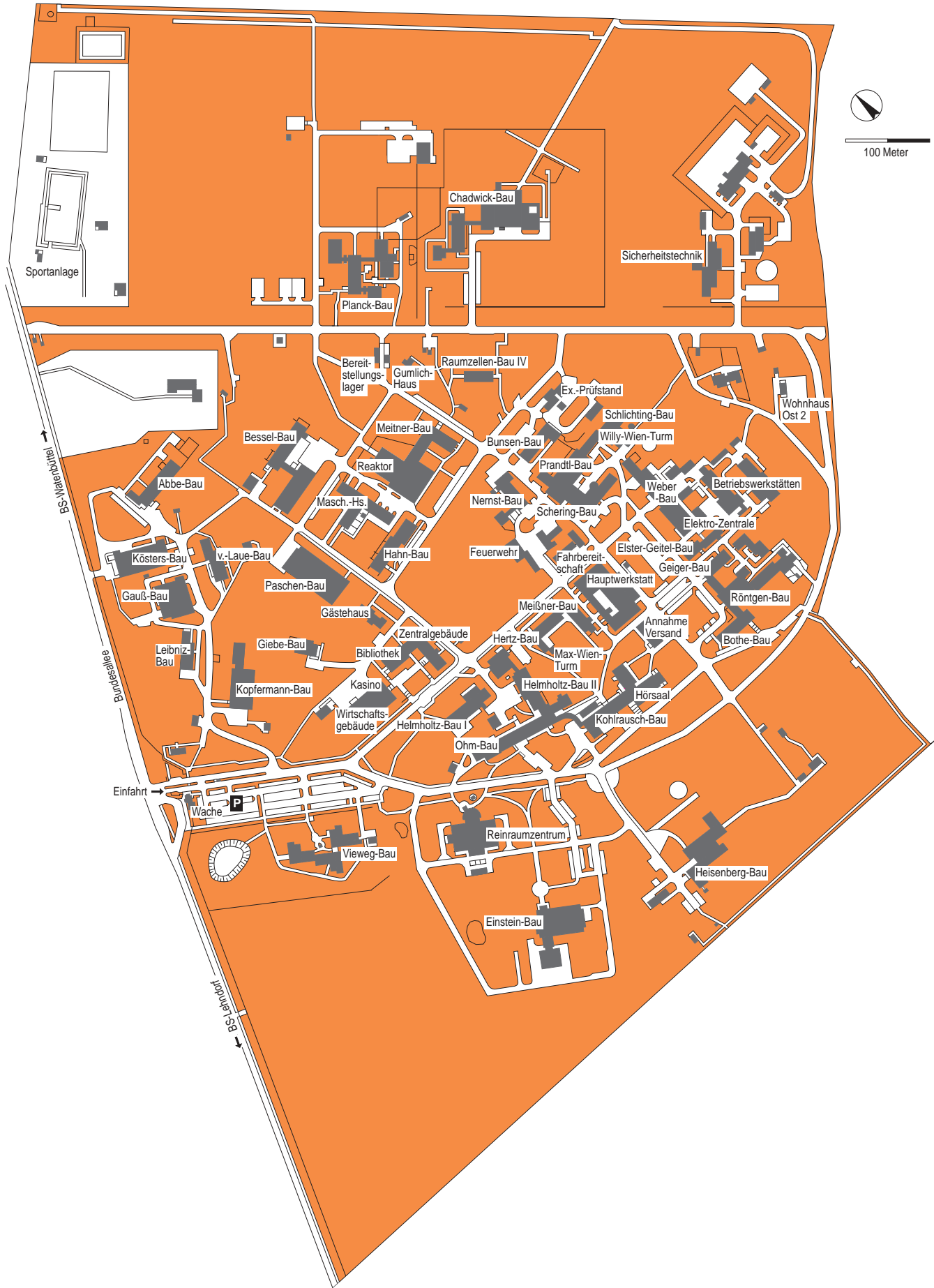
Annahme- und Versandgebäude
 Betriebswerkstätten
 Bibliothek
 Elektrozentrale
 Feuerwehr
 Kohlrusch-Bau
 Vieweg-Bau
 Zentralgebäude

PÖ

Zentralgebäude

unterstrichen: Sitz Abteilungleitung

Geländeplan Braunschweig





Dienstleistung durch

§

